

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

ФЁДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ 2022

III ВСЕРОССИЙСКАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ
УЧАСТИЕМ
(С ЭЛЕМЕНТАМИ НАУЧНОЙ
ШКОЛЫ ДЛЯ МОЛОДЕЖИ)

Москва
15 — 18 ноября
2022 г.

УДК 621.3
Ф 33

Ф 33 Фёдоровские чтения — 2022: ЛП Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (с элементами научной школы для молодежи) (Москва, 15—18 ноября 2022 г.) / под общ. ред. Ю.В. Матюниной. — М.: Издательский дом МЭИ, 2022. — 427 с.

ISBN 978-5-383-01615-2

Публикуются материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (с элементами научной школы для молодежи) «Фёдоровские чтения — 2022», прошедшей в Национальном исследовательском университете «МЭИ» 15—18 ноября 2022 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 — 2022

ЛП Всероссийская научно-практическая конференция
с международным участием (с элементами научной школы для молодежи)

Корректор Г.Ф. Раджабова

Подписано в печать с оригинал-макета 14.11.22. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 27,0

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 978-5-383-01615-2

© Коллектив авторов, 2022

© НИУ «МЭИ», 2022

СЕКЦИЯ 1

ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

*Д.В. Луценко, lutsenko@bk.ru,
Технопарк ФГБОУ ВО КГТУ, г. Калининград*

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Свойство негауссовости выборок данных, описывающих поведение систем, не позволяет использовать оценки, основанные на статистическом среднем и дисперсии. Для преодоления этого разработан и активно развивается ранговый анализ, центральное место в котором занимают модель техноценоза и аппарат ранговых распределений [1, 2]. Ранговое распределение представляет собой невозрастающую последовательность значений параметров, поставленных в соответствие рангам. Примером исследуемой системы может выступать регион, город, корпоративный или региональный электротехнический комплекс (далее — РЭК), территориально-распределенный производственный комплекс, а в качестве параметра — электропотребление (кВт·ч) за интервал времени (далее — ЭП), потребление тепла, газа и др. Объектом анализируемой системы выступает пространственно-технологический кластер, имеющий собственный приборный учет, а также подсистему управления в лице руководителя (начальника) или другого ответственного сотрудника.

Постановка задачи прогнозирования. Рассмотрим результат функционирования РЭК по параметру электропотребления, характеризующийся таблицей данных (рис. 1).

В таблице номер строки соответствует номеру объекта, номер столбца — номеру временного интервала, а значение в ячейке — электропотреблению объекта за исследуемый интервал времени (час, месяц, квартал, год).

Утверждается, что между объектами РЭК имеется сложный, трудно формализуемый механизм взаимодействия, который влияет на закономерности в данных по ЭП и обусловлен как влиянием внешней среды, так и строением самого РЭК. Поставим задачу разработки методики про-

Номер объекта	t	t+1	t+2	...	T-1	T
1	$W_{1,t}$	$W_{1,t+1}$	$W_{1,t+2}$	...	$W_{1,T-1}$	$W_{1,T}$
2	$W_{2,t}$	$W_{2,t+1}$	$W_{2,t+2}$	...	$W_{2,T-1}$	$W_{2,T}$
3	$W_{3,t}$	$W_{3,t+1}$	$W_{3,t+2}$	...	$W_{3,T-1}$	$W_{3,T}$
4	$W_{4,t}$	$W_{4,t+1}$	$W_{4,t+2}$	...	$W_{4,T-1}$	$W_{4,T}$
...
n	$W_{n,t}$	$W_{n,t+1}$	$W_{n,t+2}$	...	$W_{n,T-1}$	$W_{n,T}$

Рис. 1. Таблица исходных данных по параметру электропотребления (ЭП)

гнозирования для рассматриваемой системы, учитывающей указанные явления на системном уровне, основанную на аппарате ранговых распределений.

Прогнозирование последовательности ранговых параметрических распределений. Итак, на основе таблицы данных (см. рис. 1) путем применения операции ранжирования в убывающей последовательности построим таблицу ранговых параметрических распределений (рис. 2), в которой номер строки соответствует значению ранга, номер столбца — номеру временного интервала, а значение в ячейке таблицы — электропотреблению ранга за исследуемый интервал времени (час, месяц, квартал, год). Отдельный столбец таблицы, представленный на рис. 2, представляет собой ранговое параметрическое распределение, характеризующее ЭП РЭК в целом за определенный временной интервал.

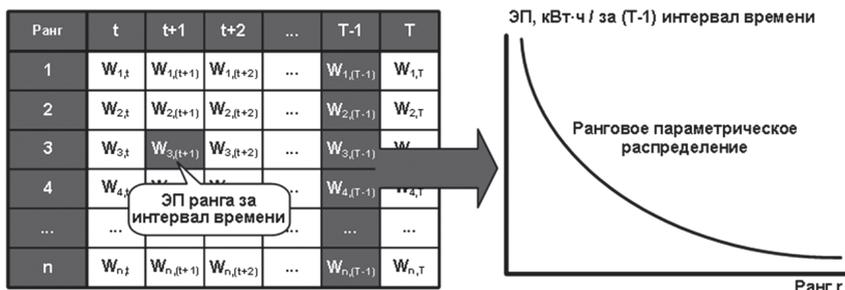


Рис. 2. Таблица ранговых параметрических распределений по ЭП

Аналитически таблицу ранговых параметрических распределений удобно представлять матрицей ранговых параметрических распределений:

$$\mathbf{W}_r = \| w_{r,t} \|_{r=1, t=1}^{n, T}, \quad (1)$$

где n — число объектов системы, T — число временных интервалов.

Для решения задачи прогнозирования матрицу ранговых параметрических распределений преобразуем в последовательность ранговых параметрических распределений:

$$\mathbf{W}_r(t) = \mathbf{W}_{r,1}, \mathbf{W}_{r,2}, \dots, \mathbf{W}_{r,T} = [\mathbf{W}_{r,t}]_{t=1}^T, \quad (2)$$

где $\mathbf{W}_{r,1} = \| w_{r,t} \|_{r=1}^n$ — первый столбец матрицы (1), соответствующий ранговому параметрическому распределению первого момента времени; T — длина последовательности.

Графически последовательность ранговых параметрических распределений $\mathbf{W}_r(t)$ представляется трехмерной ранговой параметрической поверхностью в координатах ранг—параметр—время (рис. 3).

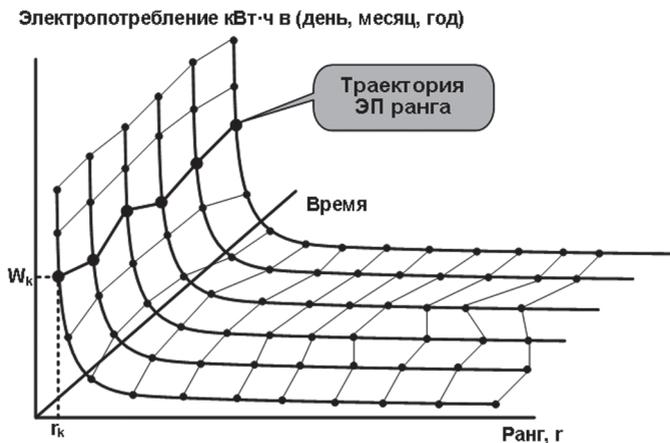


Рис. 3. Ранговая параметрическая поверхность

Констатируется, что форма ранговой параметрической поверхности является устойчивой, а между ранговыми параметрическими распределениями имеется сильная статистическая связь. На этом утверждении предложим алгоритм прогнозирования ранговой параметрической поверхности на основе последовательной сдвиговой процедуры.

Для построения алгоритма прогнозирования воспользуемся регрессионной зависимостью в матричной форме:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{w}^T \mathbf{X} + b + \mathbf{E}, \quad (3)$$

где \mathbf{w} — вектор коэффициентов; b — значение порога; \mathbf{X} — вектор независимых переменных; \mathbf{E} — вектор ошибок; \mathbf{Y} — вектор зависимых переменных.

Зададим произвольный момент времени t и приравняем два ранговых параметрических распределения из последовательности (2): $\mathbf{X} = \mathbf{W}_{r,t-1}$, $\mathbf{Y} = \mathbf{W}_{r,t}$. Определим параметры регрессионной зависимости \mathbf{w} и b (3). Тогда при условии, что зависимость сохранится в будущем, оценка прогнозного рангового параметрического распределения в момент времени $(t + 1)$ $\widehat{\mathbf{W}}_{r,t+1}$ определится следующим образом:

$$\widehat{\mathbf{W}}_{r,t+1} = \mathbf{w}^T \mathbf{W}_{r,t} + b. \quad (4)$$

Выражения (3), (4) представляют собой аналитическую основу прогнозирования рангового параметрического распределения на основе трехмерной ранговой параметрической поверхности (см. рис. 3) на шаг вперед. Отрицательным в прогнозе на шаг вперед является то, что регрессионная зависимость (3) характеризует связь между двумя соседними ранговыми параметрическими распределениями в последовательности (2) и не отражают электропотребление РЭК в исследуемом временном интервале. Для устранения этого недостатка введем в рассмотрение последовательную сдвиговую процедуру (рис. 4), в которой формируется последовательность векторов независимых переменных $\mathbf{X}(t) = \mathbf{W}_{r,t}, \mathbf{W}_{r,t+1}, \dots, \mathbf{W}_{r,T-1}$ и последовательность векторов зависимых переменных $\mathbf{Y}(t) = \mathbf{W}_{r,t+1}, \mathbf{W}_{r,t+2}, \dots, \mathbf{W}_{r,T}$. Очевидно, что последовательность зависимых переменных $\mathbf{X}(t)$ сдвинута относительно последовательности независимых переменных $\mathbf{Y}(t)$ на один временной лаг.

Далее путем последовательной конкатенации получим из последовательностей $\mathbf{X}(t)$ и $\mathbf{Y}(t)$ обобщенные вектор независимых \mathbf{X}^* и вектор зависимых \mathbf{Y}^* переменных на основе следующих выражений:

$$\mathbf{X}^* = \begin{cases} \mathbf{X}_k, & k = 1; \\ \left[\begin{array}{c} \mathbf{X}^* \\ \mathbf{X}_k \end{array} \right], & k = 2, \dots, m, \end{cases} \quad \mathbf{Y}^* = \begin{cases} \mathbf{Y}_k, & k = 1; \\ \left[\begin{array}{c} \mathbf{Y}^* \\ \mathbf{Y}_k \end{array} \right], & k = 2, \dots, m, \end{cases} \quad (5)$$

где m — длина последовательности; $[]$ — операция конкатенации.

Ранг	t	t+1	t+1	t+2	t+2	t+3	...	T-1	T
1	$W_{1,t}$	$W_{1,(t+1)}$	$W_{1,(t+1)}$	$W_{1,(t+2)}$	$W_{1,(t+2)}$	$W_{1,(t+3)}$	...	$W_{1,(T-1)}$	$W_{1,T}$
2	$W_{2,t}$	$W_{2,(t+1)}$	$W_{2,(t+1)}$	$W_{1,(t+2)}$	$W_{2,(t+2)}$	$W_{1,(t+3)}$	...	$W_{2,(T-1)}$	$W_{2,T}$
3	$W_{3,t}$	$W_{3,(t+1)}$	$W_{3,(t+1)}$	$W_{1,(t+2)}$	$W_{3,(t+2)}$	$W_{1,(t+3)}$	...	$W_{3,(T-1)}$	$W_{3,T}$
4	$W_{4,t}$	$W_{4,(t+1)}$	$W_{4,(t+1)}$	$W_{1,(t+2)}$	$W_{4,(t+2)}$	$W_{1,(t+3)}$	...	$W_{4,(T-1)}$	$W_{4,T}$
...
n	$W_{n,t}$	$W_{n,(t+1)}$	$W_{n,(t+1)}$	$W_{1,(t+2)}$	$W_{n,(t+2)}$	$W_{1,(t+3)}$	...	$W_{n,(T-1)}$	$W_{n,T}$
	X_1	Y_1	X_2	Y_2	X_3	Y_3		X_m	Y_m

Рис. 4. Схема последовательной сдвиговой процедуры

Таким образом, с использованием описанной сдвиговой процедуры получены два обобщенных вектора: независимых X^* и зависимых Y^* переменных. Зависимость между данными векторами отражает связь между двумя последовательными ранговыми параметрическими распределениями в последовательности $W_r(t)$ в анализируемом для построения прогноза временном интервале. Устанавливая связь между данными векторами с использованием различных методов и алгоритмов (искусственных нейронных сетей, машины опорных векторов, полиномов и др.), применяя процедуры перекрестной проверки, можно построить достаточно точный прогноз с заданным горизонтом.

Рекуррентный прогноз на основе зависимости (3) строится по выражению вида

$$\widehat{W}_r(k) = \begin{cases} w^T W_{r,T} + b, & k = 1; \\ w^T \widehat{W}_{r,(k-1)} + b, & k = 2, \dots, P, \end{cases} \quad (6)$$

где $\widehat{W}_r(k)$ — последовательность прогнозных ранговых параметрических распределений; k — шаг прогноза; P — горизонт прогнозирования; $W_{r,T}$ — последнее известное фактическое ранговое параметрическое распределение, соответствующее моменту прогнозирования T .

Для того, чтобы оценить преимущество предложенного подхода по сравнению с «традиционными» техноценологическими методами прогнозирования, раскроем их суть [2—4]. Здесь центральное место занимает ап-

проксимация каждого рангового параметрического распределения в последовательности $\mathbf{W}_r(t)$ на основе стандартной зависимости вида

$$w(r) = W_1 / r^\beta, \quad (7)$$

где W_1 — первая точка; β — ранговый коэффициент.

После чего получают две временные последовательности — $W_1(t) = [W_{1t}]_{t=1}^T$ первой точки и $\beta(t) = [\beta_t]_{t=1}^T$ рангового коэффициента. На основе данных выражений прогнозирование последовательности ранговых параметрических распределений $\mathbf{W}_r(t)$ осуществляется по следующему выражению [5]:

$$w(r, t) = W_1(t) / r^{\beta(t)}. \quad (8)$$

Как представляется, основным недостатком «традиционных» технико-экономических методов прогнозирования на основе выражений (7), (8) является необходимость трех аппроксимаций: сначала ранговых распределений по выражению (7), затем последовательностей первой точки и рангового коэффициента. Это при проецировании прогнозных значений на отдельные объекты, особенно в области максимальных рангов, приводит к существенным ошибкам. Предлагаемый в статье подход основан на последовательной сдвиговой процедуре, использует только одну аппроксимацию в выражении (3), устанавливающую связь между обобщенным вектором независимых переменных \mathbf{X}^* и обобщенным вектором зависимых переменных \mathbf{Y}^* .

Имея в распоряжении прогнозное ранговое параметрическое распределение, необходимо спроецировать (сопоставить) значения в рангах соответствующим объектам РЭК, т.е. точно указать каждому из объектов системы, в каком он окажется ранге на определенном шаге прогнозирования. Для этого необходимо использовать соответствующую ранговую конфигурацию или их последовательность.

Прогнозирование ранговых конфигураций. Основанное на явлении ранговой динамики понятие ранговой конфигурации и классификация конфигураций введены и подробно рассмотрены в работах [5, 6]. В прогнозировании применяют две ранговые конфигурации: ранговое отображение π и сдвиговое ранговое отображение σ . Ранговое отображение $\pi: \mathbf{I} \rightarrow \mathbf{R}$ устанавливает взаимно однозначное соответствие между множеством объектов $\mathbf{I} = \{\overline{1}, n\}$ и множеством рангов $\mathbf{R} = \{\overline{1}, n\}$. Несмотря на то, что объекты и ранги размечены при помощи одного и того же множества $\{\overline{1}, n\}$, важно понимать их разную интерпретацию. Так как ранговые конфигурации заданы на множестве $\{\overline{1}, n\}$, для решения практических

задач полезно их рассматривать как подстановки, над которыми можно выполнять действия: возведение в степень, умножение, взятие обратной подстановки.

Итак, при построении последовательности ранговых параметрических распределений $\mathbf{W}_r(t)$ можно определить соответствующую ей последовательность ранговых отображений:

$$\pi(t) = \pi_{t_1}, \pi_{t_2}, \dots, \pi_T = [\pi_t]_{t=1}^T. \quad (9)$$

Путем выполнения операции левого умножения для элементов $\pi(t)$ формируется последовательность сдвиговых ранговых отображений:

$$t = 1, 2, \dots, T-1, \sigma_t = \pi_t^{-1} \circ \pi_{t+1}, \sigma(t) = \sigma_{t_1}, \sigma_{t_2}, \dots, \sigma_{T-1} = [\sigma_t]_{t=1}^{T-1}, \quad (10)$$

где \circ — операция умножения подстановок.

Сдвиговое ранговое отображение σ характеризует связь между двумя соседними ранговыми отображениями в последовательности $\pi(t)$.

Суть прогнозирования ранговых конфигураций заключается в поиске конфигурации, вероятность появления которой в исследуемом временном интервале является максимальной, и использовании ее для продолжения последовательности. Для этого каждая ранговая конфигурация преобразуется в подстановочную матрицу

$$\mathbf{\Pi} = \|\pi_{i,j}\|_{i=1, j=1}^n, \quad \pi_{i,j} = \begin{cases} 1, & s(i) = j; \\ 0, & s(i) \neq j, \end{cases} \quad (11)$$

где s — подстановка, соответствующая ранговой конфигурации.

Последовательность ранговых конфигураций преобразуется в последовательность подстановочных матриц вида

$$\mathbf{\Pi}(t) = \mathbf{\Pi}_{t_1}, \mathbf{\Pi}_{t_2}, \dots, \mathbf{\Pi}_T = [\mathbf{\Pi}_t]_{t=1}^T. \quad (12)$$

На основе последовательности подстановочных матриц определим матрицу частот:

$$\mathbf{H}^* = \sum_{t=1}^T \mathbf{\Pi}_t. \quad (13)$$

Матрица частот (13) может быть получена как для последовательности $\pi(t)$, так и для последовательности $\sigma(t)$. Представим матрицу частот \mathbf{H}^* как таблицу назначений в задаче о назначениях с запретными назначе-

ниями. Решая данную задачу на поиск максимального назначения, определяем подстановку, доставляющую максимум функции назначения:

$$s_{\max} = \arg \max_s \sum_{i=1}^n \mathbf{H}_{i,s(i)}^* \quad (14)$$

Если подстановка s_{\max} определена для последовательности ранговых отображений $\pi(t)$, то соответствующее ей ранговое отображение обозначим как π^* . Если подстановка s_{\max} определена для последовательности сдвиговых ранговых отображений $\sigma(t)$, то соответствующее ей сдвиговое ранговое отображение обозначим как σ^* . Ранговые конфигурации π^* и σ^* , определенные путем решения задачи о назначениях, рассматриваются как наиболее вероятные.

Проекция прогнозного рангового распределения на основе ранговой конфигурации π^* выполняется следующим образом:

$$i = 1, 2, \dots, n, \quad \widehat{w}_i = \widehat{\mathbf{W}}_r[\pi^*(i)], \quad (15)$$

где i — номер объекта системы; \widehat{w}_i — прогнозные значения параметра i -го объекта; $\widehat{\mathbf{W}}_r$ — вектор прогнозного рангового параметрического распределения; $\pi^*(i)$ — значение ранга, устанавливаемое i -му объекту в соответствии с ранговым отображением π^* .

Прогнозирование последовательности ранговых отображений $\pi(t)$ на основе сдвигового рангового отображения σ^* выполняется по рекуррентной формуле вида

$$\widehat{\pi}(k) = \begin{cases} \pi_T \circ \sigma^*, & k = 1; \\ \widehat{\pi}_{k-1} \circ \sigma^*, & k = 2, 3, \dots, P, \end{cases} \quad (16)$$

где $\widehat{\pi}(k)$ — последовательность прогнозных ранговых отображений; k — шаг прогноза; P — горизонт прогнозирования; π_T — последнее известное ранговое отображение, соответствующее моменту прогнозирования T .

Выполняя операцию проекции (15) для спрогнозированных ранговых отображений и ранговых параметрических распределений, устанавливаем значение параметра для каждого из объектов системы. При существенной ранговой динамике целесообразно прогнозировать последовательность ранговых отображений по выражению (16), в противном случае лучше выполнять проекции на основе одного рангового отображения π^* .

Рассмотренная методика прогнозирования последовательности ранговых конфигураций относится к структурному прогнозированию. Соответственно ошибки прогнозирования, возникающие по причине неточной ранговой конфигурации и, как следствие, неточно выполненной операции проекции (15), будем называть структурными.

В общем виде структурно-параметрическое прогнозирование ЭП РЭК включает следующую последовательность шагов:

- 1) ранжирование данных по ЭП и построение последовательностей ранговых параметрических распределений и ранговых конфигураций;
- 2) выполнение сдвиговой процедуры применительно к последовательности ранговых параметрических распределений и определение параметров обобщенной регрессионной зависимости;
- 3) прогнозирование на заданный горизонт последовательности ранговых параметрических распределений;
- 4) определение путем решения задачи о назначениях наиболее вероятных ранговых конфигураций;
- 5) в зависимости от интенсивности ранговой динамики прогнозировать последовательность ранговых отображений на основе наиболее вероятного сдвигового рангового отображения σ^* или использовать в операции проекции наиболее вероятное ранговое отображение π^* ;
- 6) выполнение операции проекции и установление прогнозных значений каждому из объектов анализируемого РЭК.

Выводы. Представленный в статье подход структурно-параметрического прогнозирования ЭП РЭК является естественным продолжением разработанных техноценологических методов, основанных на применении аппарата ранговых распределений. Его отличительными особенностями является применение сдвиговой процедуры, что позволило взаимосвязь между ранговыми параметрическими распределениями в последовательности описать обобщенной регрессионной зависимостью. Основываясь на данной зависимости, возможно рекуррентно продолжить последовательность ранговых параметрических распределений, т.е. осуществить параметрический прогноз. Разработанные техноценологические методы основываются на гипотезе о постоянстве рангов. В противовес ей предлагается учесть явление ранговой динамики и дополнить представленный в статье параметрический прогноз структурным, основанным на определении наиболее вероятных ранговых конфигураций. Это позволяет с большей достоверностью соотнести значения на прогнозном ранговом параметрическом распределении каждому из объектов системы.

Впервые в прогнозировании на основе техноценологических методов выполнено разделение ошибки прогнозирования на параметрическую и структурную. Как представляется, это позволит развить новые направления в совершенствовании существующих и разработке новых техноценологических методов. Одно из направлений будет развивать методы, позволяющие более полно учесть закономерности, заложенные в конфигурации

трехмерной ранговой параметрической поверхности. Другое направление сосредоточится на развитии комбинаторного рангового анализа.

Литература

1. **Кудрин Б.И.** Введение в технетику. Томск: Издательство Томского государственного университета, 1993. 552 с.
2. **Гнатюк В.И.** Закон оптимального построения техноценозов: компьютерная версия переработанная и доп. 2005—2022. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru>
3. **Фуфаев В.В.** Ценологическое определение параметров электропотребления, надежности, монтажа и ремонта электрооборудования предприятий региона: монография. М.: Центр системных исследований, 2000. 320 с.
4. **Лагуткин О. Е.** Прогнозирование параметров многономенклатурных химических производств: дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03. М.: МЭИ, 1994. 201 с.
5. **Луценко Д.В.** Комбинаторная теория ранговой динамики: трактат. Калининград: КИЦ «Техноценоз», 2017. 113 с. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/ktrd.pdf>
6. **Луценко Д.В.** Основы применения комбинаторной теории ранговой динамики в исследовании функционирования припортового регионального электротехнического комплекса // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 4 (38). Т. 2. Труды V международного балтийского форума. Калининградский государственный технический университет, 2017. С. 122—127.

*В.И. Гнатюк, mail@gnatukvi.ru, КГТУ, г. Калининград,
Д.В. Ленехо, ldv236@yandex.ru, КИЦ «Техноценоз», г. Калининград,
О.Р. Кивчун, oleg_kivchun@mail.ru, БФУ им. И. Канта, г. Калининград*

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ НОРМ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ С УЧЕТОМ СТАТИСТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОТДЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

На примере одного из электротехнических комплексов, расположенных в Калининградской области, можно заметить, что электропотребление неуклонно растет (рис. 1). Это объясняется постоянным увеличением и совершенствованием технической составляющей производственных и организационных процессов. Современное энергоемкое оборудование вызывает увеличение установленной мощности и электропотребления объектов.

Также рост электропотребления обусловлен децентрализацией и несовершенством существующих методик управления. Хотя обобщение фактических данных и финансирование осуществляется в главном офисе, специалисты обеспечения слабо влияют на режим эксплуатации технических средств на местах, а следовательно, на их электропотребление.

При этом стоит заметить, что при росте электропотребления в 2020 г. на 6,5 % по сравнению с 2017 г. расходы в связи с изменением тарифов на электроэнергию увеличились почти на 15 % (2017 г. — 28,1 млн руб, 2020 г. — 32,5 млн руб).

В соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации № 1623-р от 28.07.2017 г., которым утверждена программа цифровой экономики государства, данные в цифровом виде рассматриваются как определяющий фактор производства, независимо от конкретной сферы социальной и экономической деятельности. Указ № 204 от 07.05.2018 г., определяющий национальные цели и стратегические задачи развития, называет ускоренное внедрение цифровых технологий в экономическую и социальную сферу одним из самых значимых направлений развития и разработки национальных проектов, а Министерство энергетики РФ с 2019 г. реализует ведомственный проект «Цифровая энергетика», в рамках которого рассматриваются вопросы преобразования энергетической инфраструктуры государства посредством цифровых решений и создания цифровых платформ, охватывающих сферу производства и потребления электроэнергии.

В данном случае цифровая платформа рассматривается как система подчиненных специальным алгоритмам взаимоотношений элементов какого-либо процесса, объединенных информационной средой, приводящая к снижению транзакционных издержек вследствие применения набора технологий, связанных с цифровизацией. Актуальная и в сфере электроэнергетики, цифровизация предполагает создание цифровых платформ, которые обеспечивали бы устойчивое функционирование электротехнического комплекса, реализацию процесса электропотребления с максимальной энергоэффективностью и минимальными потерями, а также позволяли бы достоверно его прогнозировать. В связи с этим целью цифровизации

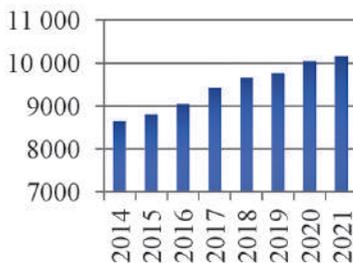


Рис. 1. Электропотребление комплекса, МВт·ч/год

электропотребления является, с одной стороны, снижение затрат на управление и всестороннее обеспечение, а с другой — повышение [5]:

- энергоэффективности технологических процессов;
- гибкости процессов управления электропотреблением;
- устойчивости электроснабжения за счет нормирования.

Рассмотрим возможность применения интеллектуального нормирования для управления электропотреблением электротехнического комплекса в условиях возрастающих требований по цифровизации процессов всестороннего обеспечения оперативно-служебной деятельности.

Интеллектуальное нормирование осуществляется с целью оптимального управления процессом электропотребления. Нормирование в этом контексте заключается в определении динамических норм для каждого объекта в составе электротехнического комплекса с учетом статистических особенностей электропотребления в рассматриваемом периоде. Необходимо учитывать, что к электротехническому комплексу в указанных условиях применим термин «техноценоз», т.е. он может изучаться как ограниченная во времени и пространстве система, представляющая собой совокупность технических изделий, объединенных слабыми связями и единой системой обеспечения и управления.

Конечная цель интеллектуального нормирования — приведение электротехнического комплекса к требуемому состоянию в обозначенные сроки с максимальной вероятностью. Требуемое состояние описывается ранговым гиперпараметрическим распределением, имеющему форму, которая позволяет снизить значения дифлекс-параметра при одновременном увеличении в установленных пределах значений дифлекс-угла. Как видно, интеллектуальное нормирование включает в себя элементы целеполагания, прогнозирования, построения стратегии, планирования ресурсов. Кроме того, обязательно должна реализовываться обратная адаптация данных. Таким образом, интеллектуальное нормирование является значимой составляющей процесса оптимального управления электропотреблением наряду с процедурами верификации и аппроксимации данных и других процедур рангового анализа, а также выступает необходимым элементом реализации процедур управления, применяемых в контексте разрабатываемой цифровой платформы энергоэффективности [2, 3].

Понятие интеллектуального нормирования тесно связано с эффективностью управления электропотреблением объектов электротехнического комплекса, которая оценивается после реализации ZP-анализа, для чего с целью сравнения вычисляются интегральные показатели: показатель положительного эффекта и понесенных системой затрат. Полезный эффект

от реализации в системе методологии оптимального управления электропотреблением оценивается с помощью интегрального показателя [2]:

$$\begin{cases} IP_W^* = \left(\int_0^\infty W(r) dr - \int_0^\infty W^*(r) dr \right) / \int_0^\infty W(r) dr; \\ IP_W^t = \left(\int_0^\infty W(r) dr - \int_0^\infty W^t(r) dr \right) / \int_0^\infty W(r) dr, \end{cases} \quad (1)$$

где $W(r)$ — результат аппроксимации фактических показаний; IP_W^* — целевой показатель потенциала энергосбережения; IP_W^t — интегральный показатель качества.

Степень эффективности указанной процедуры управления электропотреблением характеризуется целевым интегральным показателем, который по существу является относительным Z-потенциалом энергосбережения техноценоза. Показатель вычисляется путем нахождения отношения показателя качества на отдельном временном интервале к нижней границе области допустимых значений [2]:

$$IP_W = \frac{IP_W^t}{IP_W^*} = \frac{\int_0^\infty W(r) dr - \int_0^\infty W^t(r) dr}{\int_0^\infty W(r) dr - \int_0^\infty W^*(r) dr}. \quad (2)$$

Полная реализация методологии оптимального управления потреблением электроэнергии требует определенных затрат, которые в отдельных случаях могут быть значительными. Для их определения рассчитаем зависимость разницы итоговых затрат на энергосбережение электротехнического комплекса на рассматриваемом временном интервале от стоимости электроэнергии, которая соответствует Z1- и Z2-потенциалам. Если на отдельных этапах реализации методологии к объектам применяются индивидуальные тарифы на электроэнергию, данный показатель может рассчитываться по формуле [1, 2]

$$IP_C = 1 + \frac{\int_0^\infty C^t(r) dr}{\int_0^\infty (W(r)sc(r)) dr - \int_0^\infty (W^*(r)sc^*(r)) dr}, \quad (3)$$

где $C^t(r)$ — ранговое параметрическое распределение объектов электротехнического комплекса по суммарным затратам на реализацию процесса

энергосбережения на указанном интервале; $sc(r)$ — ранговое параметрическое распределение тарифа на электроэнергию, предъявляемого объектам на начальном временном интервале, на котором фиксировались эмпирические значения электропотребления и строилось ранговое параметрическое распределение $W(r)$; $sc^*(r)$ — ранговое параметрическое распределение, показывающее данные тарифов на электроэнергию.

Следовательно, о степени эффективности процесса управления электропотреблением объектов комплекса с наибольшей достоверностью можно судить по максимизации интегрального показателя [5]:

$$IP = \frac{IP_W}{IP_C} \rightarrow \max. \quad (4)$$

Приведенный показатель IP_W должен принимать значения от 0 до 1. Нулевое значение соответствует отсутствию управляющих энергосберегающих процедур (при этом функция $W^l(r)$ максимально совпадает с исходной функцией). Единица означает, что возможности Z-потенциала исчерпаны, а функция $W^l(r)$ будет идентична итоговой функции. Интегральный показатель IP_C лежит в диапазоне от 1 до бесконечности, границы данного диапазона означают нулевые затраты на выполнение указанных энергосберегающих мероприятий и, соответственно, бесконечно большие затраты. Итоговый показатель IP , следовательно, сможет принимать значения, находящиеся в диапазоне от 0 до 1.

В статье [2] описаны способы применения ранговых распределений в целях управления энергопотреблением, для повышения энергоэффективности и оптимального расходования ресурсов. Введены понятия и методики расчета ряда критериев и параметров, в частности дифлекс-параметра.

Дифлекс-угол (рис. 2) зависит от текущего состояния электротехнического комплекса, а также различных внешних факторов. Крайние состояния системы сопоставлены таким показателям: $\alpha = 0$ — дифлекс-параметр равен нулю; $\alpha = 90$ — электропотребление равно нулю. При $\alpha = 0$ все объекты электротехнического комплекса имеют показатели электропотребления, находящиеся вблизи нижней границы. При $\alpha = 90$ и $IP = 0$ объекты вообще не потребляют электроэнергию. Реально существующий комплекс будет соответствовать переходному значению рассчитываемого дифлекс-угла. В результате управления электропотреблением дифлекс-угол будет последовательно увеличиваться, а в пределе достигнет целевого значения (обозначается α^*).

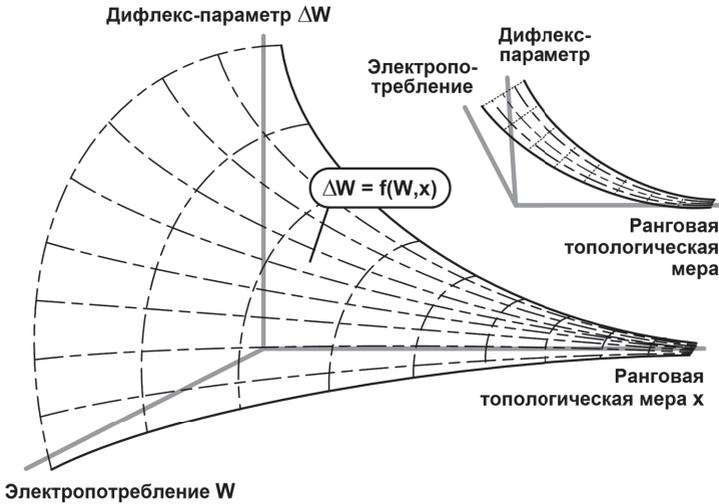


Рис. 2. Гиперпараметрическая поверхность

Для достижения оптимальных показателей электропотребления должны быть получены такие значения параметров управляющего воздействия, направленного на энергосбережение, которые позволят приблизить электропотребление объектов техноценоза к нижней границе установленной области допустимых значений.

Подобная задача может быть квалифицирована как шаговая задача динамического программирования с закрепленными левым и правым концами траектории (левый закрепленный конец — аппроксимационная кривая электропотребления, правый — нижняя граница области допустимых значений на рис. 2).

Для описания исследуемого электротехнического комплекса применим дискретное множество состояний:

$$w \equiv (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n, \dots). \quad (5)$$

Состояние техноценоза описывается вектором показаний электропотребления (n — количество объектов) в рассматриваемом периоде. Следовательно, задача динамического программирования предполагает некоторое пренебрежение многомерностью множества возможных промежуточных состояний. Но подобные допущения необходимы для правильного численного решения поставленной задачи.

Изменение состояния рассматриваемой негауссовской системы описывается уравнениями [2]

$$\left\{ \begin{array}{l} w_i^{t+1} = f_i(w_1^t, w_2^t, w_3^t, \dots, w_n^t; u_1^{t+1}, u_2^{t+1}, u_3^{t+1}, \dots, u_n^{t+1}), \\ w^{t+1} = f(w^t, u^{t+1}), \\ u^{t+1} \equiv \{u_1^{t+1}, u_2^{t+1}, u_3^{t+1}, \dots, u_n^{t+1}\}. \end{array} \right. \quad (6)$$

В выражении (6) в соответствии со значением управляющей переменной определяется последовательность принимаемых мер и решений, модифицирующие состояние t -й системы состояний в $(t + 1)$. При этом в общем случае количество рассматриваемых членов множества управляющих переменных может существенно отличаться от количества членов множества переменных состояния, но в контексте статьи количество принимается равным, следовательно, программная реализация алгоритма должна учитывать это в виде некоторых ограничений.

Как было описано в [2], в случае задания начального состояния системы (объекта) w^0 и некоторого множества ограничений в виде равенств или неравенств для всех переменных состояния и управления, решение задачи осуществляется через поиск оптимальной стратегии $u^1, u^2, u^3, \dots, u^L$ (оптимальной экстремали для общего случая вариационного исчисления), которая приводила бы к минимизации критерия-функционала:

$$\begin{aligned} \min_{u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)} \int_{t_0}^{t_F} f_0(w_1, \dots, w_{n-1}, w_n; u_1, \dots, u_{n-1}, u_n) dt &\equiv \\ \equiv S(w_1(t_0), \dots, w_{n-1}(t_0), w_n(t_0); w_1(t_F), \dots, w_{n-1}(t_F), w_n(t_F)) &\equiv \\ \equiv S(W_1, \dots, W_{n-1}, W_n), & \end{aligned} \quad (7)$$

удовлетворяющего дифференциальному уравнению с частными производными первого порядка (применяется уравнение Гамильтона—Якоби, которое основано на классическом гамильтониане с обобщенными координатами [4]):

$$M \left(W_1, \dots, W_{n-1}, W_n; \frac{\partial S}{\partial w_1}, \dots, \frac{\partial S}{\partial w_{n-1}}, \frac{\partial S}{\partial w_n} \right) = 0, \quad (8)$$

где M — оптимальная функция Гамильтона.

Известно, что при решении задачи шагового управления в характерных для класса моделей управления электропотреблением объектов техноценоза условиях дискретного времени (в связи со спецификой получения ис-

ходных данных от приборов учета электроэнергии), интегральный функционал [5] приобретает вид аддитивного критерия

$$w_0^L = \sum_{t=0}^{L-1} (f_0(w^t, u^{t+1})) + f(w^L) = w_0^L(w^0), \quad (9)$$

где L — шаги решения сформулированной задачи динамического программирования; $f(w^L)$ — функция, описывающая состояния рассматриваемого электротехнического комплекса на последнем шаге задачи.

Для данной постановки принцип оптимальности Беллмана заключается в том, что если в задаче динамического программирования с начальным состоянием w^0 , для некоторой последовательности состояний w^0, w^1, w^2 существует оптимальная стратегия u^1, u^2, u^3 , то оптимальной стратегией для тех же критерия-функции и конечного состояния w^L , но с начальным состоянием w^1 , будет u^2, u^3, u^4 . Если выразить значение $\min(x_0^L(X))$ через $S^L(X)$, то принцип оптимальности Беллмана выражается как рекуррентное соотношение (где минимум функции определяется с учетом задаваемых ограничений) [2]:

$$\begin{cases} S^L(X) = \min_{u^1} \{f_0(X, u^1) + S^{L-1} f(X, u^1)\} (L = 2, 3, 4, 5, \dots); \\ S^1(X) = \min_{u^1} (f_0(X, u^1)). \end{cases} \quad (10)$$

Численное решение приведенного уравнения с неизвестными функциями $SL(X)$ заключается в шаговой конструкции класса оптимальных стратегий для некоторого класса начальных состояний. Ожидаемая оптимальная стратегия «погружена» в этом классе [4].

Рекуррентное соотношение (10) позволяет при расчетах задать оптимальную стратегию управления электропотреблением объектов техноценоза, заключающуюся в том, что управляющее воздействие, направленное на уменьшение значений электропотребления, для каждого отдельного объекта на всех временных интервалах должно быть поставлено в определенную зависимость от потенциала энергосбережения этого объекта. Численным показателем потенциала энергосбережения объекта является его относительный дифлекс-параметр, т.е. относительная разница между фактически зафиксированным электропотреблением на рассматриваемом временном интервале и нижней границей доверительного интервала в точке аппроксимационной кривой, соответствующей целочисленному рангу объекта. Из этого следует, что в общем случае оптимальное управляющее

воздействие на объект техноценоза достаточно полно описывается следующим выражением:

$$w_k^{t+1} = K_k^t w_k^t, \quad (11)$$

где w_k^t — состояние k -го объекта на t -м интервале; K_k^t — коэффициент нормирования для объекта.

Решение уравнения для простейшего класса оптимальных стратегий управления в отношении объектов техноценоза может быть представлено в следующем виде:

$$K_k^t = f_k^t \left(\frac{w_k^t - (W^t(r_k) - W^*(r_k))}{W^t(r_k) - W^*(r_k)} \right), \quad (12)$$

где $f_k^t(w_k^t, u^{t+1})$ — функция от значения первого объекта; $W^t(r_k)$ — значение электропотребления объекта, занимающего k -й ранг в распределении, на аппроксимационной кривой; $W^*(r_k)$ — значение электропотребления объекта, занимающего k -й ранг в распределении, на нижней границе доверительного интервала.

Оптимальное в конкретных условиях и на указанном временном интервале управляющее воздействие для отдельного объекта техноценоза, полученное по выражению (11), следует рассматривать как индивидуальную интеллектуальную норму, рассчитанную с учетом статистических особенностей объекта в составе электротехнического комплекса на конкретном временном этапе.

Применение указанной нормы совокупно с иными предъявляемыми остальным объектам нормами, позволит с наибольшей вероятностью в требуемый срок привести электротехнический комплекс в целевое состояние, в котором управление электропотреблением позволяет достичь максимально возможной эффективности расходования электроэнергии, уменьшая при этом затраты на обеспечение процесса управления. Предполагается использование описанного подхода в рамках построения цифровой платформы энергоэффективности электротехнического комплекса.

Литература

1. **Гнятюк В.И., Кивчун О.Р., Морозов Д.Г.** Реализация процедуры режимного нормирования для подсистем регионального электроэнергетического комплекса // Фёдоровские чтения — 2021: LI международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2021.

2. **Гнатюк В.И., Луценко Д.В.** Потенциал энергосбережения регионального электротехнического комплекса: Экономические проблемы энергетического комплекса. М.: Изд-во ИПП РАН, 2013. 107 с.
3. **Луценко Д.В.** Комбинаторная теория ранговой динамики. Электронные текстовые данные. Калининград, КИЦ «Техноценоз», 2018. <http://gnatukvi.ru/ktrd.pdf>.
4. **Гнатюк В.И.** Критерий оценки качества электропотребления техноценоза. Новые перспективы рангового анализа. Калининград, 2019. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/index.files/giperkache.pdf>.
5. **Гнатюк В.И.** Цифровой двойник техноценоза по электропотреблению, Калининград, 2020. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/index.files/cifrodvoyin.pdf>.

*В.И. Гнатюк, mail@gnatukvi.ru, КГТУ, г. Калининград,
О.Р. Кивчун, Oleg_kivchun@mail.ru, БФУ им. И.Канта, г. Калининград,
Д.В. Луценко, lutsenko@bk.ru, «Техноценоз»,
М.С. Жукова, melikh82@mail.ru, «Техноценоз», г. Калининград*

ПОСТРОЕНИЕ ГИПЕРПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ВИДЕ ТРЕХМЕРНОГО ГРАФИКА

В ранее проведенных исследованиях [1—5] выявлена необходимость параметрического развертывания слоя данных по электропотреблению, полученного из OLAP-куба, в дифлекс-куб. Это способ подготовки всех данных, необходимых для полноценного внедрения цифровой платформы энергоэффективности в процесс управления электропотреблением.

Кубы данных, полученные в процессе параметрического развертывания, называются гиперпараметрами. Гиперпараметр, с точки зрения математики, рассматривается как ранговая гиперпараметрическая поверхность техноценоза — функция двух переменных, определенная в трехмерном ранговом параметрическом пространстве, где множество значений одного параметра соответствует множеству значений другого параметра и ранговой топологической меры. Данные из разных слоев OLAP-куба (в соответствии с задачами) используются в качестве аргументов гиперпараметра [1].

Гиперпараметрическое развертывание данных проводили на примере Калининградской области. При этом в качестве объектов рассматривали опорные подстанции уровня 110 кВ комплекса региональной транспортной сети. На основе ежемесячных данных о потреблении энергии подстанциями РТСК за период 2008—2019 гг. был рассчитан дифлекс-параметр [1].

Дифлекс-параметр был рассмотрен не случайно, ведь именно этот параметр позволяет нам оценивать показатели качества в процессе управ-

ления электропотреблением, что играет ключевую роль для работы с СЭТ-системами (социально-экономико-технические системы).

В исследованиях, связанных с СЭТ-системами, существует достаточно большое количество определений. Гнатюк В.И. определяет СЭТ-систему как «...социально-экономическую систему; организационно-техническую систему; технико-экономическую систему. Иными словами: это ограниченная в пространстве и времени, взаимосвязанная и взаимодействующая через слабые связи совокупность технических объектов (пространственных и технологических групп, человеко-машинных комплексов, зданий и сооружений, технических изделий, средств и персонала), социальных и экономических субъектов (лиц, выполняющих функции распределения и потребления материальных и нематериальных ресурсов, производства, распределения, обмена и потребления товаров и услуг), а также финансов (финансовых средств, финансовых ресурсов и инструментов). Взаимосвязь данной системы определяется единством цели, достигаемой с помощью общих систем управления и поддержки. Целью эксплуатации данной системы является получение максимального положительного результата при минимальных затратах на комплексную поддержку» [2]. Такое определение представляется наиболее актуальным в настоящее время. На нем базируются также понятия цифровизации и цифрового двойника. Вообще, применение подходов, связанных с цифровизацией и цифровым двойником, в управлении СЭТ-системой объясняется необходимостью автоматически осуществлять сложнейшие расчеты в режиме реального времени.

Построение гиперпараметрической поверхности с применением расчетно-графического модуля для визуализации в виде трехмерного графика является необходимым инструментом для работы с СЭТ-системами. Такой анализ позволяет представлять данные в трехмерном пространстве и используется для перекодировки последовательностей значений некоторых переменных в графический вид.

Рассмотрим технологию построения гиперпараметрической поверхности в виде трехмерного графика, при этом технология включает в себя следующие этапы:

- 1) импорт данных по электропотреблению;
- 2) сортировку данных;
- 3) определение границ доверительного интервала и области допустимых значений;
- 4) аппроксимацию значений;
- 5) непосредственное построение гиперпараметрической поверхности в виде трехмерного графика и его анализ.

Первый этап необходим для загрузки данных непосредственно в расчетно-графический модуль. Для этого необходимо предварительно подготовить таблицу с данными (рис. 1).

	1	2	3	4	5	6
1	$6.603 \cdot 10^7$	$6.142 \cdot 10^7$	$6.332 \cdot 10^7$	$6.266 \cdot 10^7$	$5.991 \cdot 10^7$	$7.989 \cdot 10^7$
2	$3.746 \cdot 10^7$	$3.775 \cdot 10^7$	$8.712 \cdot 10^7$	$8.933 \cdot 10^7$	$6.582 \cdot 10^7$	$1.207 \cdot 10^8$
3	$2.005 \cdot 10^7$	$2.403 \cdot 10^7$	$9.332 \cdot 10^7$	$9.157 \cdot 10^7$	$8.957 \cdot 10^7$	$6.94 \cdot 10^7$
4	$2.119 \cdot 10^7$	$2.324 \cdot 10^7$	$2.462 \cdot 10^7$	$2.317 \cdot 10^7$	$2.52 \cdot 10^7$	$1.138 \cdot 10^8$
5	$4.364 \cdot 10^7$	$5.622 \cdot 10^7$	$6.736 \cdot 10^7$	$7.887 \cdot 10^7$	$8.147 \cdot 10^7$	$6.057 \cdot 10^7$
6	$2.152 \cdot 10^7$	$2.204 \cdot 10^7$	$2.385 \cdot 10^7$	$2.53 \cdot 10^7$	$2.55 \cdot 10^7$	$7.687 \cdot 10^7$
7	$4.384 \cdot 10^7$	$5.552 \cdot 10^7$	$8.086 \cdot 10^7$	$8.147 \cdot 10^7$	$8.147 \cdot 10^7$	$3.638 \cdot 10^7$
8	$1.594 \cdot 10^8$	$1.633 \cdot 10^8$	$2.15 \cdot 10^8$	$2.026 \cdot 10^8$	$1.993 \cdot 10^8$	$2.676 \cdot 10^7$
9	$1.615 \cdot 10^8$	$1.628 \cdot 10^8$	$1.945 \cdot 10^8$	$1.876 \cdot 10^8$	$1.848 \cdot 10^8$	$5.12 \cdot 10^7$
10	$1.462 \cdot 10^7$	$1.689 \cdot 10^7$	$2.298 \cdot 10^7$	$2.459 \cdot 10^7$	$3.159 \cdot 10^7$	$2.037 \cdot 10^8$
11	$3.176 \cdot 10^7$	$2.86 \cdot 10^7$	$3.065 \cdot 10^7$	$2.996 \cdot 10^7$	$2.722 \cdot 10^7$	$1.955 \cdot 10^8$
12	$3.412 \cdot 10^7$	$2.902 \cdot 10^7$	$5.781 \cdot 10^7$	$6.141 \cdot 10^7$	$7.071 \cdot 10^7$	$3.486 \cdot 10^7$
13	$1.719 \cdot 10^7$	$2.297 \cdot 10^7$	$2.299 \cdot 10^7$	$2.299 \cdot 10^7$	$2.299 \cdot 10^7$	$3.51 \cdot 10^7$
14	$5.621 \cdot 10^7$	$5.305 \cdot 10^7$	$5.982 \cdot 10^7$	$6.172 \cdot 10^7$	$6.373 \cdot 10^7$	$6.698 \cdot 10^7$
15	$9.242 \cdot 10^7$	$1.021 \cdot 10^8$	$1.09 \cdot 10^8$	$1.093 \cdot 10^8$	$9.225 \cdot 10^7$	$4.267 \cdot 10^7$
16	$5.489 \cdot 10^7$	$5.528 \cdot 10^7$	$6.284 \cdot 10^7$	$6.347 \cdot 10^7$	$6.237 \cdot 10^7$	...

Рис. 1. Фрагмент исходных данных по электропотреблению подстанций

На втором этапе осуществляют сортировку данных в порядке убывания, после чего формируется матрица ранговых параметрических распределений:

$$\text{Zipf}(M) := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1.. \text{cols}(M) \\ W^{(i)} \leftarrow \text{reverse}(\text{sort}(M^{(i)})) \\ W \end{array} \right.$$

$$W := \text{Zipf}(M)$$

$$\text{timeCount} := \text{cols}(W)$$

На третьем этапе необходимо оценить границы области допустимых значений (далее ОДЗ). Для этого применяют программный модуль (представлен на рис. 2). При этом оценку ОДЗ осуществляют в предположении, что в сечении каждого ранга наблюдается нормальный закон распределения [4].

```

Border(W, q) :=
  m ← rows(W)
  n ← cols(W)
  for i ∈ 1..m
    X ← submatrix(W, i, i, 1, n)
    μ ← mean(X)
    σ ← stdev(X)
    Yi ← qnorm(q, μ, σ)
  Y

```

Fact := $W^{\langle \text{cols}(W) \rangle}$ - фактически известный в последнем временном интервале данные по электропотреблению.

W1 := **Border**(W, 0.025) - данные, характеризующие нижнюю границу ОДЗ, соответствующие границе Z1-потенциала

Рис. 2. Определение границ переменного доверительного интервала и области допустимых значений

Четвертый этап предполагает аппроксимацию данных методом наименьших квадратов (рис. 3).

```

МНК(W, R) :=
  n ← rows(W)
  β ←  $\frac{\sum \ln(W) \cdot \sum \ln(R) - n \cdot \ln(R)^T \cdot \ln(W)}{\left(\sum \ln(R)\right)^2 - n \cdot \sum \ln(R)^2}$ 
  W1 ←  $\exp\left[\frac{1}{n} \cdot \left(\sum \ln(W) + \beta \cdot \sum \ln(R)\right)\right]$ 
  stack(W1, β)

```

Рис. 3. Аппроксимация данных методом наименьших квадратов

Ключевым этапом построения гиперпараметрической поверхности являются обработка и представление накопленных данных по результату текущего времени в виде трехмерного графика. Стоит обратить особое внимание именно на этот расчетно-графический модуль. Он включает в себя программный код (рис. 4), который выполняется по алгоритму, представленному на рис. 4.

```

Quest(W, W1, R) := for t ∈ 1..cols(W)
|
|   curW ← reverse(sort(W(t)))
|    $\begin{pmatrix} A \\ \beta \end{pmatrix}$  ← MHK(curW, R)
|   curQ ← matrix[rows(W), 1, f(x, y) ← A · (x + 1)-β]
|   curQ ← curQ · 10-6
|   ΔW ←  $\overrightarrow{|\text{curQ} - W1|}$ 
|   ΔW ← ΔW · 10-6
|   D ← augment(R, curQ, ΔW)
|   Result ← D on error Result ← stack(Result, D)
|
| Result

```

Рис. 4. Фрагмент программного кода построения ранговой гиперпараметрической поверхности

Сначала необходимо извлечь столбец из матрицы W , далее отсортировать в порядке возрастания и выполнить обратную сортировку в порядке убывания. Используя аппроксимацию методом наименьших квадратов, возвращаем первую точку A и ранговый коэффициент β , а также аппроксимационную кривую, при этом доопределяем абстрактную функцию для формирования вектора рангов [3]. Дифлекс-параметр берем по модулю и осуществляем горизонтальную конкатенацию из трех столбцов. Единицы измерения электропотребления в данном случае — млн МВт · ч в год. Далее осуществляют вывод результатов матрицы и накопление данных по результату текущего временного интервала. Выводом результатов матрицы является трехмерный график (рис. 5).

Полученные результаты в виде трехмерного графика необходимо использовать для управления электропотреблением, в частности, для выявления различного рода ошибок и неточностей, аномалий, для контроля динамики показателей электропотребления, для эффективного прогнозирования. Главное преимущество заключается в том, что можно распознать последовательность значений на графике, и во время интерактивного вращения линии графика не перекрывают друг друга. Трехмерный график особенно удобно использовать для изучения входных данных в матричном виде.

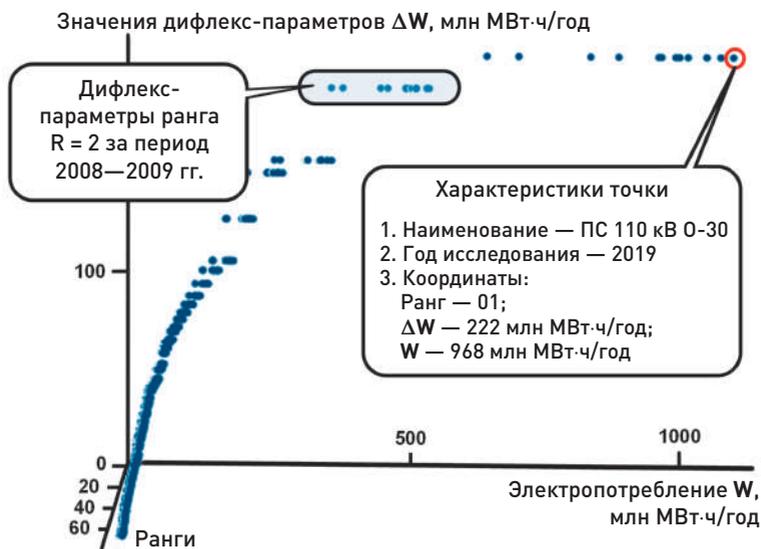


Рис. 5. Трехмерный график ранговой гиперпараметрической поверхности

Полученный график будет полезен при управлении в заданной СЭТ-системе. Для лиц, принимающих решения, которые могут иметь разновекторную направленность, важно опираться на реальные результаты. Графическое представление в виде трехмерного графика является подтверждением для лица, принимающего решения.

Литература

1. **Гнатюк В.И., Кивчун О.Р., Жукова М.С.** Гиперпараметрическое разворачивание данных по электропотреблению // Фёдоровские чтения — 2021: LI международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2021. С. 3—15.
2. **Гнатюк В.И.** Цифровой двойник техноценоза по электропотреблению. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/index.files/cifrodvoyin.pdf>.
3. **Гнатюк В.И.** Техника, техносфера, энергосбережение [Сайт]. Режим доступа: <http://www.gnatukvi.ru>.
4. **Луценко Д.В.** Комбинаторная теория ранговой динамики. 2018. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/ktrd.pdf>.
5. **Кивчун О.Р.** Векторный ранговый анализ [Трактат]. 2019. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/vran.pdf>.

*М.Г. Баширов, eapp@yandex.ru,
И.Г. Юсупова, ilvina011@mail.ru,
Э.М. Баширова, bashirova-elmira@yandex.ru,
ИНН УГНТУ, г. Салават*

ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Основным направлением модернизации электроэнергетических комплексов промышленно развитых стран в начале XXI века явилось применение концепции SMART GRID (умные сети электроснабжения), основанной на использовании интеллектуальных информационных и коммуникационных сетей и технологий для сбора информации о производстве и потреблении электроэнергии, позволяющей повышать эффективность, надежность, экономическую выгоду, а также устойчивость производства и распределения электроэнергии [1]. Для успешной реализации своих функций интеллектуальная система управления энергетическим комплексом должна иметь в своем составе интеллектуальную подсистему дистанционного диагностического мониторинга технического состояния оборудования. Если для электроэнергетического и электротехнического оборудования (генераторов, трансформаторов, линий электропередачи, электродвигателей) эта задача может быть успешно решена на основе использования существующих технологий дистанционной диагностики [2—5], то для дистанционной диагностики теплоэнергетического оборудования (котлов, трубопроводов, турбин), для которого характерны дефекты, обусловленные развитием деградационных процессов в металле, такие технологии в настоящее время отсутствуют [2—5, 12].

Деградационные процессы развиваются из-за старения (изменения структуры, химического состава и конструкционных свойств) материалов при длительной эксплуатации, а также под действием статических и циклических нагрузок, обусловленных перепадами давлений, вибрацией, термическими и механическими напряжениями. Процесс деградации конструкционных свойств металла оборудования начинается в зонах локальных концентраций механических напряжений, в которых и зарождаются дефекты. Для оценки значений механических напряжений в зонах их концентрации в настоящее время в основном используют расчетные модели напряженно-деформированного состояния оборудования, которые обладают невысокой достоверностью, так как не учитывают многие влияющие факторы, возникающие в процессе эксплуатации оборудования [6—8].

Перспективным для реализации интеллектуальных систем дистанционного диагностического мониторинга теплоэнергетического оборудования является использование электромагнитно-акустического (ЭМА) преобразования. Оно позволяет реализовать средства для бесконтактного контроля как неподвижных объектов, так и движущихся поступательно или вращательно без ограничений по скорости, а также для дистанционного бесконтактного контроля методом сканирования акустическими волнами крупногабаритных и протяженных объектов с температурой поверхности до 1200 °С [9—14]. Взаимное преобразование и взаимосвязанное изменение параметров электромагнитных и акустических волн в металлах происходит вследствие проявления нескольких физических явлений — магнитострикции, эффекта Лоренца и магнитного взаимодействия.

Принцип действия ЭМА-преобразователя представлен на рис. 1 [12]. Преобразователь состоит из постоянного магнита и проводника с переменным током. Переменный ток I протекает через проводник и создает переменное магнитное поле B , которое проникает в объекте контроля и возбуждает в нем вихревые токи. Постоянный магнит создает нормально направленное по отношению к поверхности объекта контроля постоянное магнитное поле. На заряженные частицы,двигающиеся в магнитном поле, действует сила Лоренца F , которая направлена вдоль поверхности объекта контроля и способствует некоторому механическому смещению области с вихревым током, что является началом формирования акустической волны. Акустическая волна отражается от противоположной поверхности объекта контроля, местных неоднородностей структуры и дефектов металла и возвращается к ЭМА-преобразователю, в магнитном поле которого акустическая волна преобразуется в электромагнитную волну, которая на-

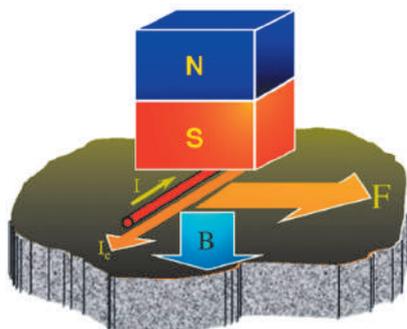


Рис. 1. Принцип действия ЭМА-преобразователя

водит в измерительной обмотке ЭМА-преобразователя электрический сигнал с определенными параметрами.

Идея бесконтактного генерирования в объекте контроля продольных, поперечных и поверхностных акустических волн с различной поляризацией без использования контактных жидкостей, возможность бесконтактного получения информации о поврежденности электропроводящих материалов, отсутствие необходимости в тщательной подготовке поверхности изделия к проведению контроля вызвали и до сих пор вызывают большой интерес у исследователей в области неразрушающего контроля и диагностики как в нашей стране, так и за рубежом [6—12]. Основы теории бесконтактного генерирования с помощью ЭМА-преобразования в объекте контроля акустических волн и бесконтактного считывания информации о состоянии и свойствах его материала разработал еще в 60—70-х годах XX в. профессор Ю.М. Шкарлет [13]. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований были созданы ЭМА-структуроскопы, измерители механических напряжений, дефектоскопы, толщиномеры, которые могут работать с рабочим зазором до 10 мм и пригодны для практического применения в производственных условиях.

Однако несмотря на достигнутые результаты в области создания ЭМА средств неразрушающего контроля и диагностики, приходится констатировать, что по своим основным техническим и метрологическим характеристикам они уступают аналогичным показателям ультразвуковых средств контроля с традиционными контактными пьезоэлектрическими преобразователями. Причиной этого является то, что в современных ЭМА средствах неразрушающего контроля и диагностики в условиях низкой эффективности двойного взаимного преобразования электромагнитных и акустических волн используют те же традиционные информативные параметры акустической волны, что и в ультразвуковых средствах контроля с контактными пьезоэлектрическими преобразователями — амплитуда, фаза, время, скорость и разница скоростей распространения продольных и поперечных волн [12]. При этом практически не используют информативные параметры электромагнитной составляющей ЭМА преобразования, т.е. его информативный потенциал используется не в полной мере. Для кардинального решения этой проблемы необходимы принципиально новые подходы к выделению и обработке комплекса информативных параметров ЭМА преобразования.

С целью качественного анализа возможности использования дополнительных информативных параметров воспользуемся интегральными

волновыми уравнениями, описывающими распространение акустических волн, генерируемых при ЭМА преобразовании, в средах с различными показателями упругости и плотности, полученными в работе Буденкова Г.А. и Недзвецкой О.В. [14]. Эти уравнения не могут быть выражены в элементарных функциях, так как невозможно выстроить цепочку аналитических взаимосвязанных выражений, описывающих весь процесс от возбуждения акустической волны в изделии до формирования информативных параметров ЭМА сигнала. Поэтому задача синтеза его диагностических параметров, несущих информацию о напряженно-деформированном состоянии и поврежденности металла оборудования, решается применением метода декомпозиции, объединением результатов аналитических и численных исследований.

Исходной системой уравнений для анализа ЭМА преобразования в металлах и окружающем пространстве является система уравнений Максвелла. Акустическая волна в металле, генерируемая переменным электромагнитным полем, представляет собой комбинацию продольной и поперечной волн. Для упрощения задачи анализа взаимосвязанного изменения параметров электромагнитных и акустических волн в частных случаях рассматривают продольную и поперечную волны по отдельности.

Решением задач теории электромагнитных и акустических волн применительно к задачам диагностики энергетического оборудования является определение изменения в пространстве и времени параметров волновых процессов, характеризующих напряженно-деформированное состояние и поврежденность структуры металла. Эту задачу решают в два этапа: на первом используют исходную систему уравнений, описывающих волновое поле в среде: на втором, применяя ряд упрощений и задавая начальные и граничные условия, определяемые конкретной постановкой задачи, получают искомое волновое уравнение.

Приближенные решения волнового уравнения в виде интеграла для смещений в продольных волнах (U_l) и для смещений в поперечных (U_t) волнах имеют вид [14]

$$U_l = \frac{F_0 \Delta V}{8\pi\mu k_t^2 \cos\theta} \int_{-\infty}^{\infty} k q e^{-q(z-h)} H_0^{(1)}(k\rho) dk,$$

$$U_t = \frac{F_0 \Delta V}{8\pi\mu k_t^2 \sin\theta} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{k^3}{s} q e^{-s(z-h)} H_0^{(1)}(k\rho) dk,$$

где F_0 — объемная плотность сторонней силы, $H/\text{м}^3$; ΔV — малый объем, в котором сосредоточена сторонняя сила, м^3 ; k_l и k_t — продольное и поперечное волновые числа, м^{-1} ; θ — угол наблюдения, рад; z — продольная цилиндрическая координата, м; h — расстояние до малого объема от начала координат, м; k — переменная интегрирования; $q = \sqrt{k^2 - k_t^2}$ и $s = \sqrt{k^2 - k_l^2}$ — параметры преобразования; $H_0^{(1)}(k\rho)$ — функция Ганкеля нулевого рода первого порядка.

Локальные изменения значений коэффициентов Ламе λ , μ и плотности среды ρ отражают наличие неоднородностей, обусловленных напряженно-деформированным состоянием и поврежденностью структуры металла. В теории волн локальные неоднородности среды рассматривают как вторичные источники излучения акустических волн с параметрами, зависящими от параметров этих источников, т.е. локальные неоднородности среды являются источниками гармонических составляющих акустического поля, информативные параметры которых определяют характер и размеры этих неоднородностей. В результате к ЭМА-преобразователю возвращается спектр пространственных и временных гармоник акустического поля, несущий информацию о состоянии контролируемой среды. В магнитном поле ЭМА-преобразователя гармоники акустического поля преобразуются в пространственные и временные гармоники электромагнитного поля, которые в свою очередь генерируют в измерительной обмотке ЭМА-преобразователя электрический сигнал, состоящий из спектра гармоник с определенными параметрами.

Как показывают результаты исследований, приведенные в работах [15, 16], по мере увеличения механических напряжений и накопления повреждений на уровне структуры металла происходит сложное взаимосвязанное изменение целого комплекса его механических, электрических, магнитных и акустических свойств. Уже на первом этапе ЭМА преобразования (преобразования электромагнитного поля в акустическое) помимо акустических волн генерируются еще вторичные временные и пространственные гармоники электромагнитного поля, параметры которых несут дополнительную информацию об электрических и магнитных свойствах металла, изменяющихся при изменении механических напряжений и дефектности структуры. Таким образом, все изменения акустических, магнитных и электрических свойств металла, вызванные механическими напряжениями и поврежденностью структуры, отражаются в параметрах временных и пространственных гармоник вторичного элек-

ромагнитного поля, которые, в свою очередь, преобразуются в параметры гармонических составляющих выходного сигнала ЭМА-преобразователя. Обратная задача (идентификация напряженно-деформированного состояния и уровня поврежденности структуры металла оборудования по значениям параметров гармонических составляющих сигнала ЭМА-преобразователя) может быть решена применением метода спектрального анализа, широко используемого в различных методах диагностики оборудования [2, 4, 5, 15, 18].

Для детального исследования отдельных этапов ЭМА преобразования и выделения информативных диагностических параметров проведено численное моделирование с использованием базового программного комплекса Comsol Multiphysics 6-й версии с модулями расширения (бессрочная академическая лицензия № 9602348). Программный пакет позволяет объединять несколько моделей в одну для реализации мультифизического моделирования (одновременного использования в расчетах нескольких физических законов и уравнений связи между ними).

С целью подтверждения выводов, сделанных по результатам анализа теоретических сведений и численного трехмерного моделирования ЭМА преобразования, выполнены экспериментальные исследования с использованием методики и исследовательской установки, описанных в работах [9, 15, 16]. При проведении исследований генерирование акустических сигналов, регистрацию пространственных и временных гармоник вторичного электромагнитного поля, фильтрацию и временную развертку сигнала ЭМА-преобразователя осуществляли электронными блоками электромагнитно-акустического толщиномера EM4000 компании ООО «НПО «Октанта» с использованием программного обеспечения ScanView [12]. Для спектрального анализа предварительно подготовленного сигнала ЭМА-преобразователя использовали специально разработанную компьютерную программу [17]. С помощью микровизора Mvizo MET-221 осуществляли регистрацию изменений в структуре металла в процессе испытаний образцов металла. На рисунке 2 приведена диаграмма нагружения образца из стали марки 10 при квазистатических испытаниях на растяжение [18].

Результаты экспериментальных исследований подтверждают, что с увеличением нагрузки, прикладываемой к испытываемому образцу металла, в его структуре зарождаются и развиваются локальные неоднородности структуры, которые являются источниками гармонических составляющих акустического поля, информативные параметры которых определяются характером и размерами этих неоднородностей.

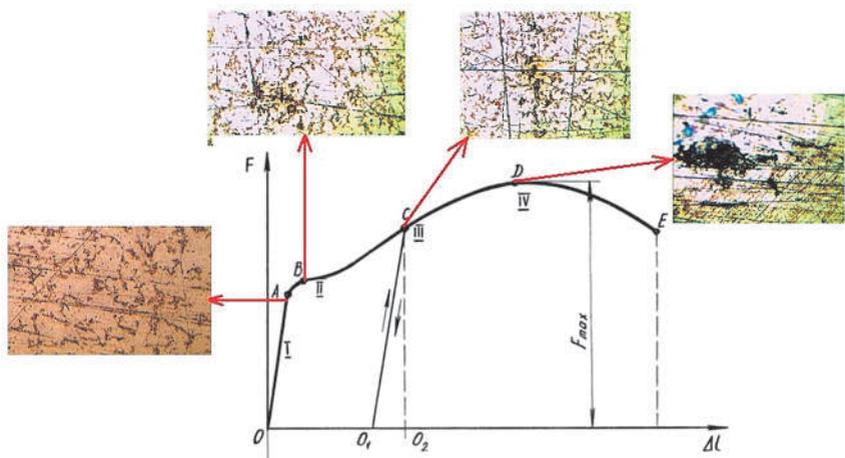


Рис. 2. Диаграмма нагружения и изменения в структуре стали марки 10 при квазистатических испытаниях на растяжение: *A* — структура металла в точке «Предел пропорциональности»; *B* — изменения в структуре на участке «Площадка текучести»; *C* — накопление повреждений в структуре на участке «Стадия самоупрочнения»; *D* — образование локальных неоднородностей структуры на участке «Образование шейки»; *E* — разрыв образца

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22-29-00327 — «Исследование взаимосвязанных изменений механических, электрофизических и акустических свойств металлов для реализации интеллектуальной электромагнитно-акустической системы идентификации напряженно-деформированного состояния и поврежденности нефтегазового оборудования».

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. 66 с.
2. **Баширов М.Г., Баширова Э.М., Хуснутдинова И.Г.** Электромагнитный спектральный метод диагностики турбогенераторов тепловых электростанций // Промышленная энергетика. 2021. № 1. С. 20—26.
3. **Хроматографический** метод оценки технического состояния силовых масляных трансформаторов / Л.М. Салиева, И.Г. Зайнакова, И.Г. Хуснутдинова и др. // Экологические системы и приборы. 2015. № 12. С. 35—41.
4. **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.

5. **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.
6. **Alers R.B., Boyle J.J., Alers G.A.** Quantitative measurement of material degradation with scanning EMATs // 16th World Conference on NDT, Canada, 2004.
7. **Allen D.R., Sayers C.M.** The measurement of residual stress in textured steel using an ultrasonic velocity combinations technique // *Ultrasonic*. 1984. V. 22. No 4. P. 179—188.
8. **Khusnutdinova I.G., Bashirov M.G.** The use of electromagnetic-acoustic method for estimating the stress-strain state of the metallic elements of power equipment // *Key Engineering Materials*. 2017. V. 743. P. 463—467.
9. **Электромагнитно-акустический** метод оценки технического состояния энергетического оборудования / М.Г. Баширов, И.Г. Хуснутдинова, Л.Г. Хуснутдинова, Д.Р. Усманов // *Промышленная энергетика*. 2016. № 12. С. 8—3.
10. **Adhesive** debonding inspection with a small EMAT in resonant mode / T. Liu, C. Pei, X. Cheng et al. // *NDT & E International*. 2018. V. 98. P. 110—116.
11. **Моделирование** магнитных, электрических и акустических полей проходного преобразователя для контроля цилиндрических объектов / К.В. Петров, О.В. Муравьева, Ю.В. Мышкин, А.Ф. Башарова // *Дефектоскопия*. 2019. № 2. С. 16—24.
12. **Баширов М.Г., Баширова Э.М., Юсупова И.Г.** Исследование способов повышения эффективности электромагнитно-акустического преобразования средств диагностики энергетического оборудования // *Промышленная энергетика*. 2022. № 10.
13. **Шкарлет Ю.М.** Бесконтактные методы ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1974. 56 с.
14. **Буденков Г.А., Недзвецкая О.В.** Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики. М.: Изд-во физ.-мат. лит.-ры, 2004. 136 с.
15. **Баширов М.Г.** Обеспечение безопасности эксплуатации и оценка ресурса оборудования для переработки нефти электромагнитными методами диагностики: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.03. Уфа: УГНТУ, 2002. 364 с.
16. **Хуснутдинова И.Г.** Разработка метода оценки ресурса безопасной эксплуатации технологических трубопроводов на основе электромагнитно-акустического эффекта: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03. Уфа: УГНТУ, 2019. 159 с.
17. **Оценка** напряженно-деформированного состояния и поврежденности металлических конструкций электромагнитно-акустическим методом / М.Г. Баширов, Э.М. Баширова, Р.А. Баширов, И.Г. Хуснутдинова / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018617490.
18. **Баширов М.Г., Баширова Э.М., Хуснутдинова И.Г.** Электромагнитный спектральный метод диагностики генераторов электростанций // *Фёдоровские чтения — 2020: I международная научно-практическая конференция с элементами научной школы*. М.: Издательский дом МЭИ, 2020.

С.А. Погодина, info@tcn-nn.ru,
О.В. Крюков, o.v.kryukov@mail.ru,
ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород,
И.В. Гуляев, ivgulyaev@mail.ru,
ФГБОУ ВО «НИ МГУ им. Н.П. Огарева», г. Саранск

НЕЙРОННЫЕ СЕТИ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Одним из наиболее эффективных методов мониторинга и прогнозирования технического состояния электроэнергетических установок (рис. 1) [1—4] и электромеханических систем с мегаваттными машинами [5—8], таких, например, как электроприводные газоперекачивающие агрегаты (ЭГПА), является хорошо апробированный математический аппарат диагностических алгоритмов на основе *искусственных нейронных сетей* (ИНС), объединенных в систему принятия решений (СПР) по идентификации различных дефектов [9—12].



Рис. 1. Процесс мониторинга комплектного распределительного устройства типа КРУ «Каскад»

Особенностью ИНС является то, что они обладают характеристиками, позволяющими автономно решать проблемы классификации переменных объекта и их форм, а также самообучения алгоритмам прогнозирования исходя из опыта отказов [13—16]. ИНС позволяет разработать непараметрическую модель, которая может воспроизвести любое исправное/неисправное техническое состояние (ТС) ЭГПА и аппроксимировать свою идентификацию [17—20].

Такая модель способна запоминать примеры событий, распределяя на их основании веса соединений структуры, вплоть до устранения нейронов, или соединений, которые не влияют на запоминание этих примеров.

Архитектура встроенных систем мониторинга и прогнозирования (ВСМП) ТС ЭГПА на ИНС представляет собой две подсистемы [21—23]:

— подсистему приема и обработки информации, которая соответствует ВСМП работы СТД-12500-2 ЭГПА с приемом данных по ТС приводного высоковольтного синхронного двигателя (ПВСД) и их последующую обработку (распределение данных и оценку переменных);

— подсистему интерпретации полученной информации о ТС с использованием алгоритмов ИНС с распознаванием неисправностей и рекомендациями по реализации дальнейших ее действий.

Порядок построения ИНС ПВСД. Применение при прогнозировании ТС большого числа контролируемых переменных ПВСД (напряжений, токов, частичных разрядов и температуры обмоток статора) позволяет увеличить достоверность мониторинга. Для реализации модуля ИНС сначала определяют его размеры или число входов и выходов (целесообразно эти значения выбрать равными 3 и 1).

Затем архитектура сети формируется исходя из алгоритма обучения и минимизации среднеквадратической ошибки результатов мониторинга и перспектив прогнозирования ТС с определением остаточного ресурса.

Прежде чем встраивать блок ИНС в подсистему интерпретации информации в структуре ВСМП, необходимо изучить функционирование трех ИНС со входами различной архитектуры. В результате ВСМП ТС ПВСД на основе объемного параметрического исследования трех ИНС необходимо принять следующие четыре решения.

1. Окончательный выбор диагностируемых переменных. Наиболее информативными переменными, характеризующими ТС изоляции обмотки статора СТД-12500-2, являются температура меди, интенсивность частичных разрядов (ЧР) и уровень перенапряжений питающей сети. Это обусловлено тем, что именно эти параметры могут адекватно оценить ТС и заранее спрогнозировать наступление нештатных режимов. К тому же эти переменные доступны прямому измерению штатными техническими средствами и непосредственному их представлению в нейронной базе знаний (НБЗ). В публикациях [24, 25] представлены результаты замеров данных эксплуатационных факторов и общая статистика наблюдений за период 1985—2019 гг. с фиксацией 62 случаев выхода из строя СТД-12500-2.

2. Создание конструкции НБЗ. Для создания на основе ИНС модели, описывающей исправное и неисправное состояние статорной обмотки ПВСД ЭГПА, необходимо создать такую оптимальную конструкцию НБЗ,

в которой содержалась бы достаточная информация о возможных дефектах, возникающих в различных режимах работы. Для этого на основе анализа существующей статистики неисправностей (и симуляции возможных нарушений) машины СТД-12500-2 все они группируются в 12 видов (включая исправные состояния), и по каждому состоянию оценивают текущие изменения трех выбранных ранее входных переменных в течение всего периода измерений. В итоге НБЗ каждой переменной составила 3000 различных значений (векторов), характеризующих возможные режимы работы двигателя. Это значение, соответствующее количеству замеров, необходимо ввести в конструкцию ИНС.

3. *Создание блока ИНС.* Определившиеся нейронные сети являются многоуровневыми с оптимальным алгоритмом своего обучения. Для встраивания блока ИНС в ВСМП ПВСД предлагается исследовать три нейронные сети (рис. 2). После фазы их тестирования и сравнения между собой можно выбирать наиболее подходящую для решения всего комплекса задач прогнозирования ИНС.

4. *Определение тестов селекционированных сетей.* При числе используемых входов блока ИНС, равном десяти (на рис. 2 $p = 10$) для каждой контролируемой переменной в табл. 1 приведены полученные результаты тестирования.

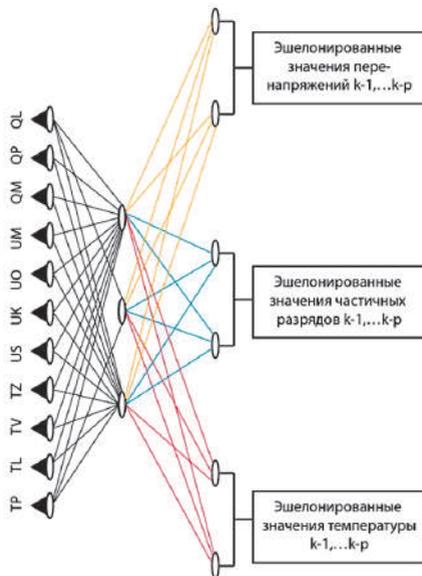


Рис. 2. Структура третьей ИНС

Для трех сетей этап селекционирования выполняют после того, как вторая сеть завершит свое тестирование после 148 презентаций каждого примера. При этом тестирование выполняют в два этапа: на первом сеть делает 100 повторяющихся исследований для каждого примера неисправного состояния, на втором — их вновь вводят в программу тестирования, которая прекращается после 48 итераций со среднеквадратичной ошибкой результатов тестирования, равной $3,7 \cdot 10^{-16}$.

Т а б л и ц а 1

Результаты тестирования трех ИНС

№ ИНС	Число нейронов			
	Входной слой	Внутренний слой	Выходной слой	Среднеквадратичная ошибка
1	10	13	11	$3,24221 \cdot 10^{-15}$
2	20	8	11	$3,71314 \cdot 10^{-16}$
3	30	6	11	$3,26580 \cdot 10^{-17}$

Тесты сетей нейронов. После построения трех сетей нейронов и достижения желаемых точностных показателей при их обучении, важнейшим этапом становится их комплексное сопоставление между собой. При этом сравнение проводят путем тестирования входов и выходов каждой ИНС. Эта процедура связана с фазой обучения и определением базы тестов, с помощью которых приступают к тестированию способности ИНС распознавать «скрытые» дефекты, ранее не рассматриваемые при оценке работоспособности ЭГПА, и оценки способности ИНС к обобщению результатов.

Так, ВСМП технического состояния ПВСД типа СТД-12500-2 предусматривал выбор из трех ИНС наилучшей сети путем тестирования их для ранее приведенных дефектов. Он позволил идентифицировать их с большой точностью, что подтверждается значениями среднеквадратичных ошибок результатов мониторинга, близких к нулю (см. табл. 1).

При тестировании третьей сети для дефектов СТД-125000-2, которые были изучены на фазе обучения сети, результаты ее моделирования для неисправностей, связанных с перегревом в пазовой части расточки, представлены в табл. 2.

Согласно анализу результатов, полученных на фазе теста всех трех ИНС, выявлено, что третья сеть нейронов (см. табл. 1 и 2) наиболее производительна и, следовательно, именно она целесообразна для применения в ВСМП ЭГПА. Что же касается выходов третьей сети, которые близки к желаемому значению, они должны быть приближены к «0» или к «1»,

чтобы обеспечить достоверность идентификации неисправности в изоляции статора ПВСД с указанием первопричины и места его появления. Обоснование объективных рекомендаций для устранения подобных неисправностей является главным результатом работы ВСМП с ИНС.

Таблица 2

Результаты тестирования третьей ИНС

Выходы ИНС	Нагрузка, % номинала					
	90	80	60	40	20	10
1	1,0000	1,0000	1,0000	0,8570	1,0000	0,9605
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0005
3	0,0000	0,0000	0,0002	0,0000	0,0000	0,0034
4	0,0049	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0057	0,0000	0,0000
8	0,2310	0,0000	0,0067	0,0000	0,0000	0,0000
9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Сопоставление результатов прогнозирования ЭГПА. Рассмотрим временной ряд, описывающий суточные колебания температуры статора (рис. 3) и проведем анализ эффективности инерционных прогностических методов.

Для этого известный временной ряд, описывающий изменение температуры, разобьем на две части по «границе неопределенности», первая из которых (левая) будет являться основанием прогноза, а вторая (правая) — использоваться для апостериорной оценки точности.

Применение методов на основе ARMA-моделей (в частности, метода Бокса—Дженкинса) возможно, так как числовой ряд разностей первого порядка температурного временного ряда является стационарным. Из графика видно, что методы на основе моделей Бокса—Дженкинса дают очень оптимистичный прогноз с возрастающим трендом (см. рис. 3, б). На основе полученных данных нельзя достоверно определить момент выхода значений температуры за допустимые пределы. Значение средней относительной ошибки прогноза составило 23—58 % ($\bar{\Delta} = 0,23—0,58$).

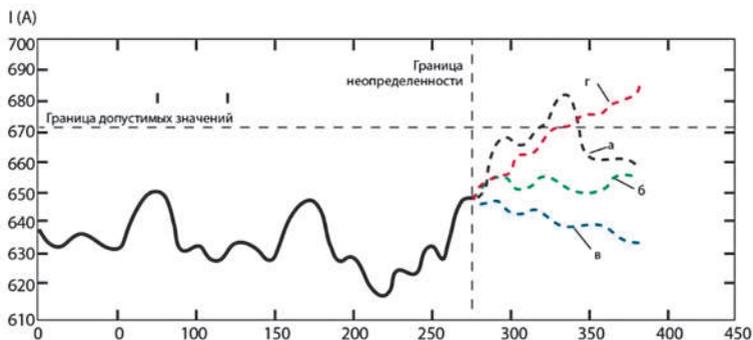


Рис. 3. Прогнозирование тока статора электродвигателя СТД-12500-2:

a — фактический временной ряд; *б* — прогноз с использованием ИНС (Ворда); *в* — прогноз с использованием модели Бокса—Дженкинса; *г* — прогноз с использованием метода временных рядов

Для проверки эффективности использовали и метод на основе искусственных нейронных сетей (сеть Ворда, на входы которой подавали предыдущие значения временного ряда). Выбор именно этого типа ИНС связан с тем, что нейронные сети способны производить классификацию значимости входных значений.

Моделирование показало, что построенная и обученная искусственная нейронная сеть на границе неопределенности температурного временного ряда позволяет определить общую тенденцию повышения температуры, но дает пессимистичный прогноз (см. рис. 3, *в*). На основании полученного прогноза возможно определение общих тенденций развития процесса, но невозможно достоверно определить момент выхода значений температуры статора за пределы допустимых значений. Значение средней относительной ошибки прогноза составило 16—46 % ($\bar{\Delta} = 0,16—0,46$).

Для прогнозирования временного ряда методом на основе АДСС использовали предысторию температурного ряда размером $N = 400$ отсчетов. Полученный многошаговый прогноз позволяет выделить возрастающую тенденцию временного ряда и с точностью определить момент выхода значений температурного ряда за допустимые границы. Значение средней относительной ошибки прогноза составило 8—34 % ($\bar{\Delta} = 0,08—0,34$).

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что использование метода АДСС позволяет делать более точные прогнозы относительно дрейфа температурных параметров статоров электродвигателей СТД-12500-2 по сравнению с широко применяемыми методами на основе ARMA-моделей и ИНС.

Выводы. Разработанная система оценки влияния эксплуатационных факторов ЭГПА на ресурс изоляции статора электродвигателей показала, что все машины СТД-12500 имеют ЧР различной амплитуды и интенсивности, а «on-line» мониторинг ЧР на базе ИНС позволяет адекватно оценивать ТС ЭГПА. Результаты исследований эффективности ВСМП ЭГПА на основе методов нечеткой логики и ИНС параметров СТД-12500 в случае развития постепенных отказов показали, что ИНС дают более точные результаты по сравнению с традиционными методами экстраполяции и позволяют принимать более адекватные и своевременные решения.

Литература

1. **Мониторинг** и прогнозирование технического состояния электромеханических систем энергетики / О.В. Крюков, А.В. Серебряков, Л.А. Макриденко и др. — М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ». 2017.
2. **Ипполитов В.А., Кононенко А.Б., Косоротов А.А.** Мониторинг и новые функциональные возможности распределительных устройств трансформаторных подстанций с НКУ «Каскад» // Контроль. Диагностика. 2021. № 5. С. 32—39.
3. **Диагностика** и прогнозирование технического состояния электротехнических систем энергетики: монография / О.В. Крюков, Н.И. Сычев, М.Н. Сычев и др. Вологда. Инфра-Инженерия, 2021. 184 с.
4. **Косоротов А.А., Крюков О.В., Саушев А.В.** Функциональные возможности мониторинга распределительных устройств цифровых подстанций // Фёдоровские чтения — 2021: LI международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2021. С. 143—151.
5. **Воеков В.Н., Мещеряков В.Н., Крюков О.В.** Вентильный электропривод для погружных нефтяных насосов с импульсным повышающим преобразователем напряжения в звене постоянного тока ПЧ и релейным управлением инвертором напряжения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2020. Т. 20. № 2. С. 110—119.
6. **Крюков О.В., Мещеряков В.Н., Гуляев И.В.** Электроприводы на основе машины двойного питания и асинхронного вентильного каскада с преобразователями в цепях статора и ротора. Саранск, 2020.
7. **Васенин А.Б., Степанов С.Е., Титов В.Г.** Реализация капсулированных электроприводных ГПА на объектах ПАО «Газпром» // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2020. Т. 63. № 1. С. 31—37.
8. **Belousov A.S., Meshcheryakov V.N., Valtchev S.** Development of a control algorithm for three-phase inverter in two-phase electric drives reducing the number of commutations. В сб.: Proceedings — 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. С. 444—449.
9. **Крюков О.В., Саушев А.В.** Методология вейвлет-преобразования при анализе автоматизированных электроприводов // Фёдоровские чтения — 2020:

- Л международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2020. С. 174—178.
10. **Бабичев С.А., Захаров П.А., Крюков О.В.** Мониторинг технического состояния приводных электродвигателей ГПА // Контроль. Диагностика. 2009. № 7. С. 33—39.
 11. **Воробьев С.В., Крюков О.В., Гуляев И.В.** Средства и методы релейной защиты и автоматики для вольтрассовых ЛЭП // Фёдоровские чтения — 2021: LI международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2021. С. 151—159.
 12. **Васенин А.Б., Степанов С.Е., Крюков О.В.** Методология и средства оперативного мониторинга электродвигателей на КС // Контроль. Диагностика. 2019. № 11. С. 52—58.
 13. **Репин Д.Г., Крюков О.В.** Концепты системы мониторинга технического состояния компрессорных станций // Контроль. Диагностика. 2017. № 12. С. 30—35.
 14. **Степанов С.Е., Крюков О.В.** Выбор методов мониторинга и прогнозирования технического состояния автоматизированных электроприводов энергетических объектов // Контроль. Диагностика. 2018. № 11. С. 32—39.
 15. **Крюков О.В.** Особенности энергоснабжения подводных добычных комплексов морских месторождений углеводородов / Фёдоровские чтения — 2019: XLIX международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 357—359.
 16. **Крюков О.В., Степанов С.Е.** Организация диспетчерского управления подстанциями компрессорных цехов с экспертной оценкой проектных решений // Промышленная энергетика. 2021. № 1. С. 27—34.
 17. **Рубцова И.Е., Крюков О.В., Степанов С.Е.** Нейро-нечеткие модели мониторинга синхронных машин большой мощности. В сб.: Мат. 6-й МНТК «Управление и информационные технологии» УИТ-2010. СПб., 2010. С. 160—162.
 18. **Kryukov O.V., Serebryakov A.V.** Energy efficient power supply systems of oil and gas pipelines electric drives // Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering. 2017. V. 17. No 3. С. 102—110.
 19. **Крюков О.В.** Коммуникационная среда передачи данных сети ETHERNET на полевом уровне различных объектов // Автоматизация в промышленности. 2012. № 12. С. 26—30.
 20. **Кононенко А.Б., Косоротов А.А., Крюков О.В.** Расширение функциональных возможностей автоматизации и мониторинга распределительных устройств КТП «Каскад» // Автоматизация и IT в энергетике. 2020. № 12. С. 26—31.
 21. **Крюков О.В., Степанов С.Е., Васенин А.Б.** Поддержка диспетчерских решений ГТС на базе оценки их энергоэффективности // Наука и техника в газовой промышленности. 2019. № 4 (80). С. 71—81.
 22. **Груздев В.В., Волков А.С., Крюков О.В.** Методологический подход к прогнозированию технического состояния трансформаторов распределительных устройств // Автоматизация и IT в энергетике. 2021. № 1 (138). С. 14—19.
 23. **Крюков О.В., Степанов С.Е., Васенин А.Б.** Поддержка диспетчерских решений ГТС на базе оценки их энергоэффективности // Наука и техника в газовой промышленности. 2019. № 4. С. 71—81.

24. **Крюков О.В., Титов В.Г.** Эффективность комплексных испытаний нового энергетического оборудования // Промышленная энергетика. 2021. № 2. С. 17—26.
25. **Крюков О.В., Серебряков А.В.** Экспериментальные исследования безопасности электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Промышленная энергетика. 2016. № 2. С. 24—32.

*А.В. Кандауров, kandaurov_2000@inbox.ru,
Войсковая часть 05776*

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРТНОГО ОПРОСА ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ

В настоящее время аппарат экспертного опроса сформирован, отлажен и представляет собой мощный инструмент для определения решений во вновь создаваемых системах со слабо формализованными взаимосвязями. Одной из таких систем является система электроснабжения группы автономных объектов, характеризующаяся новыми параметрами и режимами функционирования. Поэтому основной сложностью является определение показателей и критериев эффективности для такой вновь формируемой системы, поскольку, как правило, трудно убедить привлекаемых специалистов в их обоснованности, отсутствуют квалифицированные эксперты.

Экспертный опрос применяют для оценки [1]:

- абсолютных величин;
- перечня переменных величин;
- весомости частных вариантов.

В качестве исходных данных для исследования процессов электроснабжения системы автономных объектов (САО) необходимо учитывать как производственные, так и пространственно-временные характеристики, к которым относятся следующие параметры:

- 1) для единичного образца техники:
 - идентификационные параметры (бортовой номер, марка и тип шасси);
 - график функционирования (в целом системы и по техническим подсистемам).
 - работа на месте, моточасы;
 - пробег, км;
- 2) для совокупности нескольких образцов:
 - график функционирования;
 - пространственные характеристики.

В качестве выходных параметров будут учитываться среднестатистические данные о качестве работы образца или группы техники. На основе определенных исходных данных с помощью экспертного опроса необходимо установить взаимосвязь входных и выходных параметров и направления совершенствования электроснабжения САО.

Для проведения исследований была разработана форма (бланк), в которую эксперт вносит свои суждения. Данная форма способствует восприятию и отображению информации (табл. 1). Одним из требований к разрабатываемому бланку (рис. 1, 2) являлась универсальность, поскольку образцы техники САО включают в себя различные типы и комбинации оборудования.

Т а б л и ц а 1

Учет показателей для формирования исходных данных

Показатель	Образец техники	Группа техники
Наличие топлива	+	+
Исправность силовой установки	+	–
Укомплектованность (оборудованием/техникой)	+	+
Наличие и степень заряда носимых АКБ	+	+
Баланс мощности	+	–
Наличие зарядного устройства	+	+
Расход топлива	+	–
Время работы	+	–

Оценка (коэффициент готовности K_T) комплекта САО [2] складывается из вклада в обеспечение функционирования:

- силовой установки базовых шасси (по количеству топлива на потребляемый 1 кВт·ч электроэнергии);
- автономных электроагрегатов и электростанций (по количеству топлива на потребляемый 1 кВт·ч электроэнергии и времени непрерывной работы в часах);
- аккумуляторных батарей (по удельной мощности, зависящей от напряжения и емкости);
- зарядных устройств (по количеству каналов заряда и времени на его осуществление).

Также вводятся весовые коэффициенты, учитывающие это влияние для каждого отдельного образца техники.

Коэффициент K_{Γ} отражает влияние величин ресурсов с учетом их важности в соответствии с режимами функционирования:

$$K_{\Gamma_i} = K_{\text{баланс}} (K_{\text{В}}^T K_{\text{топливо}} + K_{\text{В}}^{\text{ГОМ}} K_{\text{ГОМ}} + K_{\text{В}}^{\text{расх}} K_{\text{расх}} + K_{\text{В}}^{\text{ЗУ}} K_{\text{ЗУ}} + K_{\text{В}}^{\text{АКБ}} K_{\text{АКБ}}); \quad (1)$$

$$K_{\Gamma_{\text{СЭС}_i}} = K_{\text{В}}^T K_{\text{топливо}} + K_{\text{В}}^{\text{УК}} K_{\text{УК}} + K_{\text{В}}^{\text{ЗУ}} K_{\text{ЗУ}} + K_{\text{В}}^{\text{АКБ}} K_{\text{АКБ}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{баланс}}$ — коэффициент, учитывающий баланс мощности; $K_{\text{В}}^T$ — весовой коэффициент топлива; $K_{\text{В}}^{\text{ГОМ}}$ — весовой коэффициент исправности ГОМ (силовой установки); $K_{\text{В}}^{\text{расх}}$ — весовой коэффициент расхода топлива; $K_{\text{В}}^{\text{ЗУ}}$ — весовой коэффициент использования зарядного устройства; $K_{\text{В}}^{\text{АКБ}}$ — весовой коэффициент использования АКБ.

Лист опроса № _____		
Этап: <input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3
Марка техники: _____		ФИО _____
Бортовой номер: _____		Должность _____
Количество расчетных задач: _____		Подразделение _____
1. Работа образца за сутки		2. Перерывы в работе были
Пробег, км = _____	<input type="checkbox"/>	По плану
Работа на месте, моточас = _____	<input type="checkbox"/>	Аварийно, из-за проблем
Заряжено батарей, ед. = _____	<input type="checkbox"/>	электропитания
	<input type="checkbox"/>	со средствами связи
	<input type="checkbox"/>	программного обеспечения

Рис. 1. Лицевая сторона листа опроса

Состав электротехнического комплекта образца техники	Наличие	Оценка работы элементов		
		Достаточно	Недостаточно	Примечание
Генератор отбора мощности				
Зарядное устройство				
Автономный электроагрегат				
АКБ носимые (персонал)				
Общая оценка за комплект				

Рис. 2. Обратная сторона листа опроса

Определение весовых коэффициентов проводится на основании их ранжирования с помощью экспертов (табл. 2). Сравниваются строки со столбцами: 1 ставится, когда важнее показатель в строке, 0 — в столбце, 0,5 — если показатели имеют одинаковый приоритет.

Таблица 2

**Ранжирование показателей оценки работы
электротехнического оборудования**

Показатель оценки	Наличие топлива	Расход топлива	Укомплектованность электро-технических средств	Наличие зарядного устройства и свободных каналов в нем	Степень заряженности носимых аккумуляторных батарей	Степень важности показателя оценки (№ места)
Наличие топлива	X					
Расход топлива		X				
Укомплектованность электро-технических средств			X			
Наличие зарядного устройства и свободных каналов в нем				X		
Степень заряженности носимых аккумуляторных батарей					X	

После автоматизированной обработки материалов в специализированной базе данных формируются предложения по оптимизации системы электроснабжения (СЭС) САО.

Экспертный опрос проводился при опытной эксплуатации групп разнотипной техники, общее количество которой составило 105 единиц. Количество однотипных образцов в группах варьировалось от 2 до 10. Планировалось проводить опрос по итогам каждого дня эксплуатации. Пробная эксплуатация в течение 2 дней выявила, что в силу большой информативности бланка опроса эксперты не успевали его заполнить.

Поэтому форма была переработана и упрощена (см. рис. 1—2), а некоторая статистическая информация подверглась автоматизированной предварительной обработке (табл. 3).

Это позволило получать за 10 дней эксплуатации не только качественную, но и количественную характеристики системы электроснабжения.

Таблица 3

Интенсивность использования основного оборудования (потребители)

В режиме 1					.....	В режиме N				
Состояние 5	Состояние 4	Состояние 3	Состояние 2	Состояние 1	Уровень иерархии	Состояние 5	Состояние 4	Состояние 3	Состояние 2	Состояние 1
					Уровень 1					
					Уровень 2					
					Уровень 3					
					Уровень 4					
					Уровень 5					

Опыт эксплуатации данной системы заставил выделить вопросы перерывов в электроснабжении (см. рис. 1), разделив причины их возникновения. Отсутствие контрольно-измерительной аппаратуры на всей группировке средств обусловило проведение лишь качественной оценки достаточности состава электрооборудования (см. рис. 2). Также была определена градация предпочтений (важности, весомости) составных частей критерия эффективности K_{Γ} (см. табл. 2). Степень интенсивности эксплуатации сложной системы как по образцам, так и по выбранным уровням и группам оценивалась количественно (см. табл. 3).

Бланки опроса должны были, помимо сбора статистической количественной информации, помочь качественно оценить вновь формируемую систему. Фактически требовалось определить: необходимо ли специализированное подразделение для обеспечения нормальной работы или должна быть соответствующая подготовка штатного персонала (что в настоящее время достигается интенсивным двухмесячным обучением специфическим знаниям, навыкам и умениям).

В результате проведенных исследований были сформулированы предложения по эксплуатации оборудования потребителей (в части автоматизированной системы управления и ее программного обеспечения) и источников электроэнергии, заключающиеся в разработке предложений по устройству и эксплуатации средств заряда, химических источников тока, генераторов отбора мощности, источников электроэнергии.

Оценка эффективности предложенных решений в области СЭС показала преимущества подхода, при котором отдельный образец оснащается избыточными (как представляется потребителям) зарядными мощностями и маломощными источниками электроэнергии.

Применение методов экспертного опроса в совокупности с количественным экспериментальным определением параметров новой сложной СЭС является перспективным.

Литература

1. **Комплексный** анализ эффективности технических решений в энергетике / Ю.Б. Гук, П.П. Долгов, В.Р. Окорочков и др. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 176 с.
2. **Лещинская Т.Б.** Оптимизация систем электроснабжения. М., МЭИ, 2002. 45 с.

*С.А. Шеин, 01ssa@snhpro.ru,
ООО «Салаватнефтехимпроект»; ИИН УГНТУ, г. Салават,
М.Г. Баширов, eapp@yandex.ru,
И.Г. Юсупова, ilvina011@mail.ru,
ИИН УГНТУ, г. Салават*

ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАКОНОДАТЕЛЬНОЙ И НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В настоящее время в России существует ряд стандартов и правил, например [1—14], которые не являются обязательными, что усложняет их применение в проектных организациях и обоснование перед заказчиком. Каждый участник проекта старается применять те стандарты, которые ему выгодны (службы заказчика — с точки зрения экономии; проектировщик — с точки зрения минимизации расчетных операций), что в конечном итоге может негативно сказаться на построенном объекте.

Неоднократно возникали споры по применению Правил устройства электроустановок [15], которые не включены ни в один свод правил, применение которых на добровольной или обязательной основе обеспечивает соблюдение требований федеральных законов. При этом, согласно письмом ФЭСЭТАН [16], «...при выборе документов, которыми необходимо руководствоваться в том или ином случае, предпочтение следует отдавать документу, требования которого носят более жесткий характер».

Ниже рассмотрены несколько случаев нестыковок в нормативных документах и предложения по решению возникающих вопросов.

1. **Расчет сечения кабелей** по ГОСТ Р 50571.5.52—2011 [6] и ПУЭ [15]. ГОСТ [6] имеет более жесткие требования, поскольку при прочих равных условиях расчетный ток кабелей для одного и того же сечения по ГОСТ имеет меньшее значение, чем по ПУЭ. Рассмотрим конкретный пример для подключения электродвигателя, установленного за пределами взрывоопасной зоны, на примере расчета допустимой токовой нагрузки для кабеля ВБШВнг(А)-LS 4×185. Согласно ГОСТ [6] допустимая токовая нагрузка на жилы четырехжильных кабелей с ПВХ изоляцией (PVC), прокладываемые по кабельным эстакадам к электроприемнику, определяется как произведение:

— длительно допустимой токовой нагрузки для одной цепи по таблице В.52.10 для трех нагруженных проводников (способ Е); для кабеля ВБШВнг(А)-LS 4×185 длительно допустимый ток составляет 364 А;

— поправочного коэффициента для определения допустимых токовых нагрузок кабелей, проложенных в воздухе при температуре окружающей среды, отличной от +30 °С, по таблице В.52.14 (PVC). Для максимальной температуры окружающего воздуха +40 °С поправочный коэффициент $K_1 = 0,87$;

— понижающего коэффициента для групп многожильных кабелей относительно допустимых токовых нагрузок для многожильного кабеля, проложенного открыто в воздухе, по таблице В.52.20. Для кабелей в количестве 6 штук, прокладываемых на перфорированных лотках с интервалом, равным диаметру кабеля, при количестве лотков равным трем, поправочный коэффициент $K_2 = 0,85$. Таким образом, для кабеля ВБШВнг(А)-LS 4×185 допустимая токовая нагрузка по ГОСТ составит $364 \cdot 0,87 \cdot 0,85 = 269$ А.

Аналогичный расчет по ПУЭ:

— длительно допустимый ток кабелей с медными жилами, в поливинилхлоридной оболочке, бронированных, по таблице 1.3.6 для кабеля ВБШВнг(А)-LS 4×185 при прокладке в воздухе составит 350 А;

— согласно примечанию под таблицей 1.3.7, допустимые длительные токи четырехжильных кабелей с пластмассовой изоляцией могут выбираться по таблице 1.3.7 (допустимый длительный ток для кабелей с алюминиевыми жилами) как для трехжильных кабелей, но с коэффициентом 0,92; к кабелям с медными жилами данное примечание не относится;

— для максимальной температуры окружающего воздуха +40 °С поправочный коэффициент для кабелей с нормированной температурой жил +70 °С по таблице 1.3.3 составит 0,81.

Таким образом, для кабеля ВБШВнг(А)-LS 4×185 допустимая токовая нагрузка по ПУЭ составит $350 \cdot 0,81 = 283,5$ А, с учетом п. 1.3.11 при одно-

рядной прокладке проводов понижающий коэффициент, учитывающий влияние рядом проложенных проводов, не применяется. Вывод: допустимая токовая нагрузка по ГОСТ [6] составляет 269 А, по ПУЭ — 283,5 А.

Государственный стандарт ГОСТ Р 50571.5.52—2011 [6] является переведенным на русский язык документом IEC 60364-5-52 [7], причем ошибки (неточности), присутствующие в англоязычном варианте (например, в Приложении D и таблице D52.1), имеют место и в указанном ГОСТ [6]; в таблице В.52.12 [6] имеется опечатка в токовой нагрузке. ГОСТ [6] не включен в перечень документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной и/или обязательной основе обеспечивается соблюдение требований федерального закона «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» № 123-ФЗ [5] и/или «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» № 384-ФЗ [4]. Отсутствие указанного документа в каком-либо из перечисленных выше перечней усложняют его применение и обоснование перед заказчиком, к тому же сложный алгоритм определения расчетного тока нагрузки создает дополнительные сложности в выборе сечения проводников. В некоторых проектных организациях данные вопросы решаются разработкой внутренних программ, упрощающих выбор сечения, с учетом влияющих на него коэффициентов, материала изоляции и способов прокладки проводников.

Необходимо доработать ГОСТ (как вариант) на базе уже имеющегося ГОСТ Р 50571.5.52—2011 с включением его отдельных разделов и приложений или целиком стандарта в перечень стандартов и сводов правил, выполнение которых на добровольной основе обеспечивает соблюдение требований федерального закона «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» 123-ФЗ.

2. Классификация взрывоопасных зон по 123-ФЗ [5], СП 423.1325800.2018 [8] и ПУЭ [15]. Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» № 123-ФЗ устанавливает взрывоопасные зоны, подразделяющиеся на классы 0, 1, 2, 20, 21, 22. При этом СП 423.1325800.2018 классифицирует следующие зоны и подзоны: зона класса 1 разделяется на подзоны 1а и 1г; зона класса 2 разделяется на подзоны 2а, 2б, 2г; в зависимости от характеристики материала происхождения горючей пыли зоны, опасные по воспламенению горючей пыли, рекомендуется разделить на подзоны 20а, 21а, 22а; 20б, 21б, 22б, 20в, 21в, 22в. Согласно ПУЭ взрывоопасные зоны имеют следующую классификацию: В-1а, В-1б, В-1г, В-2, В-2а. При этом СП 423.1325800.2018 и ГОСТ 21.608—2021 [9] включены в Перечень документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований федерального закона от 30 дека-

бря 2009 г. № 384-ФЗ [2]. Однако ГОСТ 21.608—2021 содержит информацию, имеющую отношение исключительно к ПУЭ [15] (рис. 1), поскольку в других нормативных документах иная классификация, как описано выше.

**Приложение Б
(рекомендуемое)**

Порядок записи и примеры условных обозначений на планах расположения электрического оборудования и прокладки электрических сетей

Таблица Б.1

Наименование		Пример условного обозначения
1	Обозначение классов взрывоопасных и пожароопасных зон	
	а) <u>класс взрывоопасной зоны</u> категория и группа взрывоопасной смеси	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> В-Ia IIAT1 </div>
	б) класс взрывоопасной зоны	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> В-Iб </div>
	в) класс пожароопасной зоны	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> П-I </div>

Рис. 1. Обозначение классов взрывоопасных и пожароопасных зон в рабочей документации (фрагмент из ГОСТ 21.608—2021)

3. Расчет молниезащиты. На текущий момент существуют два действующих документа по расчету молниезащиты зданий и сооружений: СО 153.34.21.122—2003 [11] и РД 34.21.122—87 [10].

Наличие СО 153.34.21.122—2003 не означает необходимость применения только данного документа. Согласно письму от 01.12.2004 г. № 10-03-04/182 ФСЭТАН [17]: «Проектные организации вправе использовать при определении исходных данных и при разработке защитных мероприятий положение любой из упомянутых инструкций или их комбинацию.

Срок подготовки справочных материалов к «Инструкции по молниезащите зданий, сооружений и промышленных коммуникаций», СО 153-34.21.122—2003, к настоящему времени не определен из-за отсутствия источников финансирования этой работы.»

С момента подготовки письма прошло более 17 лет, но СО 153.34.21.122—2003 так и не претерпел никаких изменений и не был доработан. В расчетной части так и не представлена методика расчета для молниеотводов разной высоты, а также для надежности защиты, отличающейся от приведенной в СО 153-34.21.122—2003, при этом имеется программное обеспечение ElectricStorm от компании CSoft, позволяющее выполнять данные расчеты.

Вне зависимости от принадлежности проектируемого объекта при выполнении проектных работ зачастую приходится прибегать к стандартам организации, которые учитывают требования СО 153.34.21.122—2003 и в

которых приводятся вполне конкретные решения для выполнения поставленных задач. К таким документам можно отнести:

— СТО Газпром 2-1.11-170—2007 [12];

— Р Газпром 2-6.2-676—2012 [13].

Учитывая тот факт, что физика молнии и механизмы защиты от молний неизменна для любой отрасли народного хозяйства, методика должна быть универсальной и пригодной для применения. Считаю, что правила, регламентирующие молниезащиту, требуют доработки.

4. О методиках расчетов. На текущий момент отсутствуют действующие методики и нормативные либо руководящие документы для выполнения ряда задач, широко используемых в электроэнергетической отрасли.

4.1. Расчет заземляющих устройств имеется только в пособиях и справочниках по проектированию, подробно в нормах устройств сетей заземления Р.Н. Карякина, а также частично в ГОСТ Р 50571.5.54—2013 [18]. Учитывая, что значимость корректного расчета и выбора заземляющего устройства влияет на безопасность человека, считаем необходимым разработку нормативного или руководящего документа с включением информации по расчетам для различных устройств заземления (с применением классических вертикальных, солевых электродов заземления).

4.2. Определение количества оборудования и материалов рекомендуемого складского запаса. Согласно Приказа Министерства энергетики РФ от 25 октября 2017 г. № 1013 [14], п. 42 «Состав и объем оборудования, запасных частей и материалов, включаемых в аварийный запас, должен устанавливаться субъектом электроэнергетики самостоятельно в утверждаемом им ЛНА (локальный нормативный акт) на основании анализа данных по авариям и повреждаемости оборудования, имевших место в процессе его эксплуатации».

Таким образом, для включения в аварийный запас необходимых позиций оборудования с целью своевременной их замены, необходимо создание единой базы данных энергетического и электротехнического, а также технологического оборудования, содержащей статистические сведения: информацию по типу оборудования, выходящего из строя; режимы работы оборудования, срок службы оборудования; факторы, повлиявшие на выход из строя оборудования и др. (список может быть дополнен).

Появление в открытом доступе статистических сведений по выходу из строя основного энергетического и технологического оборудования, наиболее подверженного выходу из строя, позволит повысить надежность и безопасность работы электроэнергетического оборудования и технологического процесса за счет наличия аварийного резерва оборудования. Необходимость в таких сведениях, на основании которых закладывается ава-

рийный резерв, считаем наиболее актуальным при освоении отдаленных регионов России с ограниченной транспортной инфраструктурой.

4.3. Расчет облучательных установок. В действующем своде правил СП 44.1333.2011 [19] имеются требования по применению фотариев — п. 5.37 «Фотарии необходимо предусматривать на предприятиях, располагаемых севернее Северного полярного круга, при работах в помещениях без естественного освещения или с коэффициентом естественной освещенности менее 0,1 %, а также при подземных работах». В СП 52.13330.2016 [20] приведены предельные значения интенсивности ультрафиолетового излучения.

Подробная методика по расчету облученности, а также вопросы, рассматривающие необходимость применения данных установок и ограничения (с указанием материалов, при взаимодействии которых с человеком применение облучательных установок категорически запрещается) изложена в Указаниях 1158—74 [21], утративших силу с 04.12.2020 г. без замены. Частично вопрос по расчетам облучательных установок рассмотрен в СанПиН 1.2.3685—21 [22], но данный документ не дает полной информации, достаточной для проектирования облучательных установок.

Учитывая тот факт, что на сегодняшний день широко осваиваются территории Российской Федерации вблизи и за Северным полярным кругом, вопрос компенсации недостатка солнечного света встает наиболее остро. Считаем, что методика расчета облученности фотариями и облучательными установками длительного действия для применения как в проектной документации, так и на построенных объектах, нацеленная на поддержание безопасности и здоровья человека, должна приобрести форму свода правил или руководящего документа, содержащего не меньше информации, чем в утративших силу Указаниях 1158—74 [21].

Литература

1. **Постановление** Правительства РФ от 28 мая 2021 г. № 815 «Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил, в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»».
2. **Перечень** документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований федерального закона от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».
3. **Перечень** документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

4. **Федеральный закон** «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 № 384-ФЗ.
5. **Федеральный закон** «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123-ФЗ.
6. **ГОСТ Р 50571.5.52—2011**. Электроустановки низковольтные. Часть 5-52. Выбор и монтаж электрооборудования. Электропроводки.
7. **IEC 60364-5-52**. Low-voltage electrical installations — Part 5-52: Selection and erection of electrical equipment — Wiring systems.
8. **СП 423.1325800.2018**. Электроустановки низковольтные зданий и сооружений. Правила проектирования во взрывоопасных зонах.
9. **ГОСТ 21.608—2021**. Система проектной документации для строительства. Правила выполнения рабочей документации внутреннего электрического освещения.
10. **РД 34.21.122—87**. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений.
11. **СО 153-34.21.122—2003**. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций.
12. **Инструкция** по устройству молниезащиты зданий, сооружений и коммуникаций ОАО «ГАЗПРОМ» СТО Газпром 2-1.11-170—2007.
13. **Рекомендации** организации. Методика и порядок расчета системы молниезащиты объектов ОАО «Газпром» Р Газпром 2-6.2-676—2012.
14. **Приказ** Министерства энергетики РФ от 25 октября 2017 г. № 1013 «Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок “Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики”».
15. **Правила** устройства электроустановок (изд. 6 и 7).
16. **Федеральная** служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Письмо от 27 мая 2011 года № 10-00-12/1699. О требованиях ПУЭ и ГОСТ.
17. **Федеральная** служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Управление по надзору в электроэнергетике. Письмо от 01.12.2004 г. № 10-03-04/182 О порядке использования «Инструкции по молниезащите зданий, сооружений и промышленных коммуникаций» (СО 153-34.21.122—2003) и о правомерности приказа РАО «ЕЭС России» от 14.08.2003 г. № 422 «О пересмотре нормативно-технических документов (НТД)».
18. **ГОСТ Р 50571.5.54—2013**. Выбор и монтаж электрооборудования. Заземляющие устройства, защитные проводники и защитные проводники уравнивания потенциалов.
19. **СП 44.1333.2011**. Административные и бытовые здания.
20. **СП 52.13330.2016**. Естественное и искусственное освещение.
21. **У1158-74**. Указания к проектированию и эксплуатации установок искусственного ультрафиолетового облучения на промышленных предприятиях.
22. **СанПиН 1.2.3685—21**. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

*К.К. Маханбетов, 75758185nik@mail.ru,
С.А. Цырук, TsyrukSA@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва*

РАЗРАБОТКА СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВАМИ ПРЕДПРИЯТИЙ В СФЕРЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ ДО 1000 В

Стоимость выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту электрооборудования за весь период его эксплуатации превышает многократно его начальную стоимость. Поэтому реорганизация системы техобслуживания и ремонта (далее ТОиР) является ключевой проблемой для каждого предприятия. Неспособность традиционных методик предотвращать отказы оборудования привели к появлению новых подходов в организации ТОиРа (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Основные стратегии технического обслуживания электрооборудования

Стратегия технического обслуживания	Характерная особенность
Реактивное (реагирующее) обслуживание (Run-to-Failure — RTF)	Восстановительные работы проводятся по факту аварийного отказа
Планово-предупредительные работы (ППР) (Planned Preventive Maintenance — PPM)	Построение календарного плана-графика работ по ТОиР, соблюдение рекомендаций производителя оборудования по ресурсу и проведения работ по наработке
Обслуживание по фактическому техническому состоянию (ОФС) (Condition-Based Maintenance — CBM)	1. Внедрение направлений по технической диагностике оборудования. Определение границ допустимых пороговых параметров (температура, вибрация, потребление электроэнергии, пара и др.). 2. Внедрение стационарных систем контроля с возможностью управления работой агрегатов при достижении пороговых значений. Соблюдение принципа блокировки при оценке параметров с использованием переносных диагностических систем. 3. Внедрение перепланирования работ по графикам ПДО (планово-диагностического обслуживания)
Проактивное обслуживание (Predictive Maintenance)	1. Построение трендов развития дефектов на основе данных диагностики и опыта эксплуатации. 2. Анализ причин и последствий отказов. 3. Разработка политики управления отказами
Концепция «технология надежности»	Разбиение оборудования на категории с целью расчета экономически эффективной надежности и выбора стратегии управления активами

На сегодняшний день распространенными стратегиями управления активами предприятий в сфере обслуживания и ремонта оборудования являются ППР и реактивное обслуживание (по факту аварийного отказа). Они требуют большого штата обслуживающего персонала, увеличение затрат на обслуживание и ремонт с каждым последующим годом после ввода в эксплуатацию, снижение надежности и отвлечение оборотных средств на складские запасы; помимо этого имеется высокий риск аварийных и внеплановых работ. Две другие стратегии (проактивное обслуживание и по фактическому состоянию) подразумевают внедрение направлений по диагностике оборудования, ввод которого исчисляется миллионными затратами на приобретение и адаптацию методов к особенностям технологического процесса каждого предприятия.

Перед менеджерами предприятия стоят задачи по оптимизации программы ТОиР путем контроля экономической эффективности активов, но при этом необходимо обеспечить бесперебойную и надежную работу оборудования при минимальных затратах на содержание и сокращение простоев оборудования и внеплановых работ. Поэтому необходимо применить новую стратегическую систему управления эксплуатацией оборудования:

- внедрение новых разработок в этой области;
- синтез и адаптация методов к особенностям технологического процесса;
- проведение разумно-достаточной оценки и применение наиболее предпочтительных методов работы для конкретных условий функционирования оборудования.

Фундаментом этой системы может являться концепция «технология надежности» **RCM (Reliability Centered Maintenance)**, с разбивкой оборудования на группы и дифференцированным подходом к проведения технического обслуживания и ремонта (рис. 1). Помимо традиционных стратегий обслуживания и ремонта (рис. 2) предлагается использовать

симбиоз классических методов с пересмотром оценки работы оборудования, с новыми технологиями и средствами измерения и испытания.



Рис. 1. Группировка оборудования по стратегиям:

Группа А — применение ППР в сочетании с диагностическими мероприятиями; группа Б — применение комплекса мер по диагностике и ремонтных работ по состоянию; группа В — применение стратегии эксплуатации до состояния, требующего замены



Рис. 2. Дифференцированный подход к выбору стратегии

Концепция диагностики и измерения сопротивления цепи «фаза—ноль». Используется два метода проведения измерения параметров цепи «фаза—ноль»: 1) измерение с использованием отдельного источника питания; 2) измерение сопротивления цепи «фаза—ноль» при наличии напряжения питающей сети.

При выполнении работ вторым методом, при наличии напряжения питающей сети, рабочее время сокращается на 75 %, что определяет экономическую эффективность внедрения новых методов и использования современных средств измерений.

С целью формирования концепции требуется произвести разумно-достаточную оценку и применить предпочтительные методы работы для конкретных условий функционирования оборудования, скорректировать необходимость проведения измерений петли «фаза—ноль» и ее периодичность для отдельных групп оборудования.

Даже при дифференцированном подходе к группам оборудования требуется большой штат обслуживающего персонала, дополнительные материальные ресурсы для проведения плановых мероприятий. Анализируя результаты проведенных измерений, предлагается уменьшить количество операций ТОиР (уменьшить количество операций по протяжке болтовых соединений, снятия окала/окиси на токопроводящих жилах и др.) и увеличить периодичность ее проведения.

К примеру, разделив оборудование на группы и проведя измерение петли «фаза—ноль», можно не проводить весь перечень операций ТОиР,

а сократить их, тем самым уменьшить время на их выполнение и затраты материальных ресурсов.

Проведение измерения сопротивления петли «фаза—ноль» и расчет токов однофазных замыканий проводится с целью проверки временных параметров срабатывания устройств защиты электрооборудования от сверхтоков при замыкании фазы на корпус. По измеренному полному сопротивлению цепи «фаза—ноль», сократим количество операций не только на конкретной электроустановке, но и на всех элементах и аппаратах электроустановок.

Концепция при диагностике изоляции кабельных линий до 1000 В.

Для предприятий малого и среднего бизнеса, бюджетных организаций, не имеющих возможности приобрести дорогостоящее диагностическое оборудование, измерение сопротивления изоляции является единственным способом определить состояние и остаточный ресурс кабельной линии. В данной концепции (стратегии) технического обслуживания и текущего ремонта электрооборудования предлагается скорректировать и расширить ряд методов диагностики изоляционного покрова кабеля до 1000 В. Для этого требуется следующее.

1. *Исключить из данной концепции электропроводку (до 16 мм²).* Контроль состояния изоляции электропроводки осуществлять в соответствии с требованиями НТД.

2. *Использовать дифференцированный подход к разделению кабельных линий на группы по обеспечению бесперебойной работы и технологической важности непрерывного процесса.* К примеру, обязательно проводить работы по контролю изоляции кабеля для вводных кабелей электроустановок, технологических важных кабельных линий непрерывного процесса (например, контролировать кабель питания центрифуги сырого осадка, а кабель питания системы вентиляции не подвергать дополнительным измерениям и испытаниям).

3. *Заключение о состоянии изоляции методом измерения сопротивления изоляции кабеля рассматривать в динамике, на основании сравнения с результатом предыдущих измерений $R_{из}$.* Требуется создать информационную базу проведенных измерительных работ, на основе которой изменять периодичность проведения электроизмерительных работ. В тех случаях, где проявляется отрицательная динамика развития дефекта, увеличить частоту проведения измерений сопротивления изоляции. А если уменьшение значения сопротивления изоляции превосходит 25 %, то диэлектрический покров кабеля имеет дефект, который развивается и требует ремонта. Все измерения требуется приводить к температуре 20 °С.

4. *Дополнительно производить контроль влажности изоляции.* Одним из самых распространенных является определение коэффициента абсорбции, который указывает степень увлажнения изоляции. В процессе проведения измерения к диэлектрику прикладывают испытательное постоянное напряжение и через него протекает ток:

$$I = I_{\text{УТ}} + I_{\text{абс}} + I_C.$$

Испытания DAR (Dielectric Absorption Ratio) являются измерением тока (сопротивления) во времени. Рассчитывается отношение тока (сопротивления) в момент времени t_2 к току (сопротивлению) в момент времени t_1 :

$$K_{abc} = \frac{I_{15}}{I_{60}} = \frac{R_{60}}{R_{15}}.$$

В производственных условиях эмпирическим путем выбрано время $t_1 = 15$ с и $t_2 = 60$ с, что обусловлено измерением тока после окончания разряда геометрической емкости диэлектрика

$$C_{\Gamma} = \frac{\varepsilon S}{d},$$

где C_{Γ} — геометрическая емкость диэлектрика; d — толщина слоя диэлектрика; S — площадь электродов.

В некоторых случаях, когда геометрическая емкость диэлектрика велика (большая длина кабеля, толщина изоляции кабеля), времени 15 с мало, поскольку фактически изоляция не успевает разрядиться. *Предлагается начальное время измерения тока (сопротивления) увеличить до 30 с.*

В европейских странах (стандарты IEEE) определяют коэффициент диэлектрической абсорбции (DAR) по формуле

$$K_{abc}(\text{DAR}) = \frac{IR_{60s}}{IR_{30s}} = \frac{R_{60}}{R_{30}}.$$

Оценка состояния изоляции по его значению представлена в табл. 2.

Таблица 2

Оценка состояния изоляции

Состояние изоляции	Результат DAR
Плохое	< 1
Приемлемое	1—1,4
Отличное	1,4—1,6

5. *Практика показала, что эффективность испытаний выше, если они проводятся весной или осенью, когда в грунте много влаги.* Если в защитных оболочках кабеля имеются повреждения, влага проникает через дефектные места в изоляцию и облегчает ее пробой при испытаниях. Обусловлено это тем, что выпрямленное напряжение воздействует на неповрежденный слой изоляции и способствует пробую, а слой с увеличенной проницаемостью (верхний слой кабеля насыщен влагой) увеличивает значение сквозного тока (и увеличивается ток утечки).

6. *В процессе измерения сопротивления изоляции кабеля требуется измерять токи проводимости (утечки).* Сопоставление с данными предыдущих замеров позволяет в ряде случаев судить о проникновении влаги в изоляционный покров. При его чрезмерно большом значении или асимметрии по фазам необходимо выполнять мероприятия по ремонту или замене кабеля. С учетом того, что ток утечки обратно пропорционален сопротивлению, ПУЭ и ПТЭЭП регламентируют минимальное значение сопротивления изоляции кабеля до 1000 В 0,5 МОм. *По опытным данным, коэффициент асимметрии по фазам не должен превышать 2:*

$$K_{\text{ассим}} = \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{min}}} = \frac{R_{\text{max}}}{R_{\text{min}}}.$$

7. *По аналогии с электродвигателями предлагается проводить диагностику с измерением тока утечки, а испытательное напряжение подавать ступенчато.* Ввиду наличия явлений абсорбции длительность выдержки под напряжением на каждой ступени должна быть значительной, не менее 1 мин. При этих измерениях в ряде случаев оказывается возможным по признаку нарушения линейной зависимости между током утечки и напряжением судить о величине пробивного напряжения.

Испытание ступенчатым напряжением (Step-Voltage) основывается на принципе, что идеальный диэлектрик будет давать одинаковые показания на всех напряжениях, а диэлектрик, который подвержен перенапряжению, будет показывать более низкие значения сопротивления изоляции при более высоких напряжениях (рис. 3).

Во время испытания прикладываемое напряжение пошагово увеличивается на 1/5 величины конечного испытательного напряжения каждую минуту в течение 5 мин, при этом выполняются последовательные измерения. Европейским стандартом для испытаний ступенчатым напряжением является IEEE 95-2002.

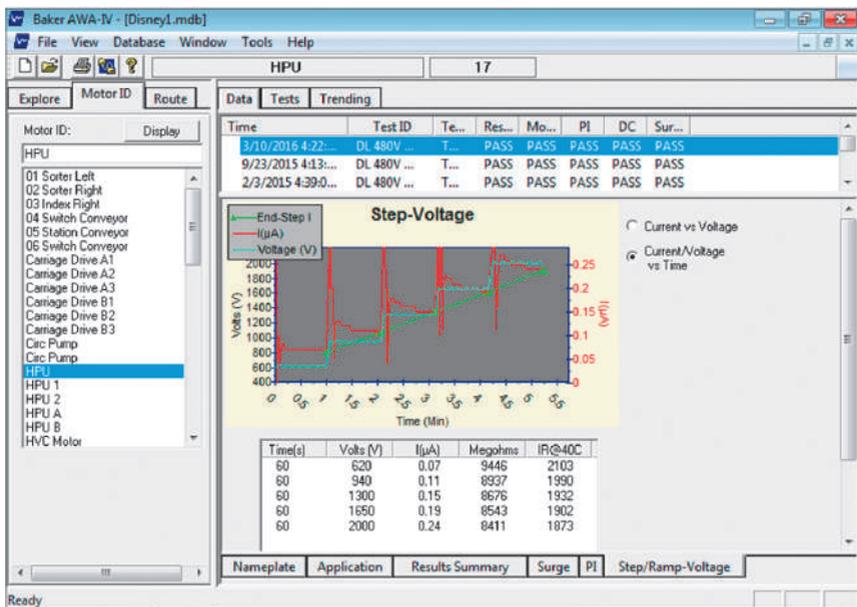


Рис. 3. Испытание ступенчатым напряжением

Заключение. Для управления эксплуатацией оборудования предложена стратегия «технология надежности», в основе которой лежит разбиение оборудование на группы, внедрение новых технологий производства работ, корректировка графиков ППР на основе полученных сведений электроизмерительных работ. Ее внедрение позволит высвободить большой объем трудовых ресурсов и сократит оборотные средства на складские запасы. Разрабатываемую концепцию планируется апробировать на реальных объектах.

Литература

1. **Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С.** Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. **Иерусалимов М.Е., Орлов Н.Н.** Техника высоких напряжений. Издательство Киевского университета, 1967.
3. **IEEE 95-2002** Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and Above) With High Direct Voltage. Рекомендуемая практика для испытания изоляции электрического машинного оборудования AC (2300 В и выше) с высоким постоянным напряжением.

*Э.М. Баширова, bashirova-elmira@yandex.ru,
М.Р. Нуритдинов, nuritdinova2017@mail.ru,
К.Р. Нуритдинова, nuritdinova.2003@mail.ru,
ИНН ФГБОУ ВО УГНТУ, г. Салават*

АНАЛИЗ КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭС 2035 В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ РФ

Основной задачей энергетической стратегии развития России является повышение эффективности использования природных энергетических ресурсов, увеличение потенциала всего сектора энергетики в целом. Выполнение данной задачи будет благотворно влиять на рост экономики страны, повысит уровень жизни простых граждан, а также поднимет рейтинг страны на мировой арене.

Энергетическая стратегия определяет цели и задачи развития энергетического сектора на ближайшую перспективу. Задаются план действий, приоритеты и ориентиры, а также регулируются инструменты политического влияния на определенные этапы ее реализации, обеспечивающие достижение намеченных целей.

Первым официальным стратегическим документом энергетического сектора стала утвержденная в 2003 году «Энергетическая стратегия 2020». Годы, прошедшие с начала реализации, подтвердили правильность большинства ее важнейших положений и соответствие реальному процессу развития энергетического сектора страны в условиях резких изменений внешних и внутренних факторов, определяющих основные параметры функционирования топливно-энергетического комплекса России. При утверждении данного документа предусматривалась доработка и уточнение энергетической стратегии не реже, чем один раз в пять лет.

«Энергетическая стратегия 2035» является преемницей документа, утвержденного в 2003 г. Она включает в себя новые задачи и приоритеты развития страны в новых экономических реалиях. Ее положения используются при разработке и корректировке программ социально-экономического развития, а также энергетических стратегий и программ субъектов Российской Федерации, комплексных программ по энергетическому освоению регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока, полуострова Ямал.

Главный энергетический вызов заключается в выполнении энергетическим сектором страны своей важнейшей роли — гарантированного удовлетворения внутреннего спроса на энергоресурсы с учетом следующих требований:

— выход Российской Федерации на стандарты благосостояния, соответствующие развитым странам мира;

— достижение научного и технологического лидерства Российской Федерации по ряду важнейших направлений, обеспечивающих энергетическую безопасность;

— последовательное ограничение нагрузки ТЭК (топливно-энергетического комплекса) на окружающую среду и климат путем снижения выбросов загрязняющих веществ, сброса загрязненных сточных вод, а также эмиссии парниковых газов, сокращения отходов производства и потребления энергии;

— обеспечение стабильности и расширения поставок энергоресурсов потребителям;

— рациональное снижение доли топливно-энергетических ресурсов в структуре российского экспорта, переход от продаж первичных сырьевых и энергетических ресурсов за рубеж к продажам продукции их глубокой переработки;

— развитие крупных узлов международной энергетической инфраструктуры на территории России, осуществляемое с использованием новых энергетических технологий.

Необходимость скорейшего решения вопросов долгосрочного развития в сочетании с необходимостью решения уже имеющихся проблем в энергетической сфере создают фундамент для определения целей и задач новой энергетической стратегии. Итоговой целью «Энергетической стратегии 2035» является создание инновационного и эффективного энергетического сектора страны, адекватного как потребностям растущей экономики в энергоресурсах, так и интересам внешней экономики России, вносящей необходимый вклад в социально-ориентированное развитие экономики страны и ее регионов.

Достижение итоговой цели требует последовательного продвижения в решении основных задач стратегии:

— повышения эффективности воспроизводства, добычи и переработки топливно-энергетических ресурсов для удовлетворения внутреннего и внешнего спроса на них;

— модернизации и создания новой энергетической инфраструктуры на основе масштабного технологического обновления энергетического сектора экономики страны;

— формирования устойчивой благоприятной институциональной среды в энергетической сфере;

— повышения энергетической и экологической эффективности российской экономики и энергетики, в том числе за счет структурных сдвигов и активации технологического сбережения [1].

Для оценки предлагаемых мер и перспектив развития энергетики России с учетом факторов экономической неопределенности рыночных ко-

лебаний энергетических рынков сформированы прогнозные сценарии, определяющие значения целевых показателей и возможных изменений параметров топливно-энергетического баланса, в диапазоне которых отрасли топливно-энергетического комплекса и энергетика Российской Федерации в целом гарантированно сохраняют устойчивость. Сценарии составлены с учетом запаса прочности, гарантирующего выполнение требований энергетической безопасности [2].

В качестве наглядного примера рассмотрим графики изменения параметров энергетического рынка. На рисунке 1 представлен удельный расход топлива на отпуск электрической энергии. Из представленной диаграммы видно, что при утверждении энергетической стратегии планируется постепенный переход на возобновляемые источники электроэнергии, предполагающий сокращение расходов топлива на генерацию.

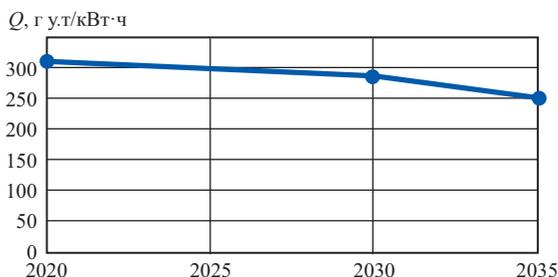


Рис. 1. Удельный расход топлива на отпуск электрической энергии

По первичной электроэнергии (рис. 2) после незначительного снижения наблюдается резкая динамика роста, обусловленная значительной шириной диапазона энергетической безопасности, что говорит о соблюдении ключевых факторов и условий по выполнению доктрины.

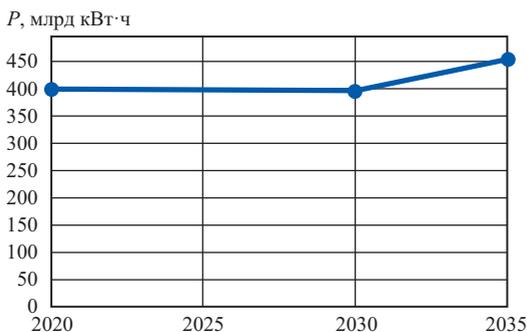


Рис. 2. Первичная электроэнергия

На фоне последних мировых событий можно прийти к выводу, что предстоящая четверть века будет не самой простой для российской энергетики и экономики в целом. Базовые проблемы топливно-энергетического комплекса и самой российской экономики в совокупности ставят энергетический сектор страны в достаточно жесткие условия. Требуется интенсивное решение основных задач по повышению энергетической эффективности национальной экономики, доступности энергоснабжения потребителей, уменьшения трат топливно-энергетических отраслей и проектов, рационального природопользования и защиты окружающей среды [3].

Литература

1. **Национальный** проект «Энергоэффективный город» [Электронный ресурс]. Институт энергетической стратегии. Москва, 2020. URL: <http://www.energystategy.ru/> (дата обращения: 15.09.2022).
2. **Энергетическая** стратегия Российской Федерации на период до 2035 года [Распоряжение: принято Правительством РФ от 9 июня 2020 г.: по состоянию на 15 сентября 2022 г.].
3. **Прогноз** развития энергетики мира и России 2019 [Электронный ресурс] / Под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина // ИНЭИ РАН — Московская школа управления СКОЛКОВО. Москва, 2019. URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Forecast_2019_Rus.pdf (дата обращения: 15.09.2022).

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

ИНСТРУМЕНТЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРЕДПРИЯТИЙ ТЭК ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИЙ НАПРАВЛЕНИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Стратегический анализ является базой для принятия стратегических решений по управлению предприятием с учетом его потенциала и угрозы со стороны внешнего окружения. Основной целью стратегического анализа является выявление и оценка ключевых факторов, которые влияют на настоящее и будущее положение организации, рациональное обоснование стратегий предприятия, основанное на изучении источников развития конкурентных преимуществ.

Макросреда включает изучение макроэкономических, социальных, правовых, международных и технологических факторов, которые могут

повлиять на организацию. Чаще всего данные факторы характеризуют как макроусловия, на которые сотрудники предприятия не могут влиять и в которых вынужден функционировать бизнес.

Считается, что характеристики макросреды чаще всего одинаковы для всех предприятий, которые функционируют в одной отрасли. Но это не всегда так, когда речь заходит об энергетической отрасли.

Разобраться с макроусловиями поможет PEST-анализ (или STEP-анализ).

К политическим факторам, особенно влияющими на ТЭК, относятся внутренняя и внешняя политики Российской Федерации и политики отдельных стран, влияющих на мировое экономическое сообщество, включая общий уровень напряженности международных отношений.

Если говорить о политических факторах, влияющих на конкретное предприятие ТЭК, необходимо учитывать возможность лоббистской деятельности руководства данного предприятия в законотворческом процессе [1]. С целью отражения своих интересов при принятии нормативно-правовых актов организации имеют возможность обратиться к Администрации Президента, в Российский союз промышленников и предпринимателей и Национальную Технологическую Инициативу.

Основные энергетические рынки России можно охарактеризовать как олигополию за исключением отдельных сегментов (например, транспортировка газа и передача электрической энергии по сетям), которые являются полностью монополизированными; такие особенности необходимо отражать при проведении PEST-анализа для конкретного предприятия.

Экономические факторы, учитываемые при разработке стратегии, могут включать уровень инфляции, курс валют, дефицит бюджета в стране, инвестиционный климат и др. Для анализа экономического воздействия на функционирование конкретного предприятия ТЭК особое внимание необходимо уделять вопросам государственной поддержки проектов, составляющей государственного бюджета и государственного имущества в структуре капитала организации, а также в системе ценообразования отдельных сфер деятельности организации (государственное регулирование тарифов на оказываемые услуги или самостоятельное установление стоимости предоставляемых товаров и/или услуг), уровень мировых цен на энергоносители и ситуацию на биржах.

Социодемографические воздействия оказывают влияние через социальную культуру, структуру и демографию. В целях поддержания социальной стабильности в ТЭК необходимо принимать во внимание «настроение» общества, мировые тенденции развития благотворительной деятельности и социально-ответственного бизнеса. В период цифровизации экономики

и, в частности, энергетики к важным социальным факторам воздействия относится уровень образования населения.

Анализ технологического окружения связан с наличием и степенью проникновения новых технологий в рассматриваемой и смежных отраслях. Например, в настоящее время цифровые технологии стали средством конкуренции. Но для ТЭК, также актуальными остаются проблемы импортозамещения, разработки и внедрения энергетически и экономически эффективного оборудования взамен физически и морально устаревшего парка, достижение экологических показателей на уровне мировых стандартов.

Здесь также стоит отметить, что информационные и информационно-телекоммуникационные сети, а также автоматизированные системы управления в сфере ТЭК относятся к субъектам критической информационной инфраструктуры, поэтому особенно остро сейчас стоит вопрос о кибербезопасности энергетического сектора, что также накладывает соответствующие обязательства на предприятия ТЭК.

Микросреда — это «близкое окружение» организации, представляющее собой уникальную комбинацию существующих факторов, напрямую влияющих на деятельность организации, повышая или снижая эффективность ее работы. Для анализа микросреды можно использовать методiku «Анализ пяти сил М. Портера». Перечислим эти «пять сил».

1. Угроза появления новых игроков на рынке. Для конкретного предприятия ТЭК необходимо рассматривать барьеры входа на рынки присутствия компании со стороны смежных отраслей, а также барьеры для проникновения рассматриваемой компании на смежные рынки.

2. Угроза со стороны продуктов-заменителей. Для конкретного предприятия ТЭК данная сила характеризуется наличием предложения отдельных энергетических услуг другими компаниями, не являющимися прямыми конкурентами. Ярким примером здесь может служить предоставление потребителям распределенных энергоресурсов для обеспечения собственных нужд вместо подключения к централизованной энергосистеме (например, использование ВИЭ или малых дизельных электрогенераторов), рынки электромобилей, умных домов, промышленных аккумуляторов электроэнергии позволят клиентам изменить свое поведение на существующем рынке электроэнергии.

3. Власть покупателей на рынке электроэнергии в свете развития интеллектуальной энергетической системы (на основе концепции Smart Grid) будет только возрастать, так как потребители будут обеспечены возможностью не только самостоятельного изменения объема, но и функциональных свойств (уровня надежности, источника энергии — традиционная, «зеленая» или «своя» электростанция) и других параметров. В такой

энергосистеме конечный потребитель электроэнергии приобретает статус «активного».

4. Власть поставщиков на рынке. Топливо-энергетический комплекс потребляет значительную часть промышленной продукции. Особенно остро способность поставщика влиять на функционирование предприятий ТЭК начала ощущаться в условиях жесткого санкционного давления со стороны западных стран. В связи с этим появилась реальная угроза прекращения соглашений по поставкам специализированного оборудования для российских электростанций, что напрямую влияет на надежность их функционирования.

5. Интенсивность конкуренции на рынке. Здесь нужно ответить на два вопроса: что способствует усилению конкуренции, что способствует снижению конкуренции на рассматриваемом рынке.

Анализ внутренней среды компании заключается в определении имеющихся ресурсов и компетенций для дальнейшего развития организации, определение «узких» мест для дальнейшей оценки рисков реализации стратегии. Удобным инструментом анализа внутренней среды предприятия является «модель 7S Mckinsey», включающая следующие элементы.

1. *Стратегия.* Стратегия предприятия ТЭК обязательно должна быть согласована с энергетической стратегией России на период до 2030 г. [2] и другими нормативно-правовыми актами РФ, большим достоинством стратегии также будет являться выражение приверженности компании международным принципам (например, целям устойчивого развития ООН [3]).

2. *Структура компании.* Это и количество уровней иерархии, и степень централизации (децентрализации) при принятии управленческих решений, а также механизмы координации — все то, что составляет понятие «организационной структуры предприятия» и характеризует оперативность решения возникающих проблем, степень адаптивности и гибкости в условиях изменяющейся внешней среды.

Главные проблемы больших компаний — бюрократия и строгая иерархия. Стратегия компании не может быть произвольной, автономной от структуры, она предопределена структурой и следует за ней. Новая, более прогрессивная структура открывает широкие возможности для стратегии. И это естественно, потому что стратегию реализуют люди, принципы и усилия которых консолидированы определенным типом структуры.

Наиболее прогрессивной моделью управления на сегодняшний день считается холократия — система управления организацией на основе са-

моорганизующихся команд (кругов), объединенных в единое иерархическое целое. Фредериком Лалу в 2014 г. было введено понятие новой эволюционной стадии развития организации — «Бирюзовая организация». Примером глобальной энергетической компании с такой организационной структурой является The AES Corporation (NYSE: AES), в ее составе есть как генерирующие, так и распределительные предприятия [4].

3. *Система управления.* Данный элемент характеризует саму деятельность компании, ежедневные процессы и процедуры, в которых принимаются управленческие решения, происходят коммуникации между сотрудниками и, главное, контролируется результативность принятых управленческих решений.

4. *Сумма навыков.* Это набор компетенций, которыми владеет персонал, работающий в компании на данный момент. Частным случаем демонстрации таких компетенций среди энергетических компаний можно назвать участие представителей госкорпорации «Росатом», ПАО НК «Роснефть» и других предприятий ТЭК в чемпионате WorldSkills (Ворлдскиллс Россия).

5. *Состав работников:* среднесписочная численность, половозрастная структура, уровень образования, коэффициент текучести персонала и другие показатели кадрового потенциала предприятия. Сюда входит и анализ комплекса инструментов мотивации и поддержания лояльности сотрудников по отношению к компании, так как производительность предприятия определяют сотрудники. Также в интересах руководства создать комфортную среду для персонала, поэтому на предприятиях ТЭК оценивается и социальная политика компании.

6. *Стиль взаимоотношений внутри компании.* Система методов воздействия руководителя на подчиненных. По факту руководитель должен уметь применять любые стили управления, меняя их в зависимости от ситуации, складывающейся на предприятии, но должно четко просматриваться лидерство руководства и его роль в принятии стратегических решений и формировании ценностей компании.

7. *Система ценностей.* Общие ценности — это ядро корпоративной культуры предприятия, в котором содержатся убеждения, лежащие в основе деятельности компании и разделяемые всеми сотрудниками без исключения. Безусловно, они должны находить свое отражение в стратегии развития предприятия.

На основе данных, полученных после проведения стратегического анализа отдельно внешней и внутренней среды организации, необходимо провести ситуационный анализ с целью систематизации информации и изучения совместного влияния факторов внутренней и внешней среды.

Для этого можно использовать SWOT-анализ. На основе готовой таблицы SWOT-анализа необходимо сделать ряд выводов:

1. Какие сильные стороны рассматриваемой организации необходимо эффективно использовать для того, чтобы максимально охватить каждую возможность? Это основа будущей стратегии — те конкурентные преимущества, которые при сложившейся благоприятной внешней обстановке приведут компанию к значительному росту и развитию.

2. Какие сильные стороны организации способны нейтрализовать или минимизировать последствия наступления угроз?

3. Какие слабые стороны рассматриваемой организации требуют особого внимания, чтобы не помешать реализации возможностей и какие возможности могут способствовать устранению слабых сторон организации?

4. Какие в организации есть слабые места, которые при сложившейся неблагоприятной внешней обстановке приведут компанию к значительным потерям? Это основа для развития в стратегии превентивных мер, обеспечивающих надежность функционирования организации.

Ответы на вопросы SWOT-анализа позволят руководству предприятия сформировать стратегические направления развития, а также сконцентрировать свое внимание на стратегических целях.

Задачей номер один в плане деятельности Министерства энергетики Российской Федерации на период 2019—2024 гг. [5] является преобразование энергетической инфраструктуры Российской Федерации посредством внедрения цифровых технологий и платформенных решений.

1. Необходимость постоянного мониторинга технических показателей для обеспечения безопасности и надежности функционирования объектов энергетической отрасли привели к быстрому развитию датчиков и контроллеров, систем сбора и передачи оперативной и неоперативной технологической информации. В свою очередь, необходимость управления протекающими процессами в режиме реального времени привела к развитию релейной защиты и противоаварийной автоматики, а также автоматизированных систем интерпретации и визуализации данных. Все этого послужило платформой для развития сферы промышленного интернета вещей (Industrial Internet of Things — IIoT) в энергетике.

Сами по себе данные не обладают такой высокой ценностью, как совокупное использование прямых и косвенных данных, объединенных с экспертными знаниями (например, данные парка устройств, метеорологические данные, отчеты о выходах из строя оборудования) в одной аналитической системе, что позволит получить качественно новые данные для прогнозирования и разработки прикладных решений с целью повышения надежности и эффективности энергосистемы.

2. Большие данные, искусственный интеллект, машинное обучение и предиктивная аналитика также активно внедряются в деятельность производственных предприятий ТЭК.

3. Революцию для привычных бизнес-процессов в энергокомпаниях может принести и технология блокчейна, представляющая собой распределенную цифровую базу данных (или реестр), записи в которой защищены криптографическими алгоритмами. Данная технология позволяет осуществлять операции различного рода между равноправными участниками без посредников, при этом данные надежно защищены, а транзакции прозрачны.

Технология блокчейна в энергетике может использоваться для проведения операций по поставке энергоносителей, оформления сертификатов, подтверждающих производство электроэнергии на основе использования возобновляемых источников энергии, осуществления расчетов за произведенные и потребленные объемы электроэнергии, оформление прав собственности и управление активами предприятий ТЭК и многое другое.

4. Госкорпорацией «Росатом» разрабатываются комплексные проекты «Цифровая АЭС» и «Цифровой сбыт». Уникальным проектом является «Умный рудник», интеллектуальная информационная система которого анализирует в реальном времени технологические процессы добычи урана, выбирает оптимальные режимы работы оборудования и дает сигналы о неполадках. На основе моделирования работы скважин и собранных статистических данных система также может планировать направление будущих горных работ и составлять график ремонтов оборудования.

На фоне развития беспилотных видов транспорта Госкорпорация «Росатом» ведет разработку цифровой модели безэкипажного судна. В первую очередь данные работы проводятся для развития Северного морского пути.

5. У ПАО «Россети» есть реализованные пилотные проекты по «Цифровой подстанции» (ЦПС). На основе уже апробированных и хорошо зарекомендовавших себя автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), международных стандартов унификации сигналов и передачи данных, а также с развитием волоконно-оптических линий связи и интеллектуальных электронных устройств открылись широкие возможности виртуализировать большинство функций, выполняемых на подстанции, повысить энергетическую и экономическую эффективность функционирования энергосистемы.

На законодательном уровне пока ведется фрагментарная работа по унификации уже реализованных и находящихся на стадии разработки пилотных проектов по цифровизации энергетики. Правительство утвердило

дорожную карту по совершенствованию законодательства и устранению административных барьеров в целях обеспечения реализации Национальной технологической инициативы по направлению «Энерджинет» [6].

Литература

1. **Морозов О.А.** Продвижение интересов компании в органах государственной власти: учебно-практическое пособие. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2017. 107 с.
2. **Энергетическая** стратегия России на период до 2030 года (утв. Распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 г. № 1715-р).
3. **Повестка дня** в области устойчивого развития на период до 2030 года [Электронный ресурс]. Официальный сайт ООН. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/about/development-agenda/>
4. **Лалу Ф.** Открывая организации будущего: Пер. с англ. В. Кулябиной. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2016. 432 с.
5. **Приказ** Минэнерго России от 28.01.2019 г. № 45 «Об утверждении плана деятельности Министерства энергетики Российской Федерации на период 2019—2024 гг.».
6. **Дорожная** карта «Энерджинет» [Электронный ресурс]. Официальный сайт Национальной технологической инициативы. URL: http://www.nti2035.ru/markets/docs/DK_energynet.pdf

*А.Е. Ефименко, YefimenkoAY@mpei.ru,
А.Р. Ефимов, EfimovAR@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва*

ТРАНСАКЦИОННЫЕ ИЗДЕРЖКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И СБОРКЕ НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОМПЛЕКТНЫХ УСТРОЙСТВ

В современных условиях принципиальной нестабильности во всех направлениях развития как нашей страны, так и человечества в целом, новое прочтение приобретают вещи, внимание которым уделялось в прошлом совершенно недостаточно. Если рассматривать такое направление, как транзакционные издержки, можно констатировать, что и по сей день для многих оно представляется загадочным, а многие от этого просто отмахиваются, как от вопроса, не достойного рассмотрения. В действительности грамотное их устранение или хотя бы сокращение объема таких издержек является одним из основных способов снизить издержки в целом, в том числе в сфере электротехники и электроэнергетики.

Итак, на наш взгляд, проблеме транзакционных издержек (ТИ) уделяется недостаточное внимание, и на большинстве предприятий даже не знают о существовании такого понятия. В то же время, когда у сотрудников и рабочих предприятия уходит большое количество времени на обсуждение между собой деталей процессов без использования документации, составление документов каждый раз как будто заново, ожидание в кабинетах руководства, физическое перемещение документации между цехами и отделами, получение бесконечной череды согласований во всех инстанциях, заполнение огромных многостраничных форм и приложений (и это только первые примеры «навскидку») — это и есть транзакционные издержки во всей своей красе.

Немного теории. Еще в XVIII в. идея транзакции и транзакционных издержек при изготовлении булавки была описана у Адама Смита: «Один [рабочий] тянет проволоку, другой выпрямляет ее, третий обрезает, четвертый заостряет конец, пятый обтачивает один конец для насаживания головки; изготовление самой головки требует двух или трех самостоятельных операций» [1] и так далее. Здесь транзакция присутствует, когда булавка переходит от одного рабочего, завершившего процесс, к другому рабочему, который еще не начал новый. Рассматривая этот пример, отметим, что сам производственный процесс в этот момент не происходит, однако время и усилия расходуются. К сожалению, неизвестно, сколько времени ждал один рабочий, пока заготовку булавки ему доставит (например, принесет) другой, при этом еще и объяснит нюансы процесса (при необходимости).

Существует ряд иных определений. Например, Оливер Уильямсон дал следующее определение транзакции: «Транзакция имеет место тогда, когда товар или услуга переходит от заключительной точки одного технологического процесса к исходной точке другого, смежного с первым. Заканчивается одна стадия деятельности и начинается другая» [2]. Другое определение транзакционной издержки дал Джон Коммонс: «Транзакция — это отчуждение или приобретение индивидами прав будущей собственности на материальные блага» [4]. Наиболее известное (и развернутое) определение дал Кеннет Эрроу; для лучшего описания он прибег к сравнению этого понятия с трением в физике: «Подобно тому как трение мешает движению физических объектов, распыляя энергию в форме тепла, так и транзакционные издержки мешают перемещению ресурсов к тем пользователям, для которых они представляют наибольшую ценность, “распыляя” полезность этих ресурсов по ходу экономического процесса...». Наконец, следует заметить, что экономист, игнорирующий существование транзакционных

издержек, будет сталкиваться с такими же трудностями при объяснении экономического поведения, с какими сталкивался бы физик, игнорирующий факт трения при описании движения физических объектов» [5].

Резюме: транзакционные издержки — это издержки, возникающие при непосредственном осуществлении транзакций.

Большинство ученых разделяют понятие транзакционных издержек на четыре основных вида: «издержки поиска информации или издержки поиска альтернативы»; «издержки ведения переговоров»; «издержки оппортунистического поведения»; «издержки спецификации и защиты прав собственности» [4].

Рассмотрим ТИ на практическом примере проектирования и сборки низковольтных комплектных устройств. Нужно отметить, что данное исследование носит оценочный характер из-за наличия ряда неопределенностей в деятельности предприятий (за основу взята работа реального предприятия). Сделан ряд допущений:

— действия, подразумевающие принятие коллегиального решения, подразумевают кратное увеличение временных ресурсов; принимаем одинаковое условие, что решение выносит комиссия (совет, коллегия, группа) из трех человек;

— по факту учитываются человеко-часы; если то или иное действие выполняет один специалист, для обработки берется количество времени (в часах), которое необходимо для выполнения соответствующих действий одному сотруднику предприятия.

Опишем полный процесс реализации проекта, от прихода заказа от клиента до отгрузки самого изделия. Нагляднее всего будет продемонстрировать это в виде схемы (рис. 1).



Рис. 1. Упрощенная схема процесса

Сразу отметим, что указанные части (этапы) реализации проекта намеренно показаны укрупненно, в реальности внутри каждого этапа будет существовать целый ряд более мелких ТИ, разобрать (рассмотреть, проанализировать) которые можно методом декомпозиции. В дальнейшем, в следующих статьях, мы планируем вернуться к этому, а сейчас возьмем самые очевидные (по опыту работы на реальном предприятии). Наиболь-

шие транзакционные издержки встречаются в работе отдела продаж и работе инженерно-сметного отдела. Их мы и будем описывать.

Рассматриваемые изделия — низковольтные комплектные устройства (НКУ) — представляют собой набор коммутационных аппаратов вместе с органами управления, защиты, настройки, измерительными приборами, механизмами сигнализации и др. Отличительной чертой НКУ является то, что они полностью смонтированы производителем в рамках единой конструкции со всеми электрическими и механическими элементами.

Такие устройства служат для приема, распределения и учета электрической энергии. Также в их задачи входит защита силовых цепей и оборудования, которое данную электроэнергию потребляет. Некоторые виды НКУ способны управлять подконтрольным им оборудованием (щиты автоматического управления). Слово «низковольтное» в названии устройства подразумевает, что сфера использования охватывает сети переменного и постоянного тока с напряжением до 1000 В [1].

Подробно опишем работу отдела продаж и работу инженерно-сметного отдела. На рисунке 2 она показана условно линейно, но на практике это не вполне так, поскольку некоторые действия выполняются неоднократно, циклически. Таких действий несколько:

- переговоры об условиях заказа (Отдел продаж — Заказчик);
- переговоры о цене (Отдел продаж — Инженерно-сметный отдел — Отдел продаж — Заказчик).

На схеме видно, что процесс взаимодействия между отделами нелинейный и слабо упорядоченный, может содержать несколько многократных, не всегда нужных повторений. Как мы уже установили, каждое повторение создает, кроме непосредственных, также и ТИ, определяемые, например, временем ожидания, непроизводственными затратами и подобными действиями. К самым затратным можно отнести:

- второй цикл (Осмечивание (разработка сметы) — Обсуждение цены); данный цикл в настоящее время занимает в среднем 5 рабочих дней, поскольку участвуют три взаимодействующих объекта: Производство (получение данных), Отдел продаж (документальная проработка), Клиент (пожелания);

- подписание договора занимает в среднем 5 рабочих дней;
- закупка комплектующих занимает в среднем 15 рабочих дней.

Также можно заметить, что один из циклов связывает отделы. Издержки в результате несут несколько отделов по очереди. В этом процессе содержится самая длительная (затратная) совокупная транзакционная издержка — 5 рабочих дней на каждую итерацию цикла.

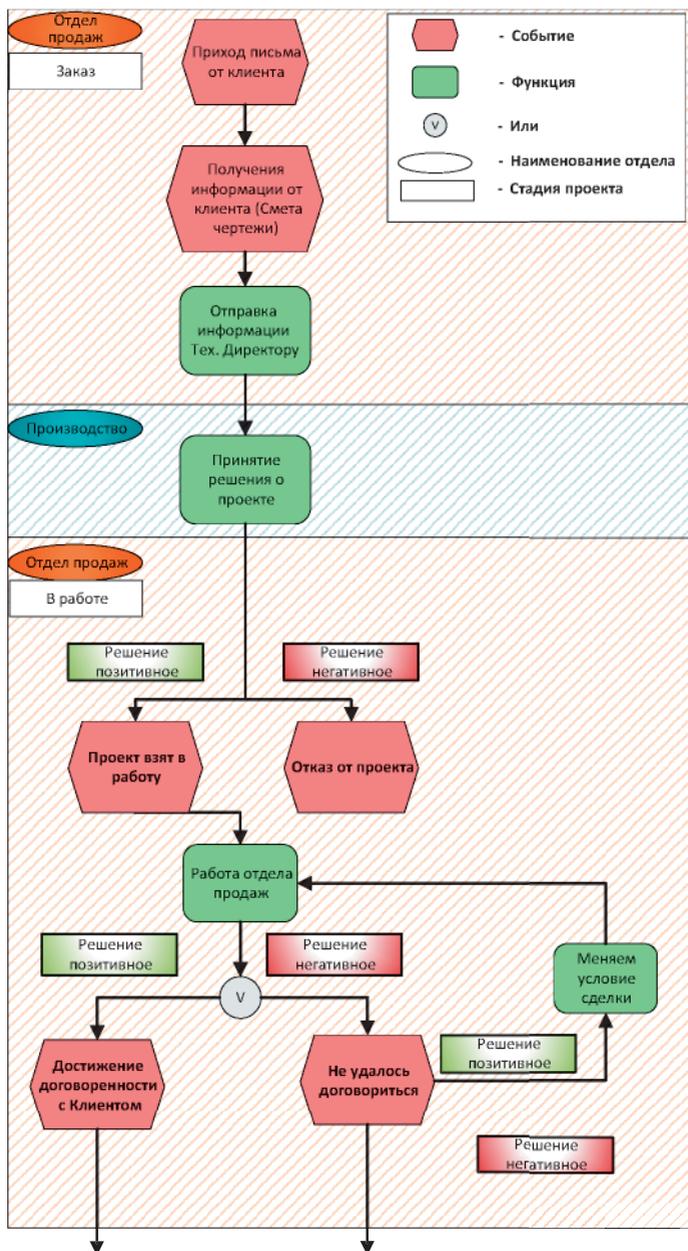


Рис. 2. Полная схема процесса (начало)

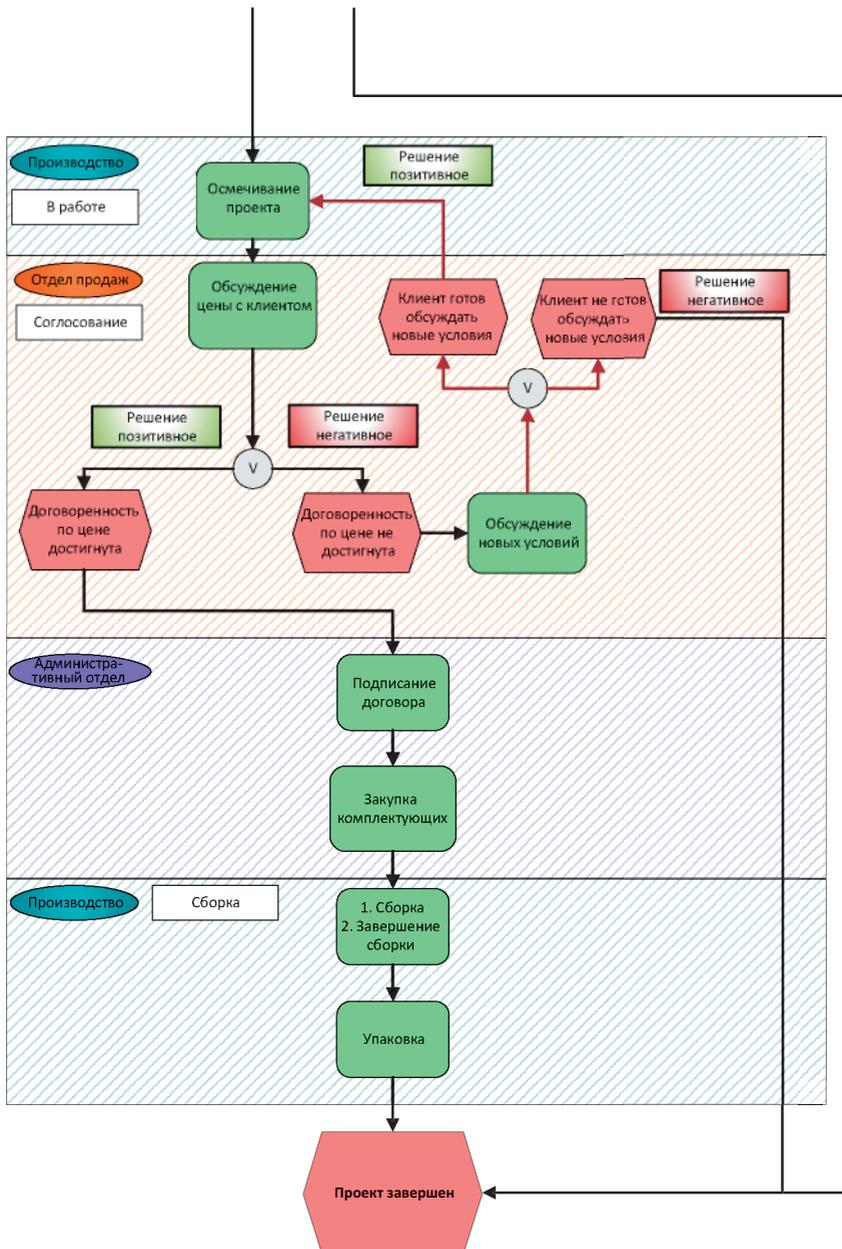


Рис. 2. Полная схема процесса (окончание)

Для снижения объема ТИ предлагаются следующие действия (предполагаемые результаты определены экспертным путем на основе опыта реализации аналогичных работ):

— автоматизировать осмечивание проекта с использованием информационной системы, разработать (частично приобрести) шаблоны и заготовки типовых технических решений для исключения создания технического решения «с нуля»; результат — снижение времени разработки и согласования сметы на 60 %;

— установить максимальное количество итераций цикла, равные двум, большее количество итераций считать нарушением; результат — снижение времени согласования на 40 %;

— ужесточить выбор контрагентов с помощью процедуры предварительного отбора (заранее, до начала выполнения конкретного проекта) для предварительного отсеивания потенциальных недобросовестных исполнителей; результат — снижение количества срывов проектов на 60 %.

Все это позволит повысить эффективность (а следовательно, и финансовый результат) работы рассматриваемого предприятия.

В дальнейшем мы планируем неоднократно вернуться к данной теме, уделяя большее внимание деталям процесса, более глубоко декомпозируем процесс и особое внимание дополнительно уделим специфике электротехники и электроэнергетики.

Литература

1. **Смит А.** Исследования о природе и причинах богатства народов. М.: Эксмо, 2007.
2. **Оливер И. Уильямсон.** Экономические институты капитализма: Пер. с англ. Л.: Лениздат, 1996.
3. **Капелюшников Р.И.** Экономическая теория прав собственности: методологические пособие. М.: ИМЭМО, 1990.
4. **Коммонс Д.Р.** Институциональная экономика: учебное пособие, СПб.: СПбГАСУ-СПб, 2013.
5. **Arrow K.** Political and Economic Evaluation of Social Effects and Externalities // The Analysis of Public Output. NBER, 1970. URL: <http://www.nber.org/chapters/c3349>

О.В. Маслеева, ovm1552@yandex.ru,
Ю.Д. Голицын, yura.golitsin@yandex.ru,
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ АВТОМОБИЛЯ С ДВС И ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

Автомобили являются одним из главных перевозчиков людей и грузов. Они же являются и основным источником загрязнения окружающей среды. Кроме того, топливо для них получают из невозобновляемого природного ресурса — нефти. Альтернативой являются электромобили, главным достоинством которых считается отсутствие загрязнения атмосферного воздуха выхлопными газами.

Все больше стран выражают намерения запретить продажу на своей территории в обозримом будущем автомобилей с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) на бензине, дизельном топливе или газе. Ряд стран даже определились с конкретными сроками, когда этот запрет будет введен (Норвегия — 2025 г., Швеция — 2030 г.). В дальнейшем на территории этих стран эксплуатация будет разрешена только электромобилям. В качестве основной мотивации приводятся два аргумента: улучшение экологической обстановки и постепенный уход от углеводородного сырья.

Однако на пути широкого применения электромобилей встает ряд проблем [1]. Согласно исследованию международной компании *Deloitte* многие стартапы по выпуску электромобилей и комплектующих к ним не выживут из-за крайне высокой стоимости оборудования и производства. Гиганты типа *GM*, *Mercedes-Benz* или *Fiat Chrysler* покрывают убыточность своих электропроектов доходами от продаж обычных автомобилей с ДВС.

Существуют государства, для которых переход на электромобили невыгоден экономически. России, как экспортеру нефти и газа, невыгоден массовый отказ от бензина. В Международном энергетическом агентстве сделали вывод: масштабная электрификация легкового транспорта провоцирует снижение спроса на нефть.

Полный отказ от автомобилей с ДВС может спровоцировать рост цен и нехватку электроэнергии. Согласно исследованию *Bloomberg NEF*, повсеместное распространение электромобилей приведет к росту электропотребления по всему миру на 6,8 % уже к 2040 г., а в Великобритании — на 20 % к 2050 г. Кроме того, необходима электроэнергия для добычи редкоземельных металлов и производства аккумуляторов.

С точки зрения влияния на парниковый эффект электромобиль не является предпочтительным. Исследования, проведенные Мюнхенским институтом экономических исследований (*IFO*) по сравнению бензинового *Mercedes-Benz* и электрической *Tesla* показали, что углеродный след, включающий выбросы CO_2 при добыче лития, марганца и кобальта и при производстве аккумуляторов в 1,5 раза выше, чем у бензинового *Mercedes-Benz*.

Целью исследования является проведение экологического сравнения автомобиля с ДВС и электромобиля с точки зрения загрязнения атмосферного воздуха при их эксплуатации. Для этого были выбраны автомобили, имеющие сопоставимые параметры: мощность и массу.

Расходы электроэнергии на электромобиле и бензина на автомобиле с ДВС были приняты для условий движения по городу. Производство электроэнергии на ТЭС, необходимое для зарядки электромобиля, было рассчитано с учетом потерь при зарядке в 15 %, потерь в сетях 9,6 % (по статистическим данным), расхода на собственные нужды 15 % и составит 7159 кВт·ч/год. Согласно данным аналитического агентства «Автостат», средний пробег легкового автомобиля в России составляет 16,7 тыс. км в год. Данные для экологического анализа приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Технические данные

Показатель	Электромобиль	Автомобиль с ДВС
Пробег за год	16 700 км/год	16 700 км/год
Удельный расход	280 Вт·ч/км	12 л/100 км
Расход за год	4676 кВт·ч/год	2004 л/год 1503 кг/год
Производство электроэнергии на ТЭС	7159 кВт·ч/год	
Энергия топлива	103,2 ГДж	66,1 ГДж

Загрязнение атмосферного воздуха. Наибольшее количество веществ поступает в атмосферу с отработанными газами автомобилей. Концентрация вредных веществ в атмосферном воздухе пагубно сказывается на состоянии всех участников дорожного движения и в первую очередь на здоровье населения, проживающего вблизи проезжей части.

Состав и количество отработанных газов автомобилей с ДВС определяются: качеством, видом и условиями сгорания топлива; типом, конструк-

цией, качеством регулировки и режимом работы ДВС; моделью, техническими параметрами и степенью изношенности автомобиля; параметрами улично-дорожной сети и др.

Всего в составе выхлопных газов обнаружено более 200 химических веществ, в том числе вредные: оксид и диоксид углерода, летучие органические вещества, оксиды азота, взвешенные вещества.

Расчет выбросов от движущегося автотранспорта по каждому веществу с учетом типа автотранспорта и скорости движения осуществляется по методике [2]. Значение выбросов i -го загрязняющего вещества M_i от автомобиля, движущегося по автодороге протяженностью L (км), определяется по формуле

$$M_i = LM_i^L r_{Vi}, \quad (1)$$

где M_i^L — удельный пробеговый выброс i -го вредного вещества, г/км (табл. 2); r_{Vi} — поправочный коэффициент, учитывающий зависимость изменения количества выбрасываемых загрязняющих веществ от средней скорости движения автотранспортного потока; $r_{Vi} = 1$ для всех веществ при средней скорости 30 км/ч.

Показатель относительной агрессивности вещества зависит от значений предельно допустимой среднесуточной концентрации (ПДКсс), предельно допустимой концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны (ПДКрз), учитывает вероятность накопления в компонентах окружающей среды и вероятность образования в атмосфере вторичных загрязнителей.

В таблице 2 приведены результаты расчета пробеговых выбросов загрязняющих веществ и приведенных выбросов для автомобиля с ДВС.

Электромобиль. При движении электромобиля отсутствуют выбросы вредных веществ в воздух, но процесс получения электроэнергии сопровождается образованием дымовых газов при сжигании топлива. Структура производства электроэнергии в России: ТЭС — 68 %, ГЭС — 20 %, АЭС — 12 %. На электростанциях используется твердое, жидкое и газообразное топливо. Структура использования топлива на ТЭС: газ — 71 %, уголь — 25 %, мазут — 0,5 %, прочие — 3,6 %.

Исходя из величины производства электроэнергии, необходимой для зарядки электромобиля, и удельных выбросов вредных веществ при сжигании топлива на ТЭС ($M_{уд}$) были рассчитаны массы вредных веществ. В таблице 3 приведены результаты расчета выбросов загрязняющих веществ и приведенных выбросов при выработке электроэнергии.

Таблица 2

Выбросы загрязняющих веществ для автомобиля с ДВС

Загрязняющие вещества	Удельные пробеговые выбросы M_i^L , г/км	Пробеговые выбросы M_i , г	Показатель относительной агрессивности A_i	Приведенные выбросы, кг
CO	0,8	13 360	1	13,36
NO ₂	0,3	5010	43	215,43
CH	0,24	4008	0,3	1,202
Сажа	0,005	84	19	1,596
SO ₂	0,006	100	16	1,6
Формальдегид	0,0014	23	240	5,52
Бензапирен	$0,16 \cdot 10^{-6}$	0,0027	502 973	1,358
Всего				240

Таблица 3

Выбросы загрязняющих веществ при производстве электроэнергии для электромобиля

Загрязняющие вещества	Удельный выброс вредных веществ при выработке ЭЭ $M_{уд}$, г/(кВт·ч)	Выброс вредных веществ при выработке ЭЭ M , г	Показатель относительной агрессивности A_i	Приведенные выбросы, кг
CO	0,0043	31	1	0,031
NO _x	1,13	8090	43	347,9
SO ₂	2,85	20 403	16	326,4
Сажа	0,11	787	19	14,9
Всего				689,3

Эмиссия парниковых газов. Большинство ученых считают, что деятельность человека ведет к изменению климата. Глобальное потепление обусловлено влиянием парниковых газов, к которым относятся диоксид углерода и метан. Из общего объема парниковых газов, выбрасываемых в атмосферу, около 50 % приходится на объекты энергетики, работающих на углеводородном топливе. Одним из вариантов сокращения выбросов парниковых газов является внедрение энергоэффективных технологий, к которым можно отнести электротранспорт.

Автомобиль с ДВС. Расчет эмиссии парниковых газов при сжигании топлива в автомобиле с ДВС и при производстве топлива выполнен в соответствии с [3]. Количественное определение выбросов CO₂ для автомобильного транспорта осуществляется расчетным методом на основе данных о расходе топлива за отчетный период и коэффициентах выбросов.

При сжигании бензина образуется углекислый газ. При добыче нефти, ее транспортировке и переработке образуется парниковый газ — метан. Расчеты эмиссии парниковых газов представлены в табл. 4 для годового расхода топлива, равного 1503 кг.

Таблица 4

Эмиссия парниковых газов от автомобиля

Показатель	Коэффициент выбросов	Выбросы парниковых газов, т	Потенциал глобального потепления	Выбросы CO ₂ , т
Сжигание топлива	3,028 т CO ₂ /т	4,551	1	4,551
Производство топлива:				
— добыча нефти	0,05 кг CH ₄ /т	0,075 · 10 ⁻³	21	1,6 · 10 ⁻³
— транспортировка	0,015 кг CH ₄ /т	0,023 · 10 ⁻³	21	0,5 · 10 ⁻³
— переработка	0,015 кг CH ₄ /т	0,023 · 10 ⁻³	21	0,5 · 10 ⁻³
Всего				4,553

Электромотобиль. Расчет эмиссии парниковых газов выполнен с учетом коэффициента углеродоемкости российской электроэнергетики и объема производства электроэнергии, необходимой для движения электромотобилля. В таблице 5 приведены результаты расчета выбросов парниковых газов при выработке электроэнергии.

Таблица 5

Эмиссия парниковых газов электромотобилля

Производство электроэнергии, кВт · ч	Коэффициент выбросов, кг CO ₂ /(кВт · ч)	Выбросы CO ₂ , т
7159	0,449	3,214

Результаты экологических расчетов выбросов загрязняющих веществ и эмиссии парниковых газов при выработке электроэнергии для движения электромотобилля и пробеговые выбросы для автомобиля с ДВС приведены в табл. 6 и на рисунке.

Общая экологическая оценка электромобиля и автомобиля с ДВС

Параметр	Электромобиль	Автомобиль с ДВС
Эмиссия парниковых газов, т CO ₂	3,2	4,6
Приведенные выбросы, кг	689	240

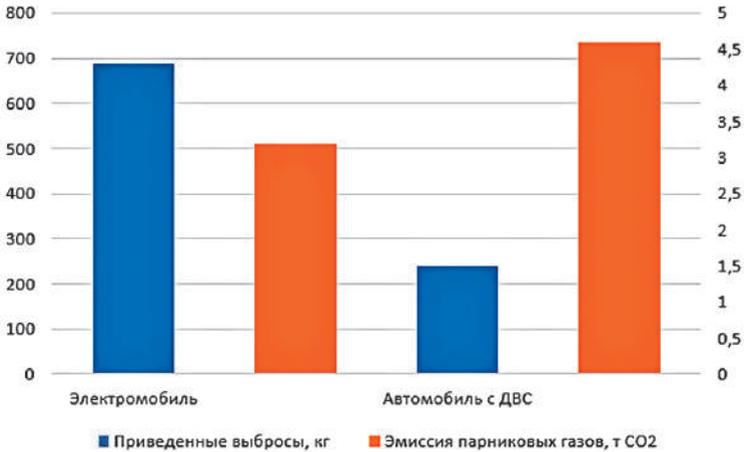


Рисунок. График экологической оценки электромобиля и автомобиля с ДВС

Выводы.

Приведенная масса выбросов загрязняющих веществ выше при производстве электроэнергии на движение электромобиля, чем при движении автомобиля, за счет потерь при зарядке, потерь в сетях, расхода электроэнергии на собственные нужды и низкого КПД электростанций.

Эмиссия парниковых газов ниже в расчете на зарядку электромобиля, поскольку в Российской Федерации значительная доля выработки электроэнергии осуществляется на источниках с низкими удельными выбросами парниковых газов (ГЭС, АЭС, парогазовых установках), а также применяется комбинированная выработка электрической и тепловой энергии.

Загрязнение атмосферы — одна из составляющих загрязнения окружающей природной среды. Суммарное экологическое воздействие электромобиля на гидросферу и почву следует оценивать не только в процессе его эксплуатации, но и в процессе производства электроэнергии.

Литература

1. **Нет, мир не перейдет на электромобили: 5 главных препятствий.** [Электронный ресурс]. URL: <https://mag.auto.ru/article/whynotonlyelectro> (дата обращения 20.05.2022).
2. **Методика** определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха. Утверждена приказом Минприроды России № 804-р от 27.11.2019 г.
3. **Об утверждении** методических указаний и руководства по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации. Приказ Минприроды России № 300 от 30.06.2015 г.
4. **Углеродоемкость** электроэнергии в мире и России. Энергетический бюллетень аналитического центра при правительстве РФ № 72 от 15.05.2019 г.
5. **Ветошкин А.Г.** Процессы инженерной защиты окружающей среды: учебное пособие. Пенза: ПГУ, 2004. 325 с.
6. **Сжигание** топлива на крупных установках в целях производства энергии. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям: справочник. М.: Бюро НДТ, 2017. 271 с.

СЕКЦИЯ 2

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ МЕТОДЫ, ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ

*Д.А. Гапонова, dgaponva@mail.ru,
А.В. Щербakov, ShcherbakovAV@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва*

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ АДДИТИВНОМ ФОРМООБРАЗОВАНИИ

На сегодняшний день в промышленности начинают широко применять технологии аддитивного производства с использованием различных материалов и источников энергии для расплавления подаваемого материала (лазерный луч, электронный пучок, плазменная дуга) [1, 2]. Большой интерес представляет технология электронно-лучевого аддитивного формообразования, поскольку основной областью применения технологии является высокотехнологичный сектор — авиационная и космическая промышленность. Можно выделить основные преимущества технологии:

- низкую стоимость присадочного материала по отношению к металлическому порошку;
- скорость наплавки до 18 кг/ч;
- гибкое управление положением, формой и размерами пятна нагрева за счет применения магнитного поля для отклонения луча, возможность реализации многолучевого нагрева и динамического воздействия на ванну (применение высокочастотной развертки пучка);
- применение вакуумной среды, защищающей материал от испарения легирующих добавок;
- а также экспериментально была доказана возможность применения технологии в условиях невесомости и актуальность в будущих космических миссиях.

Однако технология электронно-лучевого аддитивного формообразования пока еще не внедрена в промышленность, поскольку отсутствуют готовые решения в области систем управления. Все существующие на данном этапе решения и разработки еще не апробированы для промышленного применения либо представляют собой коммерческую тайну зарубежных предприятий [3—5]. По этой причине существует потребность

в разработке эффективных систем управления. В большей части опубликованных работ рассматривают применение различных датчиков для контроля параметров процесса (пирометры и различные камеры для мониторинга температуры, датчики отраженных электронов и лазерные профилометры для измерения расстояния между пушкой и наплавляемой деталью). Ученными и разработчиками в этой области были рассмотрены такие варианты построения систем управления процессом как программируемые системы без обратной связи (использование числового-программного управления локальными регуляторами) и замкнутые системы (применение замкнутых обратных связей). Кроме того, существуют патенты, описывающие полностью готовые решения в области управления процессом наплавки, однако практических данных о работоспособности и динамических свойствах таких систем не опубликовано [6, 7].

К основным параметрам процесса электронно-лучевого аддитивного формообразования относятся:

- мощность электронного пучка;
- размеры пятна нагрева (развертка электронного пучка и его фокусировка);
- скорость подачи проволоки;
- скорость перемещения электронно-лучевой пушки или оснастки.

К возмущающим воздействиям, определяющим дефекты наплавляемого слоя, можно отнести:

- отклонение скорости подачи проволоки от заданной;
- смещение фокусировки при регулировании;
- изменение тепломассопереноса в системе «электронный пучок—металл»;
- зоны повторного нагрева.

Последние два перечисленных возмущающих воздействия являются наиболее частыми причинами возникновения дефектов, поскольку именно они влияют на структуру наплавляемого материала, а также на форму поперечного сечения формируемого валика. Одним из возможных методов контроля этих возмущающих воздействий является применение замкнутой обратной связи по температуре в процессе наплавки.

Схема предлагаемого решения для контроля температуры в процессе показана на рис. 1.

Пирометр расположен на некотором расстоянии за электронным пучком. Сигнал пирометра T_{mes} является сигналом обратной связи и сравнивается с заданной температурой T_{set} . Разность этих сигналов подается в контроллер регулятора тока пучка, который воздействует на источник питания напряжения смещения, подключенный к управляющему электро-

ду электронно-лучевой пушки. Большой интерес представляет расстояние, на котором должен располагаться пирометр. Температура наплавленного валика неоднородна: в точке воздействия электронного пучка она может достигать значений выше 2500 °С, а в точке, расположенной на некотором расстоянии от пучка, температура будет значительно ниже.

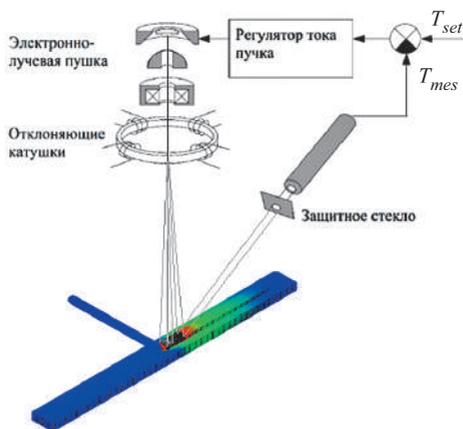


Рис. 1. Схема управления температурой в замкнутом режиме

Для корректной настройки регулятора температуры необходимо выбрать оптимальную точку измерения, в которой будет иметь большую амплитуду превышение температуры из-за влияния зон повторного нагрева. Но в то же время транспортная задержка измерения температуры должна быть минимальна. При увеличении или уменьшении тока пучка температура валика будет изменяться, однако пирометр сможет зафиксировать это изменение с некоторой задержкой, поскольку при движении с постоянной скоростью перемещение от точки воздействия луча до точки измерения займет некоторое время.

Для исследования оптимального расстояния измерения температуры была разработана математическая модель на основе уравнения энергии

$$\rho(T) \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda(T)}{c(T)} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\lambda(T)}{c(T)} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda(T)}{c(T)} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q,$$

где H — энтальпия, Дж/кг; t — время, с; $\rho(T)$ — плотность материала, кг/м³; Q — количество теплоты от внутреннего источника энергии в единицу объема в единицу времени, Вт/м³; x, y, z — декартовы координаты текущей расчетной точки, м; $\lambda(T)$ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$c(T)$ — теплоемкость материала, Дж/(кг·К). Моделировали процесс наплавки цилиндрического изделия диаметром 68 мм и толщиной стенки 4 мм из стали 316L. По длине стенки цилиндра располагались 24 точки, расстояние между которыми было равно 6,7 мм. Данные о температуре в этих точках для каждого момента времени записывали в файл. Для решения задачи была создана программа в среде Microsoft Visual Studio. Шаг по времени составлял 50 мс, шаг расчетной сетки равен 2 мм.

Результаты моделирования приведены на рис. 2. По вертикальной оси отложена температура слоя, по горизонтальной — расстояние от точки расположения электронного пучка. Был смоделирован процесс наплавки восемнадцати слоев, каждому слою присвоен различный цвет. Приведенные зависимости соответствуют моментам времени прохождения электронного луча одной и той же точки на окружности, образующей цилиндрическую стенку и принятой за ноль отсчета.

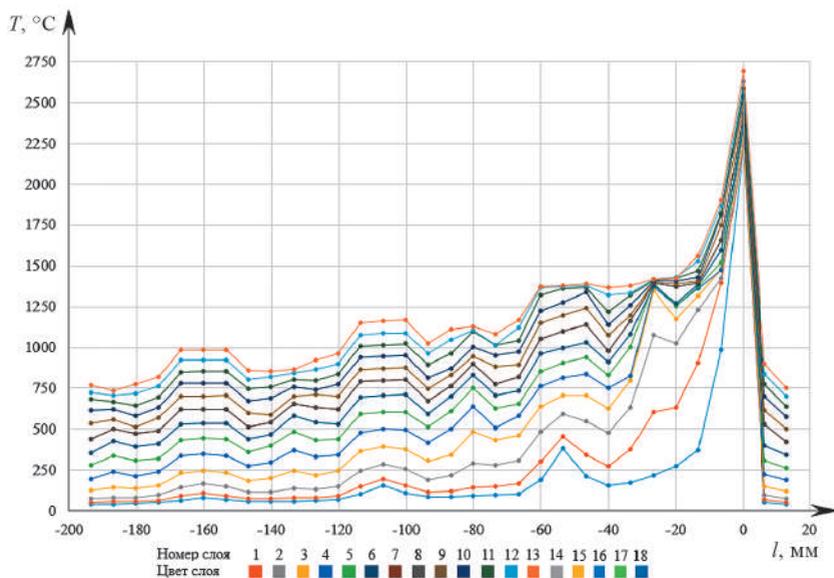


Рис. 2. Зависимость температуры слоя от расстояния от электронного пучка

Температура непосредственно в области действия луча от слоя к слою увеличивалась слабо и составляла в среднем 2650 °C. На расстоянии от -55 мм и далее позади точки нахождения луча температура изменяется равномерно от слоя к слою и увеличивается в среднем на 60 °C за один оборот луча. Ближе к точке расположения луча, на отрезке от -20 мм до

–55 мм температура, напротив, существенно изменяется при наплавке первых четырех слоев: по правой части зависимостей, показанных на рис. 2, видно, что приращение температуры составляет более 200 °С, т.е. при изменении температуры слоя в этой области наилучшим образом выявляется влияние зон повторного нагрева от нижележащих слоев. Следовательно, в процессе экспериментальной реализации системы управления прицеливание пирометра необходимо производить именно в этой области.

Для подтверждения результатов моделирования были проведены экспериментальные исследования по наплавке цилиндрического изделия из стали марки 316L без обратной связи и с обратной связью по температуре. Точка измерения температуры была расположена на расстоянии 1/8 оборота детали. На рисунке 3 приведена та же графическая зависимость с нанесенными на нее значениями, полученными в результате эксперимента (на рис. 3 точки черного цвета). Полученные при проведении эксперимента точки попадают в полученный с помощью моделирования диапазон изменения температуры. На приведенном графике рис. 3 отсутствуют значения, полученные для первого и второго слоев, поскольку используемый пирометр имеет диапазон измерения температур от 600 до 1500 °С, а температура в точке измерения на первых двух слоях не превышала 600 °С.

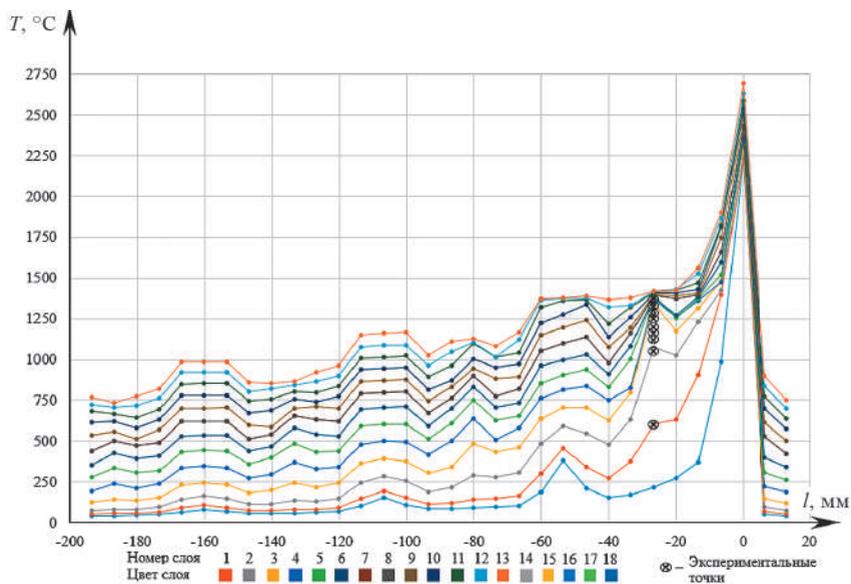


Рис. 3. Зависимость температуры слоя от расстояния от электронного пучка с нанесенными экспериментальными значениями

После проведения необходимых исследований для реализации системы с обратной связью по температуре был проведен эксперимент по наплавке цилиндрического изделия из 54 слоев. В качестве закона регулирования был использован цифровой ПИ-регулятор, который был введен в программу контроллера управления током пучка. Коэффициенты для регулятора были следующими: $K_p = 0,2$, $K_i = 0,02$. Данные, полученные с пирометра и токового шунта источника напряжения смещения во время наплавки, записывали системой сбора данных. На рисунке 4 приведены зависимости тока и температуры от времени в процессе наплавки цилиндра.

Ток в начале процесса наплавки равен 25 мА, затем происходит медленное увеличение тока до 28 мА на первых двух слоях, что связано с тем, что температура хвоста ванны еще не достигла заданной уставки 1000 °С. Когда уставка температуры была достигнута, ток начал постепенно уменьшаться (слои 3—5), далее с шестого слоя ток принимал установившееся значение 19 мА, но рост температуры продолжался, поскольку в программе было введено ограничение минимального значения тока 15 мА. Это ограничение было введено из-за того, что если ток опустится ниже 15 мА, то проволока не будет расплавляться. В силу этого обстоятельства необходимо увеличивать уставку температуры до 1200 °С и подогревать подложку в начале процесса.

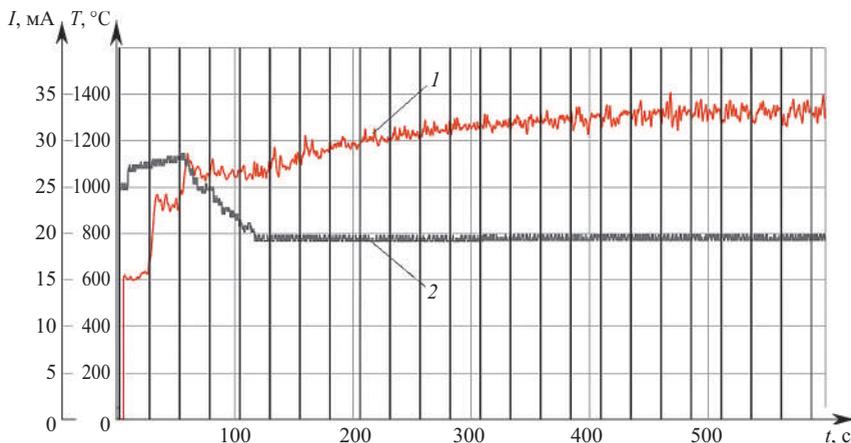


Рис. 4. Зависимость тока и температуры в процессе наплавки:

I — температура; 2 — ток

Макрошлиф получившегося цилиндра приведен на рис. 5. Здесь белыми линиями показаны границы наплавленных слоев, которые не являются

однородными, что свойственно для процесса электронно-лучевого аддитивного формообразования.



Рис. 5. Фото наплавленного цилиндра. Справа — макрошлиф изделия

По макрошлифу изделия видно, что достигается воспроизводимость геометрических размеров валиков от слоя к слою. Однако верхние валики получились немного шире нижних, что связано с введенным ограничением по току. Также необходимо отметить, что полученные в рамках работы результаты применимы для мелкогабаритных изделий; для крупногабаритных деталей, при более высокой скорости подачи присадочного материала, пирометр должен располагаться еще дальше, поскольку влияние зон повторного нагрева особенно сильно ощущается при наплавке массивных деталей.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» при финансовой поддержке Стипендии Президента Российской Федерации СП-2918.2021.1.

Литература

1. **Martina F.** WAAM of refractory metals // Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, Texas, August 2013.
2. **Gibson I., Rosen D., Stucker B.** Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, rapid Prototyping and Direct Digital manufacturing. New York: Springer-Verlag, 2015. 498 p.
3. **Solid** freeform fabrication apparatus and methods / K.M. Taminger, J.K. Watson, R.A. Hafley, D.D. Petersen // Patent US7168935B1, Prior. 02.08.2002.

4. **Stecker S.** Willow Springs, IL (US); Phillip E. Wollenhaupt, Crown Point, IN (US). Electron beam layer manufacturing using scanning electron monitored closed loop. Patent US 8,598,523 B2. Pub date Dec. 3, 2013.
5. **Маркс К.** Капитал. Критика политической экономии. Том 1, Гамбург: Meissner, 1867.
6. **Stecker S.** Willow Springs, IL (US). Electron beam layer manufacturing. Pub. №.: US 2016/0288244A1. Pub date Oct. 6, 2016.
7. **Closed-loop** process control for electron beam freeform fabrication and deposition processes / K.M. Taminger, R.A. Hafley, R.E. Martin, W.H. Hofmeister // Patent US 8,452,073 B2/ Pub date May. 28, 2013.

*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*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ РЕЖИМОВ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ЗАДАННОГО ТИПА КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Современные дуговые сталеплавильные печи переменного тока (ДСП) отличаются разнообразием по уровню удельной мощности и технологии производства стали [1]. Возможность ввода в плавильное пространство большого количества тепла и гибкость в управлении этим вводом являются несомненными достоинствами ДСП по сравнению с другими металлургическими агрегатами производства стали. Большой диапазон мощности и разнообразие современной технологии производства как рядовой, так и специальных видов стали привело к появлению многообразия конструкций ДСП и принципов проектирования режимов их работы. Сложившиеся тенденции в проектировании, производстве и эксплуатации современных ДСП создали для специалистов проблемы в поиске рационального электрического режима, обеспечивающего минимальный уровень дисперсии тока дуги и минимально возможное значение удельного расхода электроэнергии на расплавление шихты [2].

На основе опыта проектирования различных конструкций ДСП и эксплуатации действующих печей с различным уровнем удельной мощности была принята система классификации ДСП по уровню активной мощности установки в основной период плавления шихты (рис. 1) [2, 3].

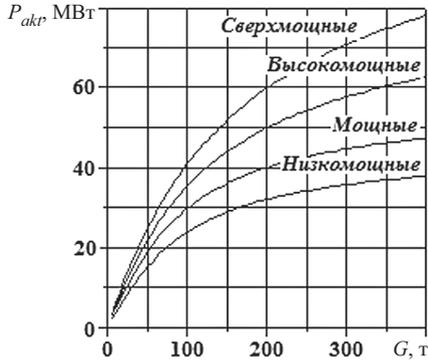


Рис. 1. Классификация конструкций ДСП по уровню активной мощности установки

С целью удобства проектирования каждому типу конструкции ДСП мощно присвоить идентификационный номер n_{pm} :

— тип конструкции «низкомошные ДСП» с футерованным сводом и стенами традиционного типа (имеют условный номер типа конструкции $n_{pm} = 1$);

— «мощные ДСП» ($n_{pm} = 2$) с усиленной термически керамической футеровкой из термостойкого хромагнетита;

— «высокомошные ДСП» ($n_{pm} = 3$) с верхней частью стен из плавнелитого периклазохромитового кирпича;

— «сверхвысокомошные ДСП» ($n_{pm} = 4$): свод из периклазохромитовых кирпичей типа ПХСП, ПХСУТ, ПХСОТ с металлическими вставными водоохлаждаемыми элементами, стены в виде трубчатых холодильников, на внутренней поверхности которых на специальные штыри наносится огнеупорная масса толщиной 40—50 мм, аналогичная используемой в конструкциях «высокомошных ДСП»;

— «сверхвысокомошные ДСП» еще более высокой мощности с охлаждаемыми водой металлическими конструкциями свода и стен (условный номер конструкции $n_{pm} = 5$).

Следует отметить, что применение в конструкции водоохлаждаемых элементов влияет на тепловой режим и условия теплообмена дуги в плавильном пространстве. Однако если за основу проектирования рационального электрического режима, как принято на практике, принимается режим в основной период плавки твердой шихты, то, учитывая соответствующее изменение активной мощности (см. рис. 1), можно принять температурный режим газовой среды и интенсивность теплообмена дуги в

правильном пространстве автомодельными, т.е. одинаковыми независимо от типа конструкции.

Отмеченные на рис. 1 области типа конструкций ДСП имеют границы минимального по технологии плавки P_{\max} и максимального по тепловому режиму конструкции P_{\min} значения активной мощности ДСП в основной период плавки:

$$P_{\max} = k_{\max} \left[\frac{(37,05 + 6,324G_p)}{(1 + 0,2734G_p + 4,9 \cdot 10^{-4} G_p^2)} \right]^2 G_p, \text{ кВт}; \quad (1)$$

$$P_{\min} = k_{\min} \left[\frac{(37,05 + 6,324G_p)}{(1 + 0,2734G_p + 4,9 \cdot 10^{-4} G_p^2)} \right]^2 G_p, \text{ кВт}. \quad (2)$$

Коэффициенты в формулах (1), (2) зависят от показателя типа конструкции n_{pm} (см. рис. 1) и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты k_{\max} и k_{\min} в зависимости от типа конструкции n_{pm}

n_{pm}	1	2	3	4	5
k_{\min}	0,5263	0,692	0,82	1,0	1,3
k_{\max}	0,692	0,82	1,0	1,3	1,625

Рациональный электрический режим ДСП должен обеспечивать минимальный уровень дисперсии тока дуги и минимально возможное значение удельного расхода электроэнергии на расплавление шихты. В отечественной практике проектирования рационального режима ДСП базовой характеристикой является ток дуги I_{pd} , соответствующий максимуму полезной мощности

$$P_{dm} = (P_{\text{пол}})_{\max} = P_{\text{пол}}(I_{pd}). \quad (3)$$

Ток дуги рационального режима, обеспечивающий наибольшую производительность плавки, на практике принимается обычно эмпирически [4] в диапазоне значений

$$I_{rac} = (0,87 \div 0,90)I_{pd}. \quad (4)$$

Методы теплообменной модели электрической дуги ДСП (ТОМЭД ДСП), разработанные в МЭИ и основанные на положениях современной теории нагрева дугой [5], позволяют выполнить аналитический расчет ра-

бочей характеристики удельного расхода электроэнергии на расплавление шихты. Тем самым метод ТОМЭД ДСП позволяет физически обосновано определить значение тока дуги I_{pud} , обеспечивающее минимальное для конкретных параметров эквивалентной схемы значение удельного расхода электроэнергии на расплавление шихты.

Из отмеченного выше условия рациональности электрического режима рациональное значение рабочего тока дуги ДСП в основной период плавки можно рассчитать как

$$I_{rac} = (I_{pd} + I_{pud}) / 2. \quad (5)$$

Таким образом, с учетом предлагаемого решения (5) можно обеспечить физическое обоснование соотношения (4):

$$(k_I)_{rac} = \frac{I_{rac}}{I_{pd}}. \quad (6)$$

Выполненное в МЭИ [6] обобщение характеристик действующих в промышленности ДСП позволило установить однозначную связь коэффициента $(k_I)_{pud} = \frac{I_{pud}}{I_{pd}}$ и коэффициента мощности установки ДСП для рационального режима в основной период плавки с емкостью печи G_p :

$$(k_I)_{pud} = \left(0,29367 + 0,0267G_p^{0,5}\right)^{0,5}; \quad (7)$$

$$(\cos \varphi)_{rac} = \left(1,16536 + 0,006437G_p^{0,5}\right)^{-1}. \quad (8)$$

С учетом (1), (2) и (8) для заданного типа конструкции ДСП емкостью G_p можно определить граничные значения полной мощности установки:

$$(S_p)_{\min} = \frac{P_{\min}}{(\cos \varphi)_{rac}}; \quad (9)$$

$$(S_p)_{\max} = \frac{P_{\max}}{(\cos \varphi)_{rac}}. \quad (10)$$

При рассчитанных граничных значениях полной мощности (9), (10) вторичное напряжение печного трансформатора в основной период плавки зависит от реактивности эквивалентной схемы проектируемой ДСП:

$$X_{pe} = K_X X_{kz}, \quad (11)$$

где K_X — показатель реактивности эквивалентной схемы ДСП; X_{kz} — реактивное сопротивление эквивалентной схемы промышленной ДСП для основной гармоники тока дуги, которое можно определить из опыта короткого замыкания или, для стадии разработки технического задания, предварительно рассчитать по обобщенной формуле в виде функции двух переменных — емкости G_p и типа конструкции n_{pm} проектируемой ДСП:

$$X_{kz} = \exp \left[\frac{1,829 + 0,0507G_p}{1 + 0,05876G_p - 1,2 \cdot 10^{-4}G_p^2} \right] \sqrt{0,96455 + 0,0348365n_{pm}^2}. \quad (12)$$

Показатель реактивности эквивалентной схемы ДСП для основного периода плавки можно рассчитать по обобщенной формуле также в виде функции емкости G_p и типа конструкции n_{pm} проектируемой ДСП [4]:

$$K_X = \frac{1,329(1,0218 + 4,162 \cdot 10^{-4}G_p)}{(0,85 + 0,15n_{pm})^{0,25}} \left[\sqrt{0,29367 + 0,0267\sqrt{G_p}} \right]^{-0,15}. \quad (13)$$

С учетом формул (9)—(13) на стадии проектирования рационального электрического режима ДСП заданной емкости G_p и типа конструкции n_{pm} можно рассчитать граничные значения вторичного линейного напряжения печного трансформатора:

$$(U_{2l})_{\min} = \left[\frac{2\sqrt{2}(S_p)_{\min} X_{pe}}{1 + (0,29367 + 0,0267G_p^{0,5})^{0,5}} \right], \text{ В} \quad (14)$$

$$(U_{2l})_{\max} = \left[\frac{2\sqrt{2}(S_p)_{\max} X_{pe}}{1 + (0,29367 + 0,0267G_p^{0,5})^{0,5}} \right], \text{ В} \quad (15)$$

где S_p выражено в киловольт-амперах; X_{pe} — в миллиомах; G_p — в тоннах.

Ток дуги I_{pd} , соответствующий максимуму полезной мощности (3), с учетом (11) для известных значений вторичного линейного напряжения печного трансформатора U_{2l} можно рассчитать как

$$I_{pd} = \frac{U_{2l}}{\sqrt{6}X_{pe}}. \quad (16)$$

Рациональное значение тока дуги (5) с учетом (7) и (16) можно определить как

$$I_{rac} = I_{pd} \frac{(1 + (k_I)_{pud})}{2}. \quad (17)$$

Таким образом, для среднего между граничными режима плавки ДСП заданного типа конструкции и заданной емкости

$$k_{sr} = \frac{(k_{\min} + k_{\max})}{2} \quad (18)$$

в соответствии с формулой активной мощности ДСП в основной период плавки

$$P_{akt} = k_{sr} \left[\frac{(37,05 + 6,324G_p)}{(1 + 0,2734G_p + 4,9 \cdot 10^{-4}G_p^2)} \right]^2 G_p, \quad (19)$$

формулой полной мощности установки

$$S_p = \frac{P_{akt}}{(\cos \varphi)_{rac}} = \frac{P_{akt}}{(1,16536 + 0,006437G_p^{0,5})^{-1}}, \quad (20)$$

формулой линейного напряжения печного трансформатора

$$U_{2l} = \left[\frac{2\sqrt{2}S_p X_{pe}}{1 + (0,29367 + 0,0267G_p^{0,5})^{0,5}} \right] \quad (21)$$

и формулами (16), (17) можно рассчитать отношение $(k_I)_{rac}$ (6) рационального рабочего тока дуги к току I_{pd} , соответствующему максимуму полезной мощности печи:

$$(k_I)_{rac} = \frac{(1 + (k_I)_{pud})}{2}. \quad (22)$$

В таблице 2 приведены уточненные значения $(k_I)_{rac}$, рассчитанные в качестве примера для типа конструкции ДСП низкой мощности ($n_{pm} = 1$). Значения $(k_I)_{rac}$ определены для среднего между граничными режима плавки (18) при заданных предварительных значениях реактивного сопротивления эквивалентной схемы ДСП для основной гармоники тока дуги (12).

Значения $(k_p)_{rac}$ в печах емкостью от 12 до 200 т

G_p , т	12	25	50	100	200
$(k_p)_{rac}$	0,8107	0,8268	0,8473	0,8744	0,91
X_{kz} , МОм	4,24	3,645	3,317	3,37	4,503

Рассчитанные по (22) физически обоснованные значения $(k_p)_{rac}$ для ДСП емкостью 100 и 200 т совпадают с принятым из опыта наладки и эксплуатации ДСП [4] значением $(k_p)_{rac}$ (4). Данное совпадение позволяет заключить, что приведенные в [4] значения $(k_p)_{rac}$ (4) относятся к ДСП-100 и ДСП-200 низкой мощности. Для других вариантов типа конструкции и емкости ДСП на стадии проектирования необходимы уточняющие расчеты по изложенному методу параметров рационального режима, обеспечивающего наибольшую производительность плавки.

Предложенный метод расчета граничных параметров рационального электрического режима ДСП заданной емкости G_p и типа конструкции n_{pm} открывает возможность решения на стадии проектирования вариационной задачи физически обоснованного выбора электрических параметров рационального режима, обеспечивающего наибольшую производительность плавки, в печах емкостью от 12 до 200 т. Изложенный в статье метод позволяет скорректировать параметры рационального электрического режима после уточнения значения реактивного сопротивления эквивалентной схемы промышленной ДСП для основной гармоники тока дуги из проведенного опыта короткого замыкания в процессе пусконаладочных работ. Решение задачи выбора рационального электрического режима ДСП позволяет улучшить показатели энергоэффективности печи и прежде всего снизить удельный расход электроэнергии на выплавку стали.

Литература

1. **Рябов А.В., Чуманов И.В., Шишимиров М.В.** Современные способы выплавки стали в дуговых печах. М.: Теплотехник, 2007. 192 с.
2. **Дуговые печи:** учебное пособие для вузов / А.И. Алиферов, Р.А. Бикеев, Л.П. Горева и др. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 204 с.
3. **Кручинин А.М.** К вопросу проектирования электрического режима дуговой сталеплавильной печи на основе теплообменной модели дуги // Электрометаллургия. 2010. № 7. С. 2—8.
4. **Луценко В.Т., Павлов В.А., Докшицкая А.И.** Дуговая сталеплавильная печь: учебное электронное текстовое издание. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ—УПИ, 2005. 41 с.

5. **Прогнозирование** расхода электрической энергии при наладке энергосберегающего электрического режима дуговых сталеплавильных печей / А.М. Кручинин, М.Я. Погребиский, Е.С. Рязанова, А.Ю. Чурсин // Электromеталлургия. № 11. 2018. С. 16—22.
6. **Определение** рациональных электрических режимов промышленных дуговых сталеплавильных печей / А.М. Кручинин, М.Я. Погребиский, Е.С. Рязанова, А.Ю. Чурсин // Вестник МЭИ. № 3. 2021. С. 51—57.

*М.М. Крутянский, mkrut1931@gmail.com,
С.М. Нехамин, NekhaminSM@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва*

МЕТОД РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СВАРКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕРАСХОДУЕМЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Задачей настоящей работы является расчет параметров процесса сварки электрической дугой постоянного тока с нерасходуемым электродом прямой полярности, при котором свариваются две полубесконечные плоские стальные плиты. Плиты сдвинуты вплотную друг к другу; анодное пятно дуги расположено симметрично относительно линии разграничения плит. Высокий удельный тепловой поток ψ_s , поступающий из дуги в металл плит, вызывает образование локальной общей ванны расплавленного металла на наружных поверхностях обеих плит. При движении пятна дуги по линии разграничения плит ванна расплавленного металла перемещается вслед за пятном. При этом в каждой локальной зоне на поверхности плит металл обеих плит при прохождении пятна сначала проплавляется на определенную глубину $\Delta_{ж}$, а затем, после прохождения пятна, кристаллизуется, образуя металл сварного шва.

В настоящей работе тепловой процесс при сварке рассматривается как частный случай нестационарного процесса распространения тепла путем теплопроводности в полубесконечной плоской стальной плите в результате ее нагрева через анодное пятно дуги для случаев, когда анодное пятно дуги неподвижно, и для случаев, когда анодное пятно движется со скоростью v .

Параметры сварочного процесса по характеру их протекания можно разделить на исходные, которые может выбрать и назначить оператор, и на зависимые от них конечные параметры, которые требуется обеспечить и поддерживать в процессе сварки.

К исходным параметрам следует отнести ток I и длину L используемой электрической дуги, толщину $2S$ и физические свойства материала подлежащих сварке плит: температуру плавления $t_{\text{плав}}$, температуру кипения $t_{\text{кип}}$, коэффициент теплопроводности λ , коэффициент температуропроводности a .

Конечными параметрами процесса сварки являются температура металла в анодном пятне дуги t_m , напряжение дуги U , радиус анодного пятна дуги r_a , полная мощность дуги P , мощность, передаваемая дугой в металл свариваемых плит P_a (далее — анодная мощность дуги), удельный тепловой поток, действующий на металл свариваемых плит в анодном пятне дуги ψ_a , удельный тепловой поток, поступающий в металл свариваемых плит через анодное пятно дуги ψ_s , толщина $\Delta_{\text{ж}}$ и ширина $H_{\text{ж}}$ сварного шва.

Основной показатель процесса — скорость сварки v — в зависимости от постановки задачи расчета в одних случаях может быть конечным, а в других — исходным параметром процесса.

В настоящей работе расчет показателей нестационарного процесса сварки сводится к установлению зависимостей между исходными и конечными параметрами этого процесса.

Расчет параметров теплообмена между дугой и поверхностью свариваемых плит при неподвижной дуге. Для расчета параметров теплообмена между дугой и поверхностью свариваемых плит при неподвижной дуге можно использовать соотношение из работы [1], где в общем виде приведено выражение для температур точек в теле свариваемых плит в виде бесконечного ряда, члены которого являются функциями двух безразмерных переменных величин: $\frac{z}{S}$ и числа Фурье $Fo = \frac{a\tau}{S^2}$, где z — расстояние от поверхности пластины под анодным пятном дуги до рассматриваемой точки в теле пластины толщиной $2S$, так что $\frac{z}{S} = (0 \div 1)$; a — коэффициент температуропроводности материала плит, $\text{м}^2/\text{с}$; τ — время нагрева, с.

При расчетах обычно используют предварительно рассчитанные номограммы зависимости между числом Фурье и температурой фиксированных точек в теле пластины. При этом определение параметров теплообмена становится трудоемким и при инженерных расчетах, как правило, не выполняется.

В частных случаях, когда число Фурье $Fo \geq 0,3$, наступает режим теплообмена, при котором температурные перепады между отдельными точками в теле свариваемой пластины остаются неизменными во времени. Такой режим получил название регулярного.

Согласно работе [1], при регулярном режиме нагрева температура в теле плиты описывается выражением

$$t = \frac{\Psi_s S}{2} \left[\frac{2a\tau}{S^2} + \left(\frac{S-z}{S^2} \right)^2 - \frac{1}{3} \right], \quad (1)$$

где Ψ_s — удельный тепловой поток, поступающий из дуги в плиту; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); z — расстояние по нормали от поверхности в глубину плиты, м.

Выражение (1) можно использовать при расчетах параметров процесса сварки дугой постоянного тока. В этом случае, полагая $\frac{2a\tau}{S^2} = 0,6$ и $z = 0$, находим значение температуры под анодным пятном дуги на поверхности плиты как

$$t_{\text{пов}} = t_m = \frac{\delta_{\text{пов}} \Psi_s S}{2\lambda}, \quad (2)$$

где $\delta_{\text{пов}} = 1,27$.

Отсюда

$$\Psi_s = \frac{2\lambda t_m}{S\delta_{\text{пов}}}.$$

Обозначим через $t_{\text{плав}}$ температуру плавления материала плиты, а через $\Delta_{\text{ж}}$ — глубину лунки жидкого металла под анодным пятном дуги. Тогда в соответствии с (1) можно записать

$$t_{\text{плав}} = \frac{\Psi_s S}{2\lambda} \left[\left(\frac{S - \Delta_{\text{ж}}}{S} \right) + \delta_o \right],$$

и с учетом (2) глубина лунки жидкого металла под анодным пятном дуги (глубина сварного шва) определится так:

$$\Delta_{\text{ж}} = S \left(1 - \left(\left(\frac{\delta_{\text{пов}} t_{\text{плав}}}{t_m} \right) - \delta_o \right)^{0,5} \right). \quad (3)$$

Следует отметить, что в соответствии с выражением (3) максимальная глубина сварного шва при сварке стальных плит $\Delta_{\text{ж Fe}} = 0,372S$, при сварке медных плит $\Delta_{\text{ж Cu}} = 0,461S$, при сварке плит из алюминия $\Delta_{\text{ж Al}} = 0,693S$.

Рассмотрим возможные вариации параметров S и v при регулярном режиме электродуговой сварки с нерасходуемым электродом. Как указано выше, при регулярном режиме число Фурье должно удовлетворять условию $Fo \geq 0,3$. Применительно к условиям сварки это условие следует записать как

$$Fo = \frac{a}{vS} \geq 0,3.$$

Отсюда следует, что при регулярном режиме

$$vS \leq \frac{a}{0,3} = \frac{23,8 \cdot 10^{-3}}{0,3} = 0,079,$$

поэтому если описанным выше методом нецелесообразно сваривать стальные плиты толщиной S меньше 0,0015 м, то максимально допустимая скорость сварки $\left(v \leq \frac{0,079}{0,0015} \right)$ при этом не должна превышать 52,7 м/ч. Второй крайний случай: по соображениям минимально допустимой производительности процесса сваривать стальные плиты со скоростью меньше 3 м/ч нецелесообразно. Тогда описанным методом целесообразно сваривать стальные плиты толщиной $S \leq \frac{0,0079}{3} = 0,026$.

Результаты расчетов глубины сварного шва $\Delta_{жFe}$ по выражению (3) приведены ниже для теплотехнически тонких стальных плит толщиной 2S до 12 мм. Используемые при расчетах физические свойства некоторых металлов приведены в таблице.

Таблица

Усредненные физические свойства некоторых металлов при сварке

Материал	Диапазон температур, °С	Температура плавления $t_{\text{плав}}$, °С	Температура кипения $t_{\text{кип}}$, °С	Удельный коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·град.)	Коэффициент температуропроводности a , м ² /ч
Сталь низкоуглеродистая	700 ÷ 1000	1450	2862	30	$23,8 \cdot 10^{-3}$
Медь	—	1080	2562	380	0,182
Алюминий	—	660	2519	237	0,140

В настоящей работе рассматриваются регулярные режимы, при которых генерируемый дугой удельный тепловой поток Ψ_a через анодное пятно дуги теплопроводностью отводится в плиты на глубину S в виде удельного теплового потока Ψ_s . Поэтому ниже рассматриваются только режимы, при которых

$$\Psi_a = \Psi_s. \quad (4)$$

При выполнении дальнейших расчетов требовалось найти зависимости удельных тепловых потоков Ψ_a и Ψ_s от величины тока дуги I . Для нахождения этой зависимости использованы результаты работ [5—10], в которых рассматриваются энергетические параметры дуги постоянного тока.

Напряжение и электрическое сопротивление сварочной дуги. При расчетах электрического режима сварочной дуги можно использовать полученные для дуговых печей постоянного тока известные соотношения (вольт-амперные характеристики) между током I , напряжением U , длиной дуги L и среднемассовой температурой шихты в процессе ее плавления в печи [5, 9].

Согласно [10] для расчета напряжения сварочной дуги используем выражение

$$U = 8 + BI^\alpha + ALI^{\alpha-0,5}, \quad (5)$$

где U — напряжение дуги в вольтах; I — ток дуги в амперах; L — длина дуги в метрах;

$$A = 3130 - 5650T \cdot 4565T^2 - 1215T^3; \quad (6)$$

$$B = 1,3 - T^2;$$

$$\alpha = 0,47 + 0,03T^2;$$

$$T = \frac{t_m}{t_{\text{кип}}},$$

где t_m — температура металла свариваемых плит в анодном пятне дуги, °С; $t_{\text{кип}}$ — температура кипения свариваемого материала, °С.

Соотношение (5) позволяет при известном токе и напряжении дуги считать ее длину:

$$L = \frac{(U - BI^\alpha - 8)}{AI^{\alpha-0,5}}.$$

В соответствии с (5) напряженность электрического поля в столбе дуги можно записать в виде

$$\frac{\partial U}{\partial L} = E = AI^{\alpha-0,5}, \text{ В/м}, \quad (7)$$

а наклон вольт-амперной характеристики в виде

$$\frac{\partial U}{\partial L} = \alpha I^{\alpha-1} \left[B + \left(1 - \frac{0,5}{\alpha} \right) \frac{AL}{I^{0,5}} \right], \text{ В/А}.$$

Выражение (7) можно использовать для регулирования напряжения дуги U в процессе сварки. При автоматической сварке в этом случае регулятор перемещения сварочного электрода настраивается на перемещение электрода на величину

$$\Delta L = \frac{\Delta U}{AI^{\alpha-0,5}}.$$

На рисунке 1 в графической форме представлена зависимость напряжения дуги от тока дуги при вариациях температуры t_m . Эта зависимость имеет слабо возрастающий характер, причем градиент напряжения дуги $\frac{\Delta U}{\Delta I}$ снижается при увеличении тока дуги и температуры t_m в анодном пятне дуги.

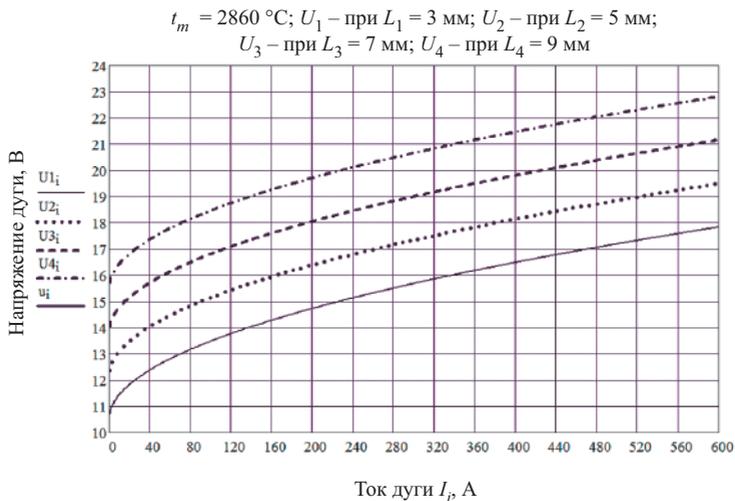


Рис. 1. Зависимость напряжения сварочной дуги U от величины тока дуги I при вариациях длины дуги L и неизменной температуре металла t_m в анодном пятне дуги

Радиус анодного пятна сварочной дуги. Радиус r_a анодного пятна сварочной дуги постоянного тока является функцией тока I_d и температуры t_m материала, подвергаемого сварке в анодном пятне.

В работе [5] спектральными методами выполнены измерения температуры плазмы по длине и сечению столба дуги, открыто горящей в атмосфере аргона на постоянном токе до уровня 1200 А. Полученные результаты были затем использованы при подборе светофильтров и фотографировании токопроводящей зоны дуги. Путем обработки этих фотографий было установлено, что начальный участок дуги имеет конусную форму; были определены наружные размеры дуги как функции тока и температуры материала в анодном пятне.

По результатам этих измерений при дальнейших расчетах параметров относительно коротких сварочных дуг зависимость радиуса анодного пятна дуги r_a от тока дуги I аппроксимирована эмпирическим соотношением

$$r_a(I, t_m) = \frac{0,217I^{0,5}}{A(t_m)},$$

где величина $A(t_m)$ описывается соотношением (6).

Мощность и удельный тепловой поток в анодном пятне сварочной дуги. Величины мощности электрической дуги постоянного тока, а также мощности, передаваемой расплавляемому металлу через анодное пятно дуги, рассмотрены в ряде работ [5—14].

В работе [5] исследовался процесс теплопередачи на аноде сильноточной (до 1200 А) дуги постоянного тока в атмосфере аргона. Анодом служила водоохлаждаемая медная пластина. Мощность, передаваемая дугой в пластину, непосредственно измерялась путем калориметрирования. Результаты этих измерений с относительной погрешностью до 10 % описываются соотношением

$$P_a = \eta_a P, \quad (8)$$

где P — мощность дуги; P_a — мощность, передаваемая из дуги в материал анода.

Коэффициент η_a в формуле (8) хорошо аппроксимируется гиперболой вида

$$\eta_a = \frac{10^2}{(8\Lambda + 155)}, \quad (9)$$

где относительная длина дуги

$$\Lambda = \frac{L}{r_a}, \quad (10)$$

где L — длина дуги, мм; r_a — радиус анодного пятна сварочной дуги, мм.

Подставим в соотношение (10) выражение для радиуса анодного пятна дуги r_a через ток дуги:

$$r_a(I, t_m) = \frac{0,2175I^{0,5}}{A},$$

а затем полученное выражение для Λ подставим в формулу (9) и найдем, что

$$\eta_a = \frac{0,645I^{0,5}}{(I^{0,5} + 0,2373LA)}. \quad (11)$$

В этой формуле относительная доля мощности η_a , передаваемой из дуги в материал свариваемой плиты, выражена через ток и длину дуги и через величину параметра A зависит от температуры t_m в анодном пятне дуги. Для дуги длиной 5 мм при t_m в интервале (1600 ÷ 2860) °С и при росте тока (5 ÷ 600) А коэффициент η_a возрастает от 0,4 до 0,62 относительных единиц.

Теперь запишем: мощность сварочной дуги $P = UI$;

мощность, передаваемая из дуги в материал анода, $P\eta_a = UI\eta_a$;

удельный тепловой поток в анодном пятне дуги $\Psi_a = \frac{P_a}{\pi r_a^2}$.

С учетом выражения для радиуса анодного пятна дуги r_a находим, что

$$\Psi_a = \frac{4,34UA^2I^{0,5}}{[I^{0,5} + 0,2373LA]}, \text{ Вт/м}^2. \quad (12)$$

Результаты расчетов удельного теплового потока Ψ_a в анодном пятне дуги в зависимости от тока I и длины дуги L представлены на рис. 2.

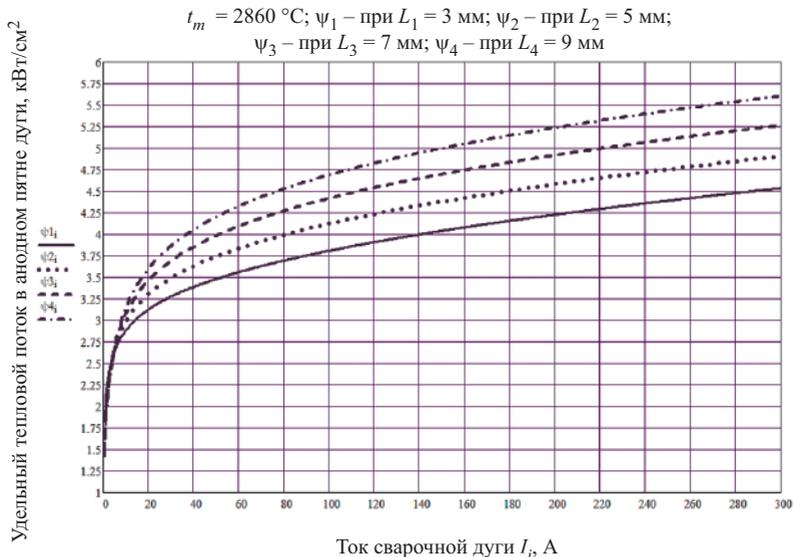


Рис. 2. Зависимость удельного теплового потока ψ_a в анодном пятне дуги от тока дуги I при вариациях длины дуги L и при неизменной температуре металла t_m в анодном пятне дуги

Теплообмен между дугой и свариваемыми плитами при подвижной дуге. В этом случае для анализа теплообмена используется аналитическая теория нестационарного теплового потока, порожденного движущимся источником тепла [4, 12].

При расчетах тепловых сварочных процессов ниже используется приведенное в работе [4] следующее соотношение:

$$t = \frac{Q1Q2\delta_{\text{пов}}\Psi_s S}{2\lambda}, \quad (13)$$

где t — температура металла под дугой на поверхности свариваемых плит; параметры ψ_s , S , λ , $\delta_{\text{пов}}$ указаны выше; $Q1$ — безразмерный коэффициент при расчете температуры на линии движения дуги впереди и сзади от анодного пятна; $Q2$ — безразмерный коэффициент при расчете температуры металла t_m в анодном пятне дуги.

В работе [4] множитель $Q1$ представлен в виде

$$Q1 = \exp\left(-\left(\frac{v}{2a}\right)h\right), \quad (14)$$

где h — длина отрезка на поверхности свариваемых плит в направлении движения дуги между границей анодного пятна дуги и точкой с фиксированной температурой $t_{\text{плав}}$. Согласно выражению (14) при неподвижной дуге, когда $v = 0$, множитель $Q1 = 1$.

Это выражение позволяет выполнить расчет температуры поверхности свариваемых плит на линии сварки впереди и сзади от движущегося со скоростью v анодного пятна дуги. В частном случае, при фиксированном значении температуры $t_{\text{плав}}$, это выражение позволяет представить зависимость между скоростью сварки v и длиной ванны жидкого металла перед анодным пятном дуги h в виде

$$h = 2a \frac{[\ln(t_m) - \ln(t_{\text{плав}})]}{v}. \quad (15)$$

Оценим соотношение между длинами ванны жидкого металла впереди и сзади от движущегося анодного пятна дуги. Температура в точках перед движущимся анодным пятном дуги при прочих равных условиях обусловлена теплопроводностью материала плиты. Температура в точках позади движущегося анодного пятна обусловлена менее интенсивным процессом остывания материала после прохождения анодного пятна с высокой температурой t_m .

Рассмотрим ситуацию, когда при прочих равных условиях неподвижное анодное пятно начинает двигаться со скоростью v . С учетом выражения (14) будем фиксировать положение границ ванны жидкого металла относительно границы анодного пятна в начале и в конце интервала времени $\Delta\tau = h/v$, за которое анодное пятно перемещается на h метров. В начале интервала граница ванны жидкого металла со всех сторон проходила на расстоянии h . В конце интервала времени $\Delta\tau$ граница ванны жидкого металла впереди движущегося пятна будет по-прежнему находиться на расстоянии h . Граница жидкой ванны позади движущегося пятна дуги в конце интервала $\Delta\tau$ из-за перемещения пятна за это время на величину h оказывается на расстоянии $\Delta = (h + \xi)$ от пятна. Величина ξ обусловлена остыванием металла после прохождения анодного пятна дуги. Если интервал времени $\Delta\tau \leq 1$ с, то можно принимать, что $\xi = h$ и $\Delta = 2h$. В случаях, когда $\Delta\tau \gg 1$ с, можно считать, что $\xi = 0$ и $\Delta = h$. Таким образом, при движении анодного пятна дуги со скоростью v (т.е. при скорости сварки v), общая длина ванны жидкого металла будет в первом случае составлять $X = 3h + 2r_a$, а во втором случае $X = 2h + 2r_a$.

Зависимости длины жидкой ванны X от скорости сварки v и температуры металла в анодном пятне дуги t_m показаны на рис. 3. Приведем не-

которые результаты расчета для условий, когда $X = 2h + 2r_a$. Если ток дуги $I = 600$ А и $t_m = 1300$ °С, то, как показано на рис. 3, при скорости сварки $v = 6$ м/ч (1,67 мм/с) длина жидкой ванны $X = 6$ мм, а время прохождения ванны расплавленного металла через фиксированную точку на линии движения ванны $\tau = X/v = 6/1,67 = 3,6$ с. При скорости сварки $v = 12$ м/ч (3,33 мм/с) на графике указаны $X = 6,8$ мм и $\tau = 6,8/3,33 = 2,04$ с.

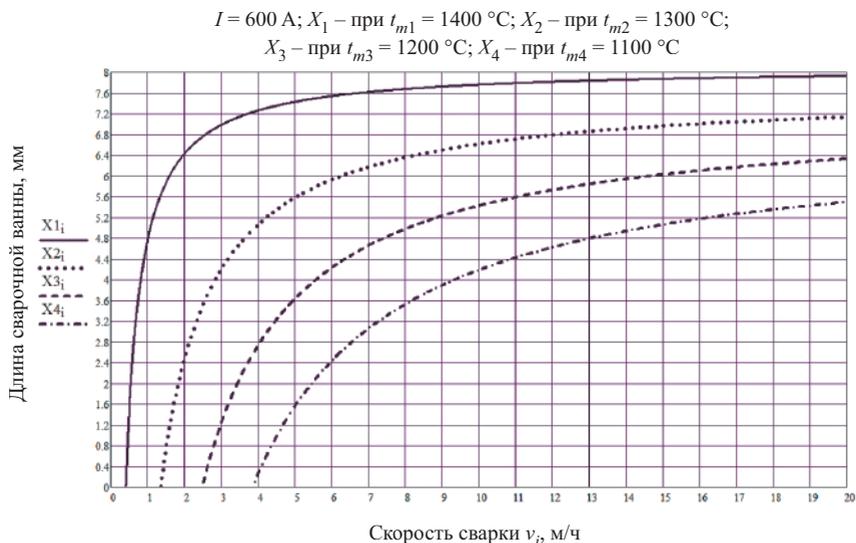


Рис. 3. Зависимость длины движущейся ванны жидкого металла X от скорости сварки v при вариациях температуры металла t_m в анодном пятне дуги и при неизменном значении тока дуги I

Множитель Q_2 в формуле (13) при расчетах параметров сварки в соответствии с работой [4] можно представить как

$$Q_2 = K_o \left[\left(\frac{vr_a}{2a} \right) + 0,457 \right], \quad (16)$$

где K_o — модифицированная функция Бесселя.

При неподвижной дуге, когда $v = 0$, множитель $Q_2 = K_o(0,457) = 1$. Если скорость $v > 0$, то функция $K_o < 1$ и с ростом скорости v снижается по гиперболе.

Теперь с учетом соотношения (3) выражение для температуры на линии движения дуги можно в окончательном виде записать в виде

$$t = \delta_{\text{пов}} \Psi_a \left(\frac{S}{2} \right) \exp \left(-\left(\frac{v}{2a} \right) h \right) K_0 \left[\left(\frac{vr_a}{2a} \right) + 0,457 \right], \quad (17)$$

а для температуры в анодном пятне дуги

$$t_m = \delta_{\text{пов}} \Psi_a \left(\frac{S}{2} \right) K_0 \left[\left(\frac{vr_a}{2a} \right) + 0,457 \right]. \quad (18)$$

Для удобства вычислений при проведении дальнейших расчетов аппроксимируем функцию $K_0(G)$ гиперболой вида

$$K(G) \approx \frac{0,4095}{\left[\left(\frac{vr_a}{2a} \right) + 0,457 \right]^{1,14}}. \quad (19)$$

При скорости сварки до 40 м/ч и токах дуги до 600 А относительная разница между значениями функций $K(G)$ и $K_0(G)$ не превышает 7 %.

Выражение (19) после некоторых преобразований позволяет получить соотношение для расчета скорости сварки v .

Для этого с учетом выражений (3), (18) и (19) запишем:

$$\frac{2\lambda t_m}{\Psi_a S \delta_{\text{пов}}} = \frac{0,4095}{\left[\left(\frac{vr_a}{2a} \right) + 0,457 \right]^{1,14}}. \quad (20)$$

Обозначим

$$n = \frac{0,4095}{\left[\left(\frac{vr_a}{2a} \right) + 0,457 \right]^{1,14}}, \quad (21)$$

тогда $n^{0,8772} = \frac{0,457}{\left[\left(\frac{vr_a}{2a} \right) + 0,457 \right]}$, откуда окончательно находим

$$v = \frac{0,914a(1 - n^{0,8772})}{r_a n^{0,8772}}. \quad (22)$$

Выражение (22) позволяет в явном виде рассчитывать величины и зависимости между указанными выше основными параметрами процесса свар-

ки электрической дугой постоянного тока с нерасходуемым электродом: скоростью сварки v , током дуги I , длиной дуги L , толщиной $2S$ свариваемых плит, температурой t_m в анодном пятне дуги, температурой плавления $t_{\text{плав}}$ и кипения $t_{\text{кип}}$ металла свариваемых плит.

Заметим, что одна и та же температура металла t_m в анодном пятне дуги при неподвижной дуге согласно формуле (3) обеспечивается удельным тепловым потоком

$$t_m = \frac{\Psi_s \delta_{\text{пов}} S}{2\lambda},$$

а при движущейся дуге с учетом соотношений (18),(19) и (21) — потоком

$$t_m = \frac{n\Psi_a \delta_{\text{пов}} S}{2\lambda}.$$

Отсюда следует, что

$$\Psi_s = n\Psi_0, \quad (23)$$

где $n \leq 1$ и согласно с формулой (3.8)

$$\Psi_a = \frac{4,34UA^2 I^{0,5}}{\left[I^{0,5} + 0,2373LA \right]}.$$

Поэтому для вычисления скорости сварки v сначала находим ψ_a по (12) и ψ_s по (3), затем по формуле (21) рассчитываем n , после чего по (22) вычисляем скорость сварки v .

В качестве примера приведем последовательный ход расчета зависимости скорости сварки v от тока сварочной дуги I при вариациях полутолщины S свариваемых плит, выполненного при использовании программы MathCAD 11 и представленного на рис. 4. Исходные параметры для расчета:

длина дуги $L = 0,003$ м;

температура металла в анодном пятне дуги $t_m = 2860$ °С;

безразмерный расчетный коэффициент $\delta_{\text{пов}} = 1,37$;

физические свойства и размеры свариваемых плит: $a = 23,8 \cdot 10^{-3}$ м²/ч; $\lambda = 30$ Вт/(м·град); $t_{\text{кип}} = 2862$ °С; $S1 = 0,007$ м; $S2 = 0,006$ м; $S3 = 0,005$ м; $S4 = 0,004$ м;

безразмерные коэффициенты при расчетах напряжения дуги:

$$T = \frac{t_m}{t_{\text{кип}}}; \quad A = 3130 - 5650T + 4565T^2 - 1215T^3; \quad B = 1,3 - T^2;$$

$$\alpha = 0,47 + 0,03T^2; \quad \gamma = \alpha - 0,5.$$

$L = 3 \text{ мм}; t_m = 2860 \text{ °C}; v_1 - \text{при } S_1 = 7 \text{ мм}; v_2 - \text{при } S_2 = 6 \text{ мм};$
 $v_3 - \text{при } S_3 = 5 \text{ мм}; v_4 - \text{при } S_4 = 4 \text{ мм}$

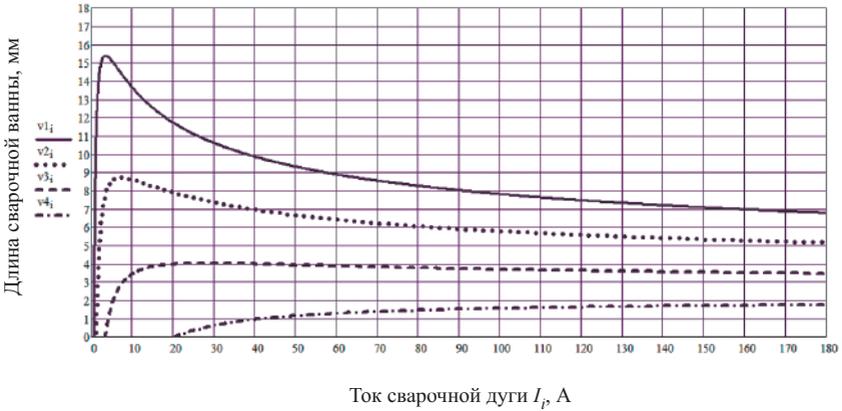


Рис. 4. Зависимость скорости сварки v от тока сварочной дуги I при вариациях толщины S стальных свариваемых плит и при неизменных величинах длины дуги L и температуры t_m в анодном пятне дуги

Запишем процедуру изменения тока дуги:

$$N := 10000 \quad i := 1..N \quad I_i := i \cdot \frac{600}{N}$$

Записываем процедуру расчета параметров сварки:

$$U_i := 8 + B \cdot (I_i)^\alpha + (I_i)^\gamma \cdot A \cdot L.$$

$$\Psi_{a_i} = \frac{4,34 \cdot A^2 \cdot U_i \cdot (I_i)^{0,5}}{(I_i)^{0,5} + 0,2375 \cdot L \cdot A}$$

$$ra_i := 0,2175 \cdot \frac{(I_i)^{0,5}}{A}.$$

$$\Psi_{S1} := \frac{t_m \cdot 2 \cdot \lambda}{S1 \cdot \delta_{пов}} \quad \Psi_{S2} := \frac{t_m \cdot 2 \cdot \lambda}{S2 \cdot \delta_{пов}} \quad \Psi_{S3} := \frac{t_m \cdot 2 \cdot \lambda}{S3 \cdot \delta_{пов}} \quad \Psi_{S4} := \frac{t_m \cdot 2 \cdot \lambda}{S4 \cdot \delta_{пов}}$$

$$m1_i := \frac{\Psi_{S1}}{\Psi_{a_i}} \quad m2_i := \frac{\Psi_{S2}}{\Psi_{a_i}} \quad m3_i := \frac{\Psi_{S3}}{\Psi_{a_i}} \quad m4_i := \frac{\Psi_{S4}}{\Psi_{a_i}}$$

$$n1_i := (m1_i)^{0,8773}; \quad n2_i := (m2_i)^{0,8773};$$

$$n3_i := (m3_i)^{0,8773}; \quad n4_i := (m4_i)^{0,8773}$$

$$v1_i := 0,914 \frac{a}{ra_i} \cdot \frac{(1-n1_i)}{n1_i}; \quad v2_i := 0,914 \frac{a}{ra_i} \cdot \frac{(1-n2_i)}{n2_i};$$

$$v3_i := 0,914 \frac{a}{ra_i} \cdot \frac{(1-n3_i)}{n3_i}; \quad v4_i := 0,914 \frac{a}{ra_i} \cdot \frac{(1-n4_i)}{n4_i}.$$

Результаты этих расчетов показывают, что, поддерживая постоянными длину сварочной дуги $L = 3$ мм и температуру в анодном пятне дуги $t_m = 2860$ °С, можно осуществлять сварку стальных плит толщиной $2S = (8 \div 14)$ мм со скоростью $v = (0 \div 15)$ м/ч. Регулировать скорость сварки можно регулируя величину тока сварочной дуги.

Аналогичным путем были выполнены расчеты зависимостей между параметрами сварки для рисунков 1—3 и 5—7.

Особого внимания заслуживают результаты расчетов температуры t_m , представленные на рис. 7. Эти результаты показывают, что электрическую дугу постоянного тока с нерасходуемым электродом в некоторых случаях можно использовать не только для сварки, но также для термообработки, позволяющей ликвидировать остаточные термические напряжения в сварочном шве после сварки плит из легированной стали. На этом рисунке, а также на рис. 3 показано, что параметры режима термообработки по уровню температуры t_m и по длительности воздействия τ может регулировать оператор процесса, существенно меняя скорость сварки v и ток дуги I .

На рисунке 7 показано как можно регулировать температуру термообработки сварочного шва t_m . Так, например, термообработку сварочного шва при температуре $t_m = 900$ °С можно осуществлять при токе дуги $I = 300$ А и при скорости сварки $v = 8,5$ м/ч, или при $I = 100$ А и $v = 15$ м/ч, или при $I = 40$ А и $v = 24$ м/ч, или при $I = 18$ А и $v = 34$ м/ч. Термообработку сварочного шва при температуре $t_m = 1200$ °С можно осуществлять при токе дуги $I = 300$ А и при скорости сварки $v = 5,5$ м/ч, или при $I = 100$ А и $v = 9,5$ м/ч, или при $I = 40$ А и $v = 15$ м/ч, или при $I = 18$ А и $v = 22,5$ м/ч. Заметим, что эти соотношения можно реализовать только при неизменном значении полутолщины сваренных стальных плит $S = 7$ мм. При других значениях параметра S следует выполнить новый расчет, используя приведенную выше зависимость (22).

$t_m = 2860 \text{ }^\circ\text{C}$; $S = 7 \text{ мм}$; $\Delta_{1ж}$ – при $I_1 = 5 \text{ А}$; $\Delta_{2ж}$ – при $I_1 = 20 \text{ А}$;
 $\Delta_{3ж}$ – при $I_3 = 75 \text{ А}$; $\Delta_{4ж}$ – при $I_4 = 300 \text{ А}$

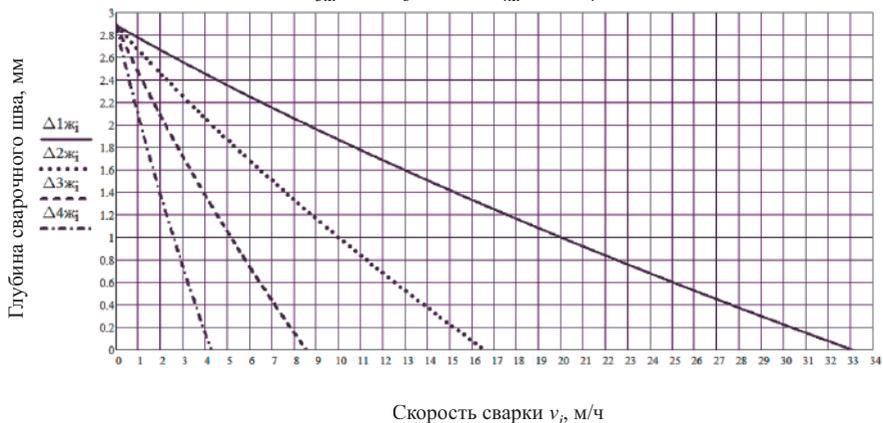


Рис. 5. Зависимость глубины сварочного шва $\Delta_{ж}$ от скорости сварки v при вариациях величины тока дуги I и при неизменных величинах температуры металла t_m в анодном пятне дуги и полутолщины S стальных свариваемых плит

$t_m = 2860 \text{ }^\circ\text{C}$; $I = 10 \text{ А}$; $\Delta_{1ж}$ – при $S_1 = 7 \text{ мм}$; $\Delta_{2ж}$ – при $S_2 = 5,5 \text{ мм}$;
 $\Delta_{3ж}$ – при $S_3 = 4 \text{ мм}$; $\Delta_{4ж}$ – при $S_4 = 2,5 \text{ мм}$

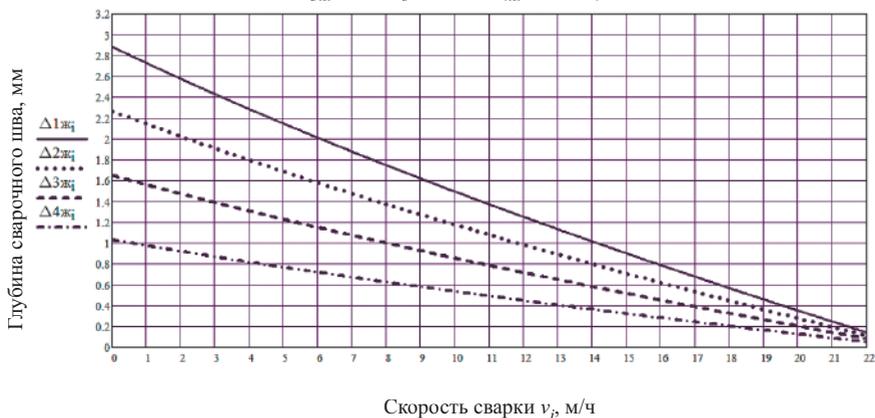


Рис. 6. Зависимость глубины сварочного шва $\Delta_{ж}$ от скорости сварки v при вариациях полутолщины S свариваемых плит, при неизменных значениях тока дуги I и температуры t_m в анодном пятне дуги

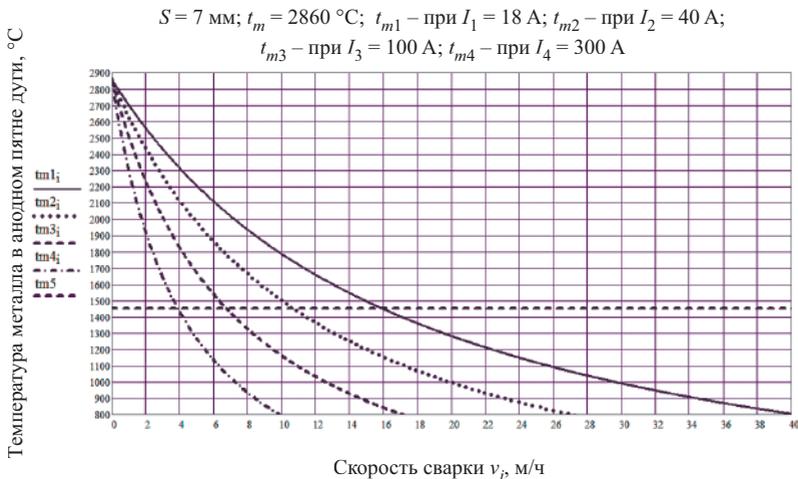


Рис. 7. Зависимость температуры металла t_m в анодном пятне сварочной дуги от скорости сварки v при вариациях величины тока дуги I и при значениях полутолщины S свариваемых плит

Выводы по работе.

1. Разработан новый метод расчета параметров процесса сварки электрической дугой постоянного тока с нерасходуемым электродом.
2. Получены аналитические соотношения между конечными параметрами процесса сварки — скоростью сварки, шириной и глубиной сварочного шва, удельным тепловым потоком и температурой в анодном пятне дуги, а также исходными параметрами, которыми может управлять оператор процесса — током и длиной сварочной дуги, полутолщиной свариваемых плит, а в некоторых случаях, и скоростью плавки.
3. Рассмотрена возможность использования сварочной дуги для термообработки сварочного шва с целью ликвидации остаточных термических напряжений в сварочном шве после сварки.

Литература

1. **Свенчанский А.Д.** Электрические промышленные печи. М.: Энергия, 1975. 382 с.
2. **Михеев М.А.** Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 343 с.
3. **Кутателадзе С.С.** Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 366 с.

4. **Шнейдер П.** Инженерные проблемы теплопроводности. М.: Иностранная литература, 1960. 478 с.
5. **Бортничук Н.И., Крутянский М.М.** Плазменно-дуговые плавильные печи. М.: Энергоиздат, 1981. 120 с.
6. **Финкельбург В., Меккер Г.** Электрические дуги и термическая плазма. М.: ИИЛ, 1961. 370 с.
7. **Шоек П.А.** Исследование баланса энергии на аноде сильноточных дуг, горящих в атмосфере аргона. В сб. Современные проблемы теплообмена. М.-Л.: Энергия, 1966. С. 110—139.
8. **Bowman V., Krüger K.** Arc Furnace Physics. Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 2009. 245 p.
9. **Электродуговые** печи постоянного тока / А.Н. Попов, М.М. Крутянский, В.В. Долгов, А.К. Филиппов // Электротехнология. 1998. № 2. С. 11—15.
10. **Кубарев В.Ф., Крутянский М.М., Чернышов Г.Г.** Газодинамические характеристики аргоновой сварочной дуги с нерасходуемым катодом // Физика и химия обработки материалов. 1982. Отдельный оттиск № 3. С. 39—45.
11. **Электротермическое** оборудование. Справочник. М.: Энергия, 1980. 416 с.
12. **Rosenthal D.** The Theory of Moving Sources of Heat and Its Application to Metal Treatment // Tran. ASME. 68. 849 (1946).

*С.С. Кондрашов, SSKondrashov@yandex.ru,
 М.А. Федин, FedinMA@mail.ru,
 А.Б. Кувалдин, KuvaldinAB@mpei.ru,
 С.А. Федина, FedinaSA@mpei.ru,
 НИУ «МЭИ», Москва;
 Б. Чень, chenbai@hopewind.com,
 Shenzhen Hopewind electric, КНР*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ ОПЛАВЛЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЗАЩИТУ ДЕТАЛЕЙ МЕХАНИЗМОВ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ АГРЕССИВНЫХ СРЕД, ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР И ДАВЛЕНИЙ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ COMSOL MULTIPHYSICS

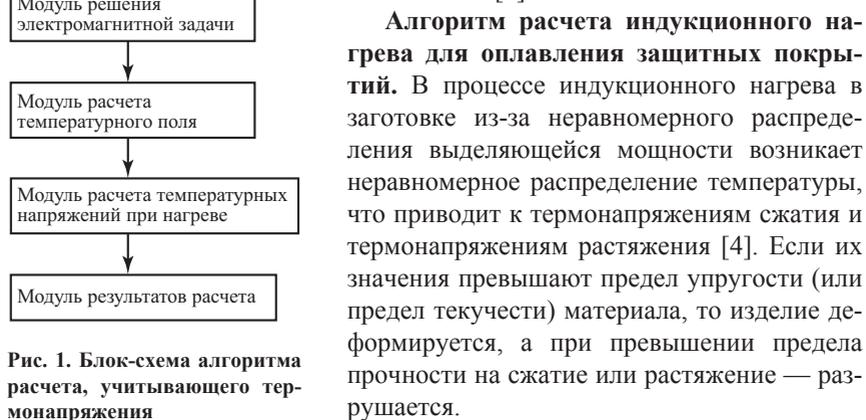
Проблема коррозии материала — серьезная экономическая проблема. Из-за коррозии страдают топливно-энергетический комплекс, сельское хозяйство и нефтегазовая промышленность. Коррозионные процессы — причина износа труб нефтепроводов, технологического оборудования в

металлургии, газотурбинных установок. Это заставляет осуществлять поиск технологий, которые бы позволили обеспечить существенное повышение ресурса работоспособности металлических деталей, находящихся в агрессивных средах. Нанесение на поверхность металла покрытий, улучшающих их эксплуатационные характеристики — один из наиболее перспективных и эффективных способов борьбы с коррозией [1]. Применение коррозионностойких покрытий повышает долговечность металла, обеспечивает защиту металлоконструкций, работающих как в атмосферных, так и в водных и других средах.

Особенно остро этот вопрос стоит в горнодобывающей отрасли, где агрессивная среда усложняет обеспечение работоспособности штоков гидроцилиндров и сокращает сроки их эксплуатации. Современные установки индукционного нагрева позволяют дополнить технологию нанесения напыленного коррозионностойкого покрытия [2] оплавлением с помощью глубинного нагрева. Такая технология требует оценок возникающих температурных напряжений в процессе оплавления и выбора оптимального режима нагрева.

Проведение анализа распределения параметров электромагнитного поля в заготовке с применением пакета Comsol Multiphysics позволяет учесть несплошность напыляемого материала, получить картину проникновения электромагнитной волны в двух- и трехслойную нелинейную проводящую среду, получить зависимости электрических и энергетических характеристик при оплавлении коррозионностойкого покрытия, нанесенного на стальную деталь газопламенным напылением [3].

Алгоритм расчета индукционного нагрева для оплавления защитных покрытий. В процессе индукционного нагрева в заготовке из-за неравномерного распределения выделяющейся мощности возникает неравномерное распределение температуры, что приводит к термонапряжениям сжатия и термонапряжениям растяжения [4]. Если их значения превышают предел упругости (или предел текучести) материала, то изделие деформируется, а при превышении предела прочности на сжатие или растяжение — разрушается.



Исходя из этого применение индукционного нагрева для оплавления напыленного покрытия предполагает исследование термических напряжений, возникающих в заготовке в процессе нагрева.

Для разработки температурного режима, учитывающего возникновение температурных напряжений, проведем анализ распределения электромагнитного и температурного полей в процессе нагрева заготовки. Для этого воспользуемся универсальным пакетом программ COMSOL Multiphysics [5] для решения любых междисциплинарных физических задач методом конечных элементов. В нашем случае происходит модуляция решения непростой междисциплинарной задачи, для чего, как правило, приходится использовать несколько различных пакетов программ. COMSOL Multiphysics позволяет решить всю задачу в единой среде.

Блок-схема алгоритма расчета представлена на рис. 1. Опираясь на известные входные данные — геометрию модели, электрофизические свойства детали и покрытия, решим электромагнитную задачу. Получив корректные результаты электромагнитной задачи, воспользуемся найденной мощностью тепловыделения для получения распределения температуры. В расчетах основываемся на известные теплофизические свойства материалов и время нагрева. Проанализируем возникающие температурные напряжения при режиме нагрева. На основании полученных данных при необходимости скорректируем температурный режим.

Разработка математической модели в пакете COMSOL Multiphysics. Моделирование проводим по следующему алгоритму.

1. Разработка геометрической модели, ввод исходных данных (с последующим изменением геометрических характеристик для различных толщин покрытия и длин заготовок).

2. Создание конечно-элементной сетки.

3. Решение электромагнитной задачи.

4. Решение тепловой задачи.

Для решения рассматриваемой двухмерной задачи примем следующие допущения:

1) деталь вращается со скоростью 20 об/мин, что обеспечивает равномерное распределение покрытия;

2) примем значения электрофизических свойств порошка равными значениям электрофизических свойств никеля, поскольку производитель Castolin не приводит никаких данных касательно электропроводности и магнитной проницаемости порошка Eutalloy RW 12496, а измерение этих показателей является довольно трудной технической задачей.

Никель обладает высокой магнитной проницаемостью. Точка Кюри для него составляет 358 °С. Эта температура при использовании скоростных режимов индукционного нагрева достигается в течение первых нескольких секунд нагрева, что делает неопределяющим влияние магнитной проницаемости никеля на режим нагрева порошка.

Поскольку необходимо учесть распределение плотности тока в несплошном пористом материале, было принято решение в половину геометрической модели добавить массив из полусфер радиусом, равным толщине напыления, а во вторую половину модели добавить область прямоугольной формы с толщиной, равной толщине напыленного на стальную цилиндрическую заготовку покрытия (рис. 2). Такое решение позволяет сравнить полученные результаты и оценить влияние пористости и несплошности неоплавленного покрытия на электрические параметры процесса индукционного нагрева.

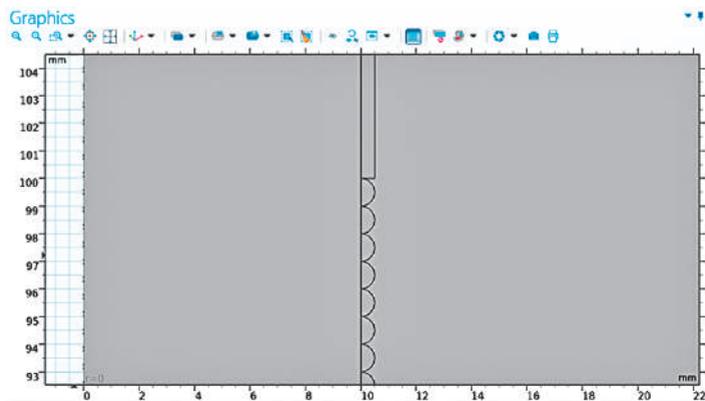


Рис. 2. Приближенная геометрическая модель с учтенной несплошностью покрытия ($d_z = 0,5$ мм, длина заготовки $l_n = 200$ мм) в COMSOL Multiphysics

Свойства материалов. В качестве материала штоков гидроцилиндров используют углеродистые легированные стали. Пожалуй, самой распространенной для производства штоков является сталь 45. Это одна из самых востребованных марок конструкционных углеродистых сталей ферритно-перлитного класса. Процентное содержание углерода может варьироваться от 0,45 до 0,5 %. Плотность стали $\rho = 7800$ кг/м³.

Сталь 45 содержит в своем составе примеси марганца и кремния. Эти компоненты понижают внутреннее напряжение, поэтому сталь 45 менее подвержена образованию трещин. Характеристики стали 45 дают возмож-

ность применять ее в условиях больших температурных перепадов, что объясняет ее востребованность. Эту сталь применяют для изготовления валов-шестерней, коленчатых и распределительных валов, шестерней, шпинделей, бандажей, цилиндров, кулачков и деталей, от которых требуется повышенная прочность.

Для защиты детали покрытие должно отвечать ряду требований по химическому составу, размеру и форме частиц. Физико-химические особенности порошка должны обеспечивать надежную защиту штока от воздействий агрессивной среды, тем самым повышая долговечность и работоспособность механизма. Оптимальным является применение самофлюсующихся порошков на никелевой основе системы Ni—Cr для получения плотного износостойкого покрытия с высокой адгезионной прочностью. Для эффективного самофлюсования оксиды должны иметь невысокую плотность и температуру плавления, а также обладать хорошим показателем жидкотекучести.

Предлагается использовать металлический порошок Castolin Eutalloy RW 12496 для напыления с последующим оплавлением. Порошок данной серии отличается отсутствием пор и высокой адгезией (300—500 МПа), высокой стойкостью к коррозии и отличной износостойкостью. Обладает хорошей пластичностью и механической прочностью, требует минимальной механической обработки, обеспечивая высокое качество покрытия. Применяется в качестве покрытия для штоков цилиндров, гильз насосов и вентилях, сепараторов угольной пыли.

Технические характеристики порошка Castolin Eutalloy RW 12496:

Состав	Ni—Cr—B—Si—Fe
Твердость	35—40 HRC
Температура (солидус/ликвидус)	1080/1100 °C
Максимальная эксплуатационная температура	800 °C
Плотность покрытия	7,8 г/см ³
Производительность	7,5 кг/ч
Расход порошка	85 г / 1 мм / 1 дм ³
Рекомендуемая толщина покрытия	0,5—2 мм

Результаты моделирования. В данной работе моделирование проводится при следующих параметрах: длина заготовки $l_3 = 200$ мм, диаметр заготовки 20 мм, толщина напыленного слоя $s_n = 0,5$ мм, ток индуктора $I_n = 380$ А, частота тока $f = 35$ кГц, температура нагрева $t = 250—1100$ °C. На рис. 3, а представлен чертеж системы «индуктор — загрузка», где 1 — индуктор; 2 — стальная заготовка; 3 — напыленное покрытие; d_z — диаметр напыленного покрытия; d_n — диаметр заготовки.

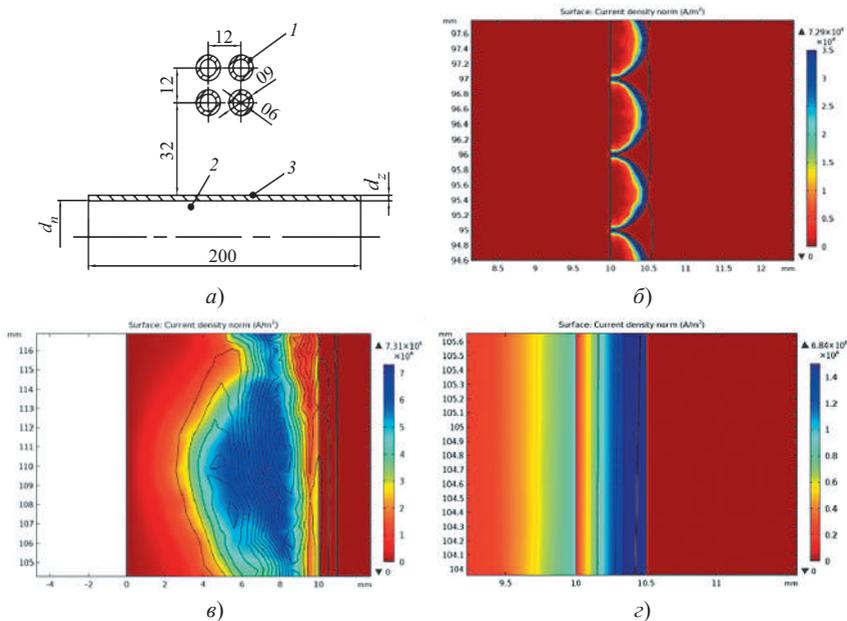


Рис. 3. Эскиз расчетной области (а) и результаты моделирования: б — время нагрева 30 с, ток индуктора 380 А, температура нагрева 250 °С; в — время нагрева 120 с, ток индуктора 380 А, температура нагрева 700 °С; г — время нагрева 200 с, ток индуктора 500 А, температура нагрева поверхности детали 1100 °С

В пакете программ Comsol было произведено моделирование на частотах 1, 35, 100 кГц и 1 МГц для выбора рациональной частоты оплавления с учетом свойств материала детали и напыляемого материала. Процесс выбора оптимальных параметров оплавления покрытия описан в [6].

Для частоты 1 кГц при температуре нагрева 1100 °С максимальная плотность тока наблюдается во внутренних слоях заготовки от зоны сцепления на расстояние более чем 3 мм в глубину заготовки. Безусловно, такой режим нагрева повлечет за собой больший нагрев внутренних слоев детали по сравнению с напыленным слоем. Кроме того, мощности, выделяемой в зоне сцепления, будет недостаточно для быстрого нагрева детали, что вызывает уменьшение производительности и КПД технологического процесса.

При анализе распределений плотности тока для нагрева на частоте 100 кГц и 1 МГц наглядно просматривается преимущество применения более высокой частоты. Плотность тока для всех рассматриваемых случаев максимальна в месте сплавления поверхности стальной заготовки с ма-

териалом покрытия. Значение тепловыделения также максимально в зоне сцепления. Однако анализ тепловых процессов показал, что применение нагрева при таких частотах нецелесообразно ввиду возникающих больших температурных напряжений в стальной заготовке [5].

Для применения индукционного нагрева для оплавления покрытия при таких частотах необходимо варьировать ток индуктора и число витков для снижения удельной поверхностной мощности и уменьшения термонапряжений.

Рациональность применения частоты 35 кГц наглядно продемонстрирована на рис. 3, б, в, г. При повышении частоты выше значения в 35 кГц зона оплавления практически не изменяется [7], что видно из рис. 4.

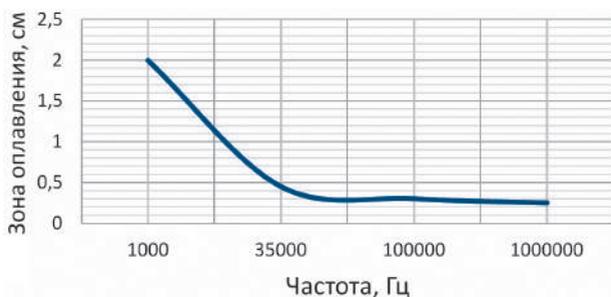


Рис. 4. Зависимость зоны оплавления от частоты

На первом этапе нагрева (рис. 3, б) материалы покрытия и детали обладают ферромагнитными свойствами, покрытие не оплавлено, поэтому наблюдается эффект индукционного нагрева однослойной проводящей среды, плотность тока убывает от поверхности покрытия к центру заготовки. На следующем этапе (рис. 3, в) материал покрытия не обладает ферромагнитными свойствами [8], покрытие оплавлено, материал заготовки ферромагнитен, поскольку температура точки Кюри для стали 45 не достигнута. В связи с этим наблюдается эффект индукционного нагрева двухслойной проводящей среды. На заключительном этапе нагрева (рис. 3, г) стальная заготовка частично теряет свои магнитные свойства (температура внешних слоев превышает температуру точки Кюри, а внутренних не превышает). Это приводит к появлению трех различных по своим электрофизическим свойствам слоев. Рассматривая индукционный нагрев с точки зрения проникновения электромагнитного поля в цилиндрическую среду, можем наблюдать в этом случае две отраженные электромагнитные волны и эффект индукционного нагрева трехслойного проводящего тела.

Результаты моделирования показывают, что покрытие достигло нужной температуры оплавления 1100 °С.

Заключение. Разработана технология оплавления напыленного покрытия, которая заключается в применении поверхностного индукционного нагрева. Рассматриваемая технология не нарушает геометрию детали (отсутствие поводок, внутренних дефектов).

Применение поверхностного нагрева дает следующие преимущества: равномерность нагрева по всей длине детали, отсутствие термонапряжений, автоматизация технологического процесса, снижение влияния человеческого фактора на конечный результат. Таким образом, разработана повторяемая технология с точки зрения получения заданной твердости покрытия и равномерного химического состава по всей поверхности детали.

Разработана численная математическая модель процесса индукционного оплавления коррозионностойкого покрытия стальных деталей, позволяющая исследовать электрические и тепловые режимы работы установки.

Литература

1. **Защитные** покрытия: учебное пособие / М.Л. Лобанов, Н.И. Кардолина, Н.Г. Россина, А.С. Юровских. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 200 с.
2. **Кобяков О.С., Гинзбург Е.Г.** Исследование процессов оплавления износостойких покрытий, полученных газотермическим напылением // Машиностроение. 1987. Вып. 12. С. 46—49.
3. **Кудинов В.В., Бобров Г.В.** Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
4. **Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р.** Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях. М.: ИНФРА-М, 2019. 273 с.
5. **Г.Е. Красников, О.В. Нагорнов, Н.В. Старостин.** Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics: учебное пособие для вузов / М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 184 с.
6. **Fedin M., Kuvaldin A., Kondrashov S.** Calculation of the Process of Induction Melting of Corrosion-Resistant Coatings. 450-454. 2021. 10.1109/UralCon52005.2021.9559422.
7. **Разработка** методики расчета индукционной установки для оплавления коррозионностойких покрытий / А.Б. Кувалдин, М.А. Федин, А.О. Кулешов и др. // Фёдоровские чтения — 2020: L международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2020. С. 139—145.
8. **Кувалдин А.Б.** Индукционный нагрев ферромагнитной стали. М.: Энергоатомиздат, 1988. 200 с.

*А.Е. Немировский, a.e.nemirovsky@mail.ru,
Г.А. Кичигина, janedaw@mail.ru,
И.Ю. Сергиевская, tanak04@mail.ru,
О.М. Никифорова, stoushko@yandex.ru,
Вологодский государственный университет*

НОВЫЙ СПОСОБ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКОЙ СУШКИ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В настоящее время электроосмотическая сушка (ЭОС) электрооборудования, в том числе электродвигателей (ЭД), является широко применяемым на производстве методом восстановления параметров изоляции обмоток [1—6]. ЭОС имеет ряд преимуществ перед тепловой сушкой: высокая энергоэкономичность, сушка ЭД без разборки и демонтажа непосредственно на местах эксплуатации, отсутствие коробления и термической деструкции изоляции, небольшая продолжительность, снижение трудозатрат.

Кафедра электрооборудования Вологодского государственного университета продолжает работать над улучшением качественных показателей процесса ЭОС. В очередной перспективной разработке с целью интенсификации процесса ЭОС сушку ведут с непрерывным увеличением амплитуды пульсирующей составляющей в общем напряжении по закону, описываемому формулой

$$U_{mi\sim} = \frac{\ln \frac{R_i}{10} + \sqrt{\left(\frac{R_i}{10}\right)^2 - 1}}{10} U_{\Sigma i}, \quad (1)$$

где $U_{mi\sim}$ — амплитуда пульсирующей составляющей напряжения; R_i — величина сопротивления изоляции при каждом измерении; $U_{\Sigma i}$ — величина приложенного напряжения, соответствующая каждому измеренному сопротивлению изоляции; i — число измерений сопротивления изоляции.

Физический смысл разработки в том, что в процессе электроосмотического обезвоживания изоляции уменьшается концентрация ионных комплексов в водном растворе в капиллярах изоляции и изменяется энергетический спектр системы, в которую они входят. Для разрушения остающихся кластеров возникает необходимость увеличения амплитуды пульсирующей составляющей в напряжении сушки с целью придания системе дополнительной порции энергии. Кроме того, увеличение амплитуды пульсирующей составляющей способствует ослаблению влияния объемных зарядов противоположного знака, образующихся у электродов и замедляющих процесс ЭОС.

На рисунке 1 показаны зависимости продолжительности ЭОС от коэффициента модуляции для ЭД различных мощностей и при разных начальных R . Коэффициент модуляции

$$K_m = \frac{U_{m\sim}}{U_{\Sigma}}. \quad (2)$$

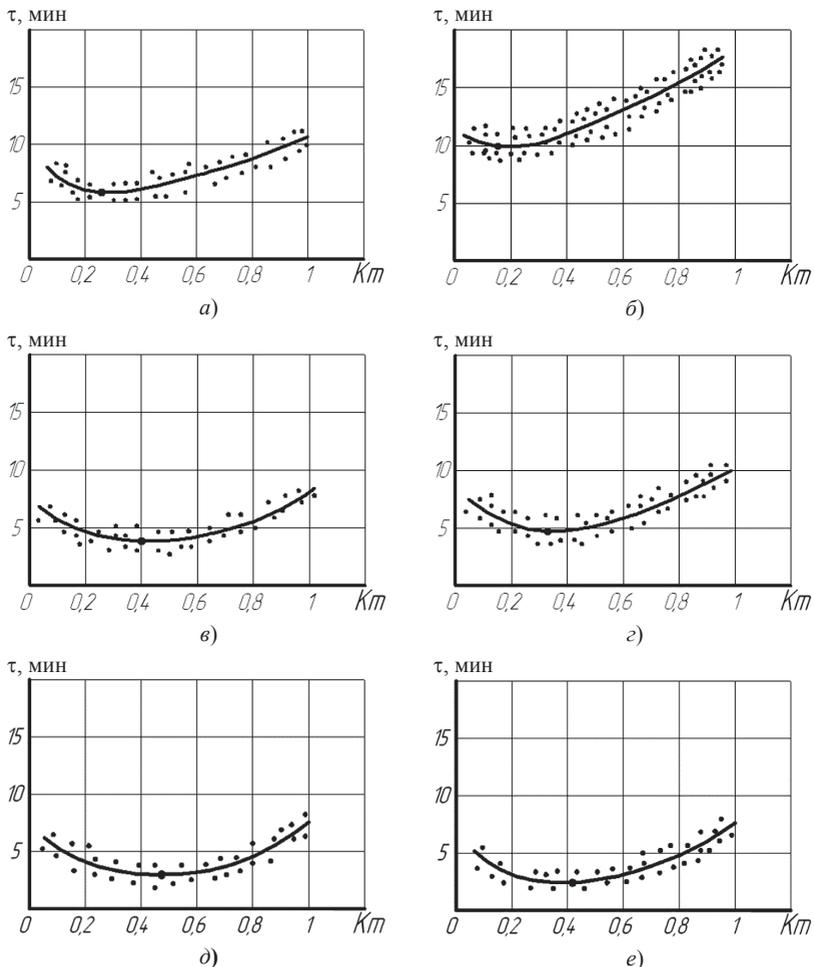


Рис. 1. Зависимости продолжительности ЭОС ЭД от коэффициента модуляции:
a — начальное R изоляции 30 кОм; *б–е* — то же, соответственно для 90, 150, 300, 400, 500 кОм; $f = 100$ Гц; $U_{\Sigma} = 250$ В

Из рисунка 1 видна связь скорости сушки с коэффициентом модуляции. Так, для начального $R = 300$ кОм и $K_m = 0,4$ минимальная продолжительность ЭОС составляет 4 мин (рис. 1, з). Отметим минимумы τ и при других K_m (рис. 1, а—в, д, е). Исследования показали, что мощность и габариты ЭД влияния на связь τ с K_m не оказывают. По оптимальным значениям K_m из рис. 1 и начальным величинам R построена зависимость $K_m = f(R)$ на рис. 2. Кривая соответствует оптимальным K_m для ЭОС изоляции с разными начальными величинами R и аппроксимируется уравнением вида

$$y = \ln \left(x + \sqrt{x^2 - 1} \right). \quad (3)$$

Подставляя в (3) $y = 10K_m$, $x = R/10$ [кОм] и учтя (2), получим (1).

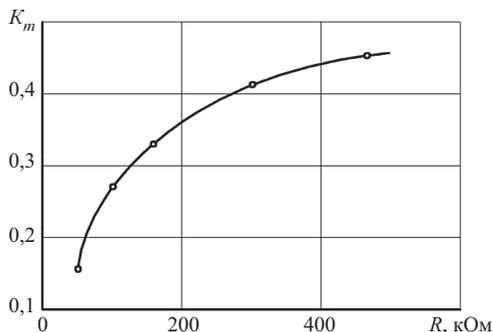


Рис. 2. Зависимость оптимальных коэффициентов модуляции выходного напряжения УЭОС от начальных величин сопротивления изоляции ЭД

Устройство ЭОС (УЭОС) для реализации описанного способа сушки приводится на рис. 3. Оно содержит выпрямитель источника питания 1, стабилизатор напряжения 2 с отсечкой по минимуму и максимуму тока, модулятор 3, задающий генератор 4, измерительный шунт 5, входной полосовой фильтр 6, линейный усилитель 7, выпрямитель-интегратор 8, нелинейный элемент сравнения-преобразования 9, пороговые элементы максимального и минимального тока 10.

Суть работы такого УЭОС в следующем. Сигнал с измерительного шунта поступает на вход полосового фильтра, который выделяет требуемую частоту на выпрямитель-интегратор. Интегратор исключает автоколебательный режим в кольце регулирования и выделяет постоянную составляющую. Затем сигнал поступает на элемент сравнения-преобразования, который обуславливает закон регулирования пульсирующей составляющей напряжения ЭОС в соответствии с кривой, показанной на рис. 2.

6. **Устройство** электроосмотической сушики изоляции обмоток электродвигателей 0,4 кВ для экспериментальных исследований / А.Е. Немировский, Г.А. Кичигина, И.Ю. Сергиевская, Д.Н. Мищенко // Фёдоровские чтения — 2020: L международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2020.

*Е.И. Грачева, grachieva.i@bk.ru, КГЭУ, г. Казань,
Э.Э. Ибатуллин, ibatullinedick@yandex.ru.*

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ И ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

В современных условиях развития России особое внимание уделяется повышению точности процессов прогнозирования электропотребления. Как показывает отечественный и зарубежный опыт, кризис в экономике и, особенно, энергетических отраслях, отрицательно влияет на эффективность функционирования оборудования промышленных комплексов. При этом характерно, что наблюдается взаимосвязь между таким важнейшим показателем эффективности работы электротехнических систем, как потери электроэнергии, и кризисными явлениями во всех странах, независимо от уровня их развития. Объясняется это процессами ослабления контроля электропотребления в данные периоды нестабильности экономики требующие совершенствования методов управления энергетическими комплексами [1—3]. Также в этих условиях наблюдается снижение платежеспособности существенной части электропотребителей и промышленных объектов.

Достижение технологической безопасности России требует особых подходов к вопросам выявления непроизводительного расхода электроэнергии [1—3]. Современное развитие электроэнергетики позволяет использовать информационное обеспечение для разработки новых алгоритмов прогнозирования потребления электроэнергии, основанных на уточнении схемных и режимных параметров систем электроснабжения. Энергосберегающие технологии и оборудование позволяют снизить уровень электропотребления [4—6]. С другой стороны, автоматизация технологических процессов и замена в них различных видов топлив на электроэнергию приводят к росту потребления электроэнергии. Такие условия делают особенно актуальной задачу достоверного прогнозирования электропотребления.

Материалы и методы. Для прогнозирования электропотребления предлагается использовать величину эквивалентного сопротивления рассматриваемой схемы. Схемы подразделяются на два типа (рис. 1).

Первый тип (рис. 1, а) — одиночная линия с точкой присоединения источников питания и точкой присоединения потребителей. Для такой схемы характерно распределение токов нагрузки по элементам пропорционально величинам их сопротивлений. Данную схему можно представить как простейшую, имеющую один элемент — эквивалентное физическое сопротивление — $R_{\text{экв}}^{\Phi}$.

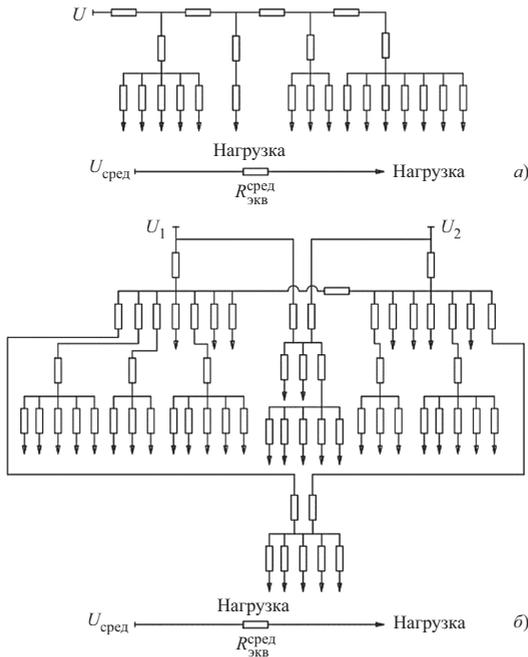


Рис. 1. Примеры используемых схем электроснабжения:

а — схема первого типа; б — схема второго типа

Определим потери электроэнергии для исследуемой схемы:

$$\Delta W_{\text{сх}} = 3R_{\text{экв}}^{\Phi} \sum_{t=1}^{T_p} I_{i \text{ нг}}^2 = 3R_{\text{экв}}^{\Phi} I_{\text{ср.нг}}^2 K_{\text{граф}} T_p, \quad (1)$$

где $I_{i \text{ нг}}$ — ток на интервалах графика нагрузки; T_p — интервал времени расчета, ч; t — интервал времени изменения токов графика, ч; $I_{\text{ср.нг}}$ —

среднее значение тока, А; $K_{\text{граф}}$ — значение коэффициента графиков, показывающее соотношение значений суммы квадратов токов (мощностей) переменного графика и значений суммы средних токов (мощностей), или, другими словами, соотношение потерь электроэнергии при работе нагрузок по переменному и равномерному графикам:

$$K_{\text{граф}} = \frac{R_{\text{ЭКВ}}}{R_{\text{ЭКВ}}^{\Phi}}, \quad (2)$$

отсюда

$$R_{\text{ЭКВ}}^{\text{сред}} = K_{\text{граф}} R_{\text{ЭКВ}}^{\Phi}. \quad (3)$$

Определим $I_{\text{ср.нг}}^2$ и $R_{\text{ЭКВ}}^{\text{сред}}$:

$$I_{\text{ср.нг}}^2 = \frac{W^2}{\left(\sqrt{3}U_{\text{сред}} \cos \varphi_{\text{сред}} T_p\right)^2}; \quad (4)$$

$$R_{\text{ЭКВ}}^{\text{сред}} = \frac{\Delta W U_{\text{сред}}^2 \cos^2 \varphi_{\text{сред}}}{P_{\text{сред}}^2 T_p}, \quad (5)$$

где W — отпуск электроэнергии в сеть, МВт·ч; $P_{\text{сред}}$ — величина средней мощности нагрузки, МВт; ΔW — потери электроэнергии, МВт·ч; $U_{\text{сред}}$ — среднее напряжение сети, кВ; $\cos \varphi_{\text{сред}}$ — среднее значение коэффициента мощности нагрузки.

Ко второму типу схем относятся схемы с несколькими точками питания и присоединений нагрузки (см. рис. 1, б). Для этой схемы характерным является зависимость токов нагрузок от расположения узлов питания, места присоединений и мощности нагрузки и, в меньшей степени — от сопротивлений участков сети. Для уточнения параметров схем второго типа необходимо дополнить вычисления коэффициентом топологии $K_{\text{топ}}$, который показывает соотношение потерь мощности (электроэнергии) при заданном расположении нагрузок и распределении нагрузок в соответствии с сопротивлением каждого из рассматриваемых элементов при $K_{\text{топ}} = 1$ (аналогично короткому замыканию на конце каждого ответвления).

Тогда значение среднего эквивалентного сопротивления по (5) определится как

$$R_{\text{ЭКВ}}^{\text{сред}} = R_{\text{ЭКВ}}^{\Phi} K_{\text{граф}} K_{\text{топ}}. \quad (6)$$

Для схемы первого типа (см. рис. 1, а) $K_{\text{топ}} = 1$, так как протекающие токи по участкам схемы распределяются в соответствии со значениями их сопротивлений, и при постоянной величине передаваемой электроэнергии (равномерный график нагрузки) справедливы соотношения

$$\begin{aligned} K_{\text{топ}} &= K_{\text{граф}} = 1; \\ R_{\text{экв}}^{\text{сред}} &= R_{\text{экв}}^{\Phi}. \end{aligned} \quad (7)$$

Простейшим видом схемы второго типа является схема распределительного щита с одной точкой питания и несколькими точками присоединенных нагрузок.

Определим в фиксированный момент времени величину суммы потерь мощности для каждого участка этой схемы и разделим полученное значение на величину квадрата тока головного участка $I_{\text{г.уч}}^2$ (или, другими словами, на величину квадрата суммы токов участков схемы).

В результате получено значение эквивалентного сопротивления второй схемы с учетом $K_{\text{топ}}$ в фиксированный момент времени без учета $K_{\text{граф}}$:

$$R_{\text{экв}} = R_{\text{экв}}^{\Phi} K_{\text{топ}} = \frac{\sum_{i=1}^n I I_{ip}^2 R_i}{I_{\text{г.уч}}^2}, \quad (8)$$

где I_{ip} — рабочий ток i -го элемента (участка, отпайки); n — число участков схемы; R_i — сопротивление i -го участка схемы; $I_{\text{г.уч}}$ — ток головного участка схемы. Для схем радиальной топологии $R_{\text{экв}}^{\Phi}$ определяется по формуле

$$R_{\text{экв} p}^{\Phi} = \frac{\sum_{i=0}^n R_{i20} l_{i \text{сх}} \left[1 + \alpha (\theta_{i \text{пров}} - 20) \right] + \sum_{i=1}^m R_{i \text{ап}}}{n}, \quad (9)$$

где R_{i20} — значение удельного сопротивления одного метра i -й линии схемы при температуре 20 °С, мОм/м; $l_{i \text{сх}}$ — длина i -й линии схемы, м; $\theta_{i \text{пров}}$ — значение температуры проводника i -й линии, определяемое ее токовой нагрузкой и температурой окружающей среды, °С; $R_{i \text{ап}}$ — значение сопротивления контактов электрических аппаратов на линии, мОм; n — число аппаратов i -й участка схемы; α — значение температурного коэффициента увеличения сопротивления материала проводника, 1/°С.

Для схемы магистральной топологии $R_{\text{ЭКВ}}^{\Phi}$, выполненной распределительным шинопроводом с распределенной нагрузкой, формула имеет вид

$$R_{\text{ЭКВ.шд}}^{\Phi} = \left[R_{0\text{шд}20} l_{\text{шд}} \frac{1}{6} \left(1 + \frac{1}{n} \right) \left(2 + \frac{1}{n} \right) \right] \left[1 + \alpha_{\text{шд}} (\theta_{\text{шд}} - 20) \right] + \frac{R_{20} l_{\text{пр.отв}}}{n} \left[1 + \alpha_{\text{пр.отв}} (\theta_{\text{пр.отв}} - 20) \right] + \frac{\sum_{i=1}^K R_{i\text{ап}}}{n}, \quad (10)$$

где $l_{\text{шд}}$ — значение длины распределительного шинопровода, м; $R_{0\text{шд}20}$ — сопротивление одного метра распределительного шинопровода при температуре 20 °С; n — число электроприемников, питающихся от распределительного шинопровода; R_{20} — сопротивление одного метра провода ответвления от шинопровода при температуре 20 °С, мОм/м; $\theta_{\text{шд}}$ — значение температуры шинопровода, °С; $\theta_{\text{пр.отв}}$ — значение температуры токопроводящей жилы ответвления, °С; $l_{\text{пр.отв}}$ — длина провода ответвления, м; $\alpha_{\text{пр.отв}}$ — значение температурного коэффициента увеличения сопротивления материала провода ответвления, 1/°С; $\alpha_{\text{шд}}$ — значение температурного коэффициента увеличения сопротивления материала распределительного шинопровода, 1/°С; $\sum_{i=1}^K R_{i\text{ап}}$ — сумма сопротивлений контактов коммутационных аппаратов, установленных на одном ответвлении, мОм; K — количество низковольтных коммутационных аппаратов на одном ответвлении.

Результаты расчета $R_{\text{ЭКВ}}$ и $R_{\text{ЭКВ}}^{\Phi}$ с учетом компоновок оборудования распределена (рис. 2) и технических параметров — числа ответвлений, температуры нагревания токопроводящих жил, температуры окружающей среды даны в табл. 1, где $K_{\text{топ}} = \frac{R_{\text{ЭКВ}}}{R_{\text{ЭКВ}}^{\Phi}}$.

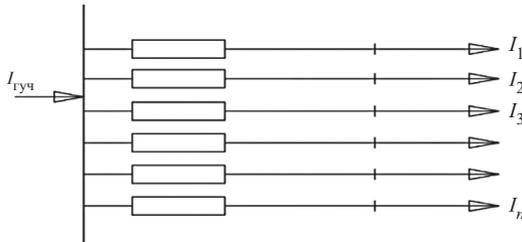


Рис. 2. Обобщенная схема замещения распределительного щита

Результаты расчета $R_{\text{ЭКВ}}$ и $R_{\text{ЭКВ}}^{\Phi}$

Номер опыта	Средний длительно допустимый ток $I_{\text{доп.сред.}}$, А	Среднее значение длины провода ответвления $l_{\text{ср.отв.}}$, м	Число ответвлений n	Среднее значение коэффициента загрузки линий $K_{\text{зг}}$	Температура окружающей среды $\theta_{0,с}$, °С	$R_{\text{ЭКВ}}$	$K_{\text{ТОП}}$	$R_{\text{ЭКВ}}$	$K_{\text{ТОП}}$
1	20,5	16,5	16	0,46	20	22,1	1,10	14,11	0,70
2	20,6	16,6	14	0,48	20	24,2	1,04	15,62	0,65
3	20,8	16,3	12	0,50	20	26,4	1,02	17,05	0,64
4	21,2	15,8	10	0,55	20	30,6	1,08	19,80	0,70
5	21,8	15,9	8	0,60	20	35,5	1,04	23,10	0,74

Эквивалентные сопротивления $R_{\text{ЭКВ}}$ и $\hat{R}_{\text{ЭКВ}}$ вычисляются по (5). Для расчета $R_{\text{ЭКВ}}$ необходимо учитывать нагревание токопроводящих жил ответвлений и сопротивление контактов низковольтных аппаратов, установленных на линиях. При вычислении $R_{\text{ЭКВ}}$ данные параметры не учитываются. Результаты расчетов показали, что при вычислении $R_{\text{ЭКВ}} - K_{\text{ТОП}}$ близок к единице.

При этом использование величины $\hat{R}_{\text{ЭКВ}}$ для оценки электропотребления и потерь электроэнергии в элементах оборудования цеховой сети будет вносить значительную погрешность в расчеты. Поэтому целесообразно составлять полиномиальные модели для исследования уровня потерь. Среднее значение эквивалентного сопротивления $R_{\text{ЭКВ}}^{\text{сред}}$ используется для вычисления потерь в соответствии со средними значениями тока или мощности графика нагрузки для схем любой топологии за период времени определения $R_{\text{ЭКВ}}^{\text{сред}}$.

Например, вычислим значение $R_{\text{ЭКВ}}^{\text{сред}}$ участка схемы низковольтной сети ОАО «Казанский электромеханический завод», включающего в себя распределительный щит с подключенными электроприемниками. Средняя длина ответвлений к электроприемникам $l_{\text{ср}} = 16,5$ м при числе потребителей 16, длительно допустимый ток (среднее значение) $I_{\text{сред.доп}} = 20,50$ А, средний коэффициент загрузки линий $K_{\text{зг}} = 0,45$, температура окружающей среды $\theta_{0,с} = 20$ °С, средний коэффициент мощности двигателей элект-

роприемников $\cos \varphi_{\text{сред}} = 0,60$. При этом известными данными являются величина годового электропотребления $W_{\text{год}} = 95,52$ МВт·ч, беспотерьный отпуск электроэнергии потребителям $W_{\text{б.пот}} = 92,94$ МВт·ч, потери электроэнергии $\Delta W = 2,58$ МВт·ч.

Определим значение суммы квадратов средней мощности при годовом числе часов работы $T_p = 1987$ ч:

$$\sum P_{\text{сред}}^2 = P_{\text{сред}} T_p = \frac{\Delta W^2}{T_p^2} T_p = \frac{\Delta W^2}{T_p} = \frac{2,58^2}{1987} = 3,35 \cdot 10^{-3} \text{ МВт.}$$

Тогда по (5)

$$R_{\text{экв}}^{\text{сред}} = \frac{\Delta W U_{\text{сред}}^2 \cos^2 \varphi_{\text{сред}}}{P_{\text{сред}}^2 T_p} = \frac{2,58 \cdot 0,38^2 \cdot 0,60^2}{3,35 \cdot 1987 \cdot 10^{-3}} = 22,5 \text{ мОм.}$$

Результаты исследования показали, что при постоянном технологическом процессе увеличение значения $R_{\text{экв}}^{\text{сред}}$ (табл. 2) обусловлено ростом сопротивлений контактов коммутационных аппаратов, установленных на линиях схемы. Иначе величина $R_{\text{экв}}^{\text{сред}}$ оставалась бы постоянной, а изменение нагрузочных потерь в низковольтной сети соответствовало бы квадрату пропускаемой электроэнергии.

Определим потери электроэнергии по данным 2018 г.:

$$\Delta W = \frac{R_{\text{экв}}^{\text{сред}} P_{\text{сред}}^2 T_p}{U_{\text{сред}}^2 \cos^2 \varphi_{\text{сред}}}; \quad (11)$$

$$\Delta W = \frac{22,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,35 \cdot 1987}{0,38^2 \cdot 0,6^2} = 2,66 \text{ МВт·ч.}$$

Как видим, при постоянном технологическом цикле для исследуемой сети потери составили $\Delta W_{\%} = 2,86$ % беспотерьного отпуска электроэнергии (92,94 МВт·ч).

Определим величину расчетного отпуска электроэнергии:

$$W_{\text{расч}} = \frac{100}{2,86} \cdot \frac{R_{\text{экв}}^{\text{сред}} P_{\text{сред}}^2 T_p}{U_{\text{сред}}^2 \cos^2 \varphi_{\text{сред}}}; \quad (12)$$

$$W_{\text{расч}} = 93,01 \text{ МВт·ч.}$$

По данным ретроспективных значений $R_{\text{экв}}^{\text{сред}}$ возможно определить прогнозируемое значение $R_{\text{экв}}^{\text{сред}}$ с использованием среднего значения ко-

ээффициента изменения эквивалентного сопротивления. Данные значения могут быть использованы для оценки потерь по выражению (11) и прогнозирования расчетного отпуска электроэнергии по выражению (12).

Заключение. В результате исследований установлено, что для повышения достоверности параметров электропотребления на промышленных предприятиях возможно применение величины эквивалентного сопротивления схемы сети. При этом предлагается в качестве корректирующей величины эквивалентного сопротивления использовать коэффициент изменения эквивалентного сопротивления для исследуемой схемы, показывающий динамику $R_{\text{ЭКВ}}^{\text{сред}}$ за рассматриваемые интервалы времени. Однако следует отметить, что значение данного коэффициента для временного интервала прогнозирования может отличаться от ретроспективных значений. Уменьшение величины эквивалентного сопротивления схемы возможно в случаях замены электрооборудования и отработавших ресурсы электрических аппаратов, а также внедрения мероприятий по энергосбережению, направленных на уменьшение уровня потерь электроэнергии.

Предлагаемый алгоритм позволяет повысить эффективность прогнозирования расходов электроэнергии и оценки потерь электроэнергии в среднесрочной перспективе.

Литература

1. **Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдуллазянов Р.Э.** Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях // Проблемы энергетики. 2019. № 5. С. 87—96.
2. **Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М.** Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутрив заводского электроснабжения // Проблемы энергетики. 2020. № 2. С. 65—74.
3. **Алгоритмы** и вероятностные модели параметров функционирования внутрив заводского электроснабжения / Е.И. Грачева, О.В. Наумов, А.Н. Горлов, З.М. Шакурова // Проблемы энергетики. 2021. № 1. С. 93—104.
4. **Разработка** метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма / А.Р. Сафин, Р.Р. Хуснутдинов, А.М. Копылов и др. // Вестник КГЭУ. 2018. № 4 (40). С. 77—85.
5. **Петров Т.И.** Модификация генетического алгоритма для комплексной топологической оптимизации ротора синхронных двигателей // Проблемы энергетики. 2021. Том 23. № 3. С. 70—79.
6. **Хошимов Ф.А., Рахманов И.У.** Методы расчета прогнозных значений норм удельного электропотребления на предприятиях с меняющейся величиной потребляемой мощности // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2021. 10 (91). С. 28—31.

7. **Иноятов Ж.А.У.** Анализ существующих методов исследования по учету расхода электроэнергии // Цифровая наука. 2021. № 4. С. 17—21.
8. **Анализ** потерь электроэнергии при сезонных изменениях нагрузок / Р.А. Галстян, А.А. Удовидченко, К.А. Смагин и др. // Молодой исследователь Дона. 2020. № 1 (22). С. 19—23.
9. **Савина Н.В., Гамолин В.А., Мясоедова Л.А.** Интеллектуализация учета электроэнергии как инструмент снижения потерь электроэнергии // Вестник АмГУ. 2021. Выпуск 93. С. 51—56.
10. **Использование** рекуррентных сетей для прогнозирования потребления электроэнергии / С.Л. Подвальный, М.А. Лихотин, А.В. Михайлусов А.К. Донских // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 3. С. 45—50.

*Л.Г. Ионова, k_otd@nirhtu.ru,
А.С. Исаев, claude_dk@mail.ru,*

Новомосковский институт РХТУ им. Д.И. Менделеева

ВЫБОР МЕТОДА ФОРМАЛИЗАЦИИ ЗАВИСИМОСТЕЙ В ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Формализованное описание параметров технической системы является актуальной задачей. Это соответствует переходу от качественных (экспертных) методов к количественным (формализованным) оценкам. Наличие функциональной зависимости позволяет использовать более полную и, что самое важное, объективную информацию при принятии решений.

В технических науках к методам математической статистики обратились в середине XX века (в задачах обработки результатов экспериментов) [1]. С развитием персональных ЭВМ методы аппроксимации были реализованы программно, наиболее распространенным тогда является язык программирования Бейсик [2]. С развитием информационных технологий функции подбора функциональных зависимостей реализованы в виде соответствующей процедуры в офисном программном обеспечении, в частности в электронном процессоре MS Excel, что доведено в настоящее время до широкого использования в учебном процессе и отражено в разработках методического характера [3].

Задачу подбора зависимости можно считать лишь функциональным инструментом. Но зачастую сложность этой операции приводит к модернизации исходной системы с изменением описания ее свойств. Так, при анализе техноценозов (сложных технических систем с большим количе-

ством элементов и многообразными связями между ними) в теории рангового анализа в общем виде постулируется зависимость

$$\Lambda(r) = \frac{B}{r^\beta}, \quad (1)$$

где r — ранг (порядковый номер в упорядоченном пространстве признаков); B , β — коэффициенты аппроксимации.

Установлено [4], что применение метода наименьших квадратов приводит к чрезмерной ошибке из-за неудовлетворительного прогноза коэффициента B . Поэтому для практических задач зависимость (1) упрощена переходом от двухпараметрической к функции одной переменной β . Вероятно, указанная проблема обусловлена не недостатками математических методов, а объективными свойствами модели. Ранг элемента — качественный признак, не обладающий свойствами аддитивности, поэтому переход от дискретной модели к ее непрерывному аналогу может приводить к кардинальному искажению свойств модели.

Но существуют и общие алгоритмические проблемы реализации известных методов. В учебной литературе разбираются (в методических целях для изучения алгоритмов), как правило, линейные модели. Для более сложных зависимостей, включая (1), решение системы уравнений получить в общем виде нельзя. Это объясняется двойным преобразованием (логарифмирование перед расчетами с последующим возвращением к исходным данным потенцированием). Подобная линеаризация метода наименьших квадратов (МНК) позволяет получить подбор кривой, максимально близкой к набору экспериментальных данных, но может привести и к значительной погрешности, что ведет к необходимости использования современных математических методов при описании системы электроснабжения [5].

Методы. Развитие информационных технологий позволяет отказаться от составления и последующего решения систем уравнений, минимизирующих дисперсию (отражает сумму квадратов отклонений массива расчетных значений от эмпирических). Современные пакеты прикладной математики позволяют формализовать зависимости, не решая в явном виде задачи программирования.

В [6] для прогнозирования временного ряда электропотребления использована программа MathCAD, которая обладает достаточными функциональными возможностями при простоте использования. Но при этом установлено, что коэффициенты аппроксимации в значительной мере зависят от начального приближения (которое может быть получено исключительно экспертно).

Поэтому принимаем в качестве инструментальной среды MatLab, обладающий более высокими функциональными возможностями (поэлементные операции с матрицами, интерактивные приложения для аппроксимации) с развитым пользовательским интерфейсом. Использован опыт построения моделей линейной авторегрессии [7].

Результаты. В качестве примера выполнен прогноз электропотребления промышленного предприятия ОАО «Щекиноазот» (Тульская область), которое интенсивно развивается. Прирост электропотребления промышленного узла г. Щекино за последние пять лет составляет 40 %. Годовое электропотребление в 2021 г. составило 654,8 млн кВт·ч, в 2025 г. по плану должно возрасти (с учетом ввода в эксплуатацию новых производств) до 983,3 млн кВт·ч. Заявленный максимум в 2021 г. составлял 74,7 МВт, в 2025 г. планируется увеличение до 112,3 МВт [8]. Обобщена статистика по электропотреблению предприятия за период 2018—2021 гг. (рис. 1). Данные по объемам выпуска продукции отсутствуют, так как предприятие находится в состоянии развития и расширения производственных мощностей. В этих условиях электропотребление нестабильно.

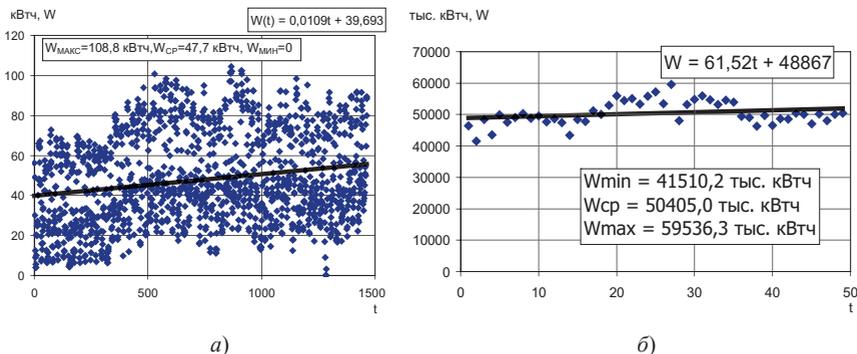


Рис. 1. Исходные временные ряды:

a — почасовой график нагрузки; *б* — месячное электропотребление

Традиционно экстраполяционные методы перспективных оценок основаны на зависимости

$$W(t) = T + S, \quad (2)$$

где T — тренд (основная тенденция); S — сезонная составляющая (циклические колебания).

Средняя относительная погрешность центрирования линейным трендом (рис. 1, б) составляет $\delta W = 5,19\%$. Поэтому недостаточно учета основной линейной тенденции, необходимо уточнение прогнозной модели. Это может быть выполнено усложнением модели (учетом других тенденций) и оптимизацией исходных данных (разбиением на группы с учетом технологических состояний; отказом от учета аномальных выбросов, не имеющих систематического характера).

Зависимость (2) реализована в явном виде в MatLab (рис. 2). Значения начального приближения приняты по коэффициентам тренда (рис. 1, б). Прогноз месячного электропотребления удовлетворителен, поскольку средняя относительная погрешность модели (рис. 2, в) менее 1% .

```

Editor - Untitled*
Untitled* x +
1 clear, clc
2 % формирование массивов
3 W = xlsread('W.xlsx'); t = xlsread('T.xlsx');
4 % задание вида функции
5 f = @(x,u) x(1)*u + x(2) + x(3)*sin(x(4)*u + x(5));
6 x0 = [61.5 48800 1 1 0]; % начальное приближение
7 x = lsqcurvefit(f,x0,t,W) % расчет коэффициентов
8 Wn = f(x,t); % расчет значений модели
9 % графики значений - факт и модель
10 nexttile
11 plot(t,W,'ob'), hold on
12 plot(t,Wn, ':r')
13 legend('факт, тыс.кВтч','Модель, тыс.кВтч')
14 % график погрешности
15 nexttile
16 scatter(t,(W-Wn)./W*100,'ob')
17 title('Погрешность, %')

```

а)

```

Command Window
Solver stopped prematurely.

lsqcurvefit stopped because it exceeded the function evaluation limit,
options.MaxFunctionEvaluations = 5.000000e+02.

x =

1.0e+04 *

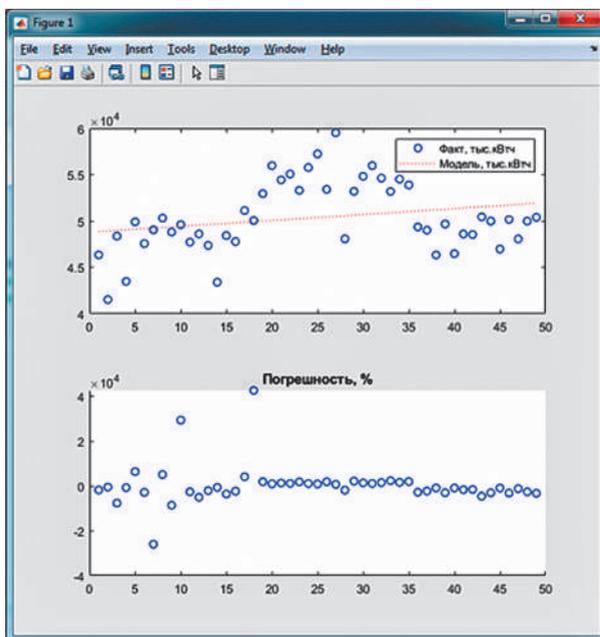
    0.0064    4.8800    0.0001    0.0009    0.0001

f_t >>

```

б)

Рис. 2. Прогноз месячного электропотребления: а — программный код; б — результаты расчета коэффициентов аппроксимации; в — результаты прогнозирования (начало)



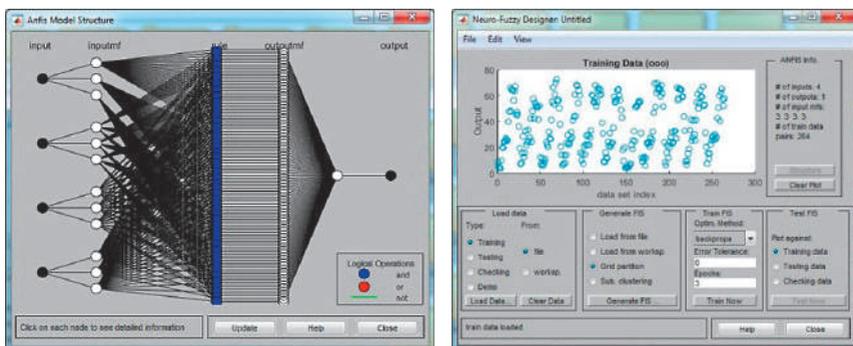
в)

Рис. 2. Прогноз месячного электропотребления: а — программный код; б — результаты расчета коэффициентов аппроксимации; в — результаты прогнозирования (окончание)

Для прогнозирования суточного графика (см. рис. 1, а) использование параметрических моделей неприемлемо из-за чрезмерной погрешности (средняя погрешность около 20 %), поэтому в качестве метода прогноза выбран нейросетевой алгоритм Такаги—Сугено. Выбор сделан из-за доступности и повторяемости результатов; алгоритм программно реализован (доведен до конечного пользователя) в *Fuzzy Logic Toolbox*.

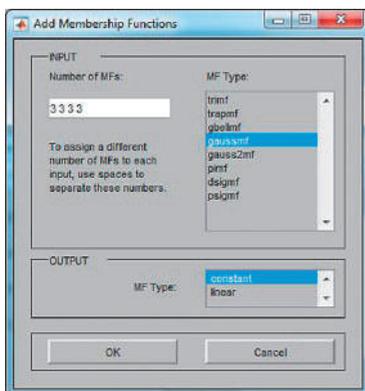
Структура сети показана на рис. 3, а. Для создания, настройки, проверки на тестовом множестве используется редактор *ANFIS*, его внешний вид приведен на рис 3, б. Исходными данными для обучения сети являются четыре входных параметра (текущая нагрузка и нагрузки за три предыдущих часа) и один выходной (нагрузка следующего часа).

Для обучения использовались данные за месяц (31 суточный график с осреднением в 1 час). Установлено, что больший объем информации (как в объеме выборки, так и в количестве входных переменных) не приводит

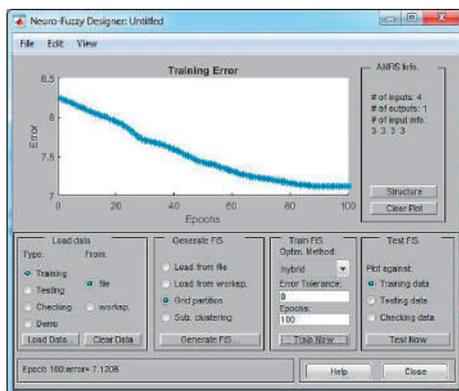


a)

б)



в)



г)

Рис. 3. Использование нейросетевого алгоритма Сугено: *a* — структура сети; *б* — интерфейс редактора с загруженным временным рядом; *в* — параметры сети; *г* — погрешность верифицированного ряда на тестовом множестве

к повышению точности модели (напротив, происходит «переобучение» сети, приводящее к увеличению погрешности). Погрешность на обучающем множестве в 7,12 % (рис. 3, *г*) говорит о более высокой точности прогноза в сравнении с моделями экстраполяции. Повышение точности прогноза достигается не оптимизацией алгоритма, а изменением входной информации.

Произведена модификация базовой модели (с дальнейшим построением сети аналогично рис. 3). Первая модель заключается в сглаживании верифицированного ряда (аналогично рис. 2, *б*). Вторая — в переходе

от абсолютных величин мощности к их относительным приращениям в виде

$$\Delta P_k = (P_t - P_{t-1})/P_{t-1}, \quad (3)$$

где k — расчетный порядковый номер (индекс) элемента в массиве; t — номер временного интервала.

Результаты моделирования на тестовом множестве (при построении обучающего множества эти 60 точек временного ряда полагались неизвестными и не использовались в обучающей последовательности) приведены в табл. 1. Таким образом, можно сделать вывод о работоспособности модели при ее соответствующей настройке и обработке исходного временного ряда.

Т а б л и ц а 1

Относительная погрешность модели при вариации исходных данных

Модель	Тип входного массива	Ошибка MAPE, %	Максимальная ошибка, %
1	Верифицированный временной ряд	5,17	9,58
2	Верифицированный сглаженный ряд	3,52	5,96
3	Верифицированный временной ряд в виде приращения мощности	2,50	4,93

Обсуждение. При использовании функций необходимо учитывать версию программы MatLab. Например, функции экспорта/импорта *xlswrite/xlsread* не рекомендуется в релизах, начиная с R2019a. Подбор эмпирической зависимости в MatLab может быть реализован различными функциями. В частности, сезонную составляющую S можно определять не в явном виде (см. рис. 2, *a*), а с использованием функции «*Sum of Sin Functions*» в библиотеке *Curve Fitting Toolbox* (возвращает коэффициенты зависимости $a \sin(bx + c)$ или ее комбинаций).

Корректность применения MS Excel [9] не вызывает сомнений. Но подбор линии тренда возможен лишь для небольшого набора функций (степенная и экспоненциальная зависимости для отрицательных значений не реализуются). А использование надстройки «Поиск решения» («*Solver*») зачастую к решению не приводит (в частности, решить в общем виде уравнение (2) нам не удалось).

Разумеется, возможно применение различного программного обеспечения. Для оптимизации структуры техноценозов [10] успешно использован MathCAD. Тем более у MathCAD есть свои сильные стороны — отметим простоту использования и высокую функциональность процедур импорта/

экспорта. Нельзя утверждать, что MatLab лучше других программ — речь идет исключительно о работоспособности моделей.

Наряду с МНК распространен метод наименьших модулей (минимизируется сумма модулей отклонений). Ранее, в [11] установлено, что такой метод дает лучшие результаты, когда прогнозируемый параметр распределен как случайная величина, по закону, отличающемуся от нормального.

Выводы

1. Использование современных пакетов прикладной математики создает информационную основу принятия обоснованных решений при прогнозировании параметров электропотребления.

2. Использование Matlab дает приемлемые результаты при оценке суточного и месячного электропотребления объекта исследования. Наилучший прогноз получен параметрическим МНК при сглаженном временном ряде.

3. Подтверждена несостоятельность прогнозирования графика нагрузки методами экстраполяции временного ряда электропотребления (включая автокорреляционные и структурные). Показана принципиальная возможность построения прогнозной модели на основе нейронных сетей.

4. Выбран алгоритм Сугено с программной реализацией в MatLab. Получены оптимальные условия модели — четыре входных и один выходной параметр (с тремя термами для каждой переменной); необходимый объем для обучения сети в один месяц (суточные графики нагрузки) со 100 циклами (эпохами) обучения; функции принадлежности данных (треугольная для входных параметров, линейная — для выходного).

5. Установлено, что определяющее значение для точности прогноза имеет обработка исходных данных, поэтому необходима их верификация с последующим сглаживанием (а при необходимости и аппроксимацией).

Литература

1. **Линник Ю.В.** Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М.: Физматгиз, 1958. 334 с.
2. **Дьяконов В.П.** Применение персональных ЭВМ и программирование на языке Бейсик. Москва: Радио и связь, 1989. 286 с.
3. **Горелова Г.И., Кацко И.А.** Теория вероятностей и математическая статистика в примерах и задачах с применением Excel. Ростов-на-Дону: Феникс, 2010. 257 с.
4. **Жилин Б.В.** Информационно-методологическое обеспечение определения параметров электропотребления на ранних стадиях проектирования: дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03. М., 2003. 345 с.

5. **Крюков О.В., Саушев А.В.** Методология вейвлет-преобразования при анализе автоматизированных электроприводов // Фёдоровские чтения — 2020: I международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2020. С. 174—178.
6. **Исаев А.С., Соболев Н.Д.** Модели среднесрочного прогнозирования электропотребления. Современные тенденции развития науки и мирового сообщества в эпоху цифровизации: сборник научных статей II между. научн.-практ. конф. 25 июня 2021 г. Москва: ООО «ИРОК». 2021. С. 85—89.
7. **Шерстнева А.А., Шерстнева О.Г.** Идентификация авторегрессионного процесса в среде MatLab // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 7. С. 34—38.
8. **МО Щекинский район.** Официальный портал. [Электронный ресурс]. URL: <http://schekino.ru/city/econom/>. Дата обращения: 16.09.2021.
9. **Гребеникова И.В.** Методы математической обработки экспериментальных данных: учебно-методическое пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 124 с.
10. **Гнатык В.И., Кивчун О.Р., Морозов Д.Г.** Реализация процедуры режимного нормирования для подсистем регионального электроэнергетического комплекса // Фёдоровские чтения — 2021: LI международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2021. С. 16—22.
11. **Мудров В.И., Кушко В.Л.** Метод наименьших модулей. Монография. М.: Наука, 2013. 672 с.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ МОЩНОСТИ УЛИЧНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Поставлена задача разработки методики выбора и обоснования перехода в другую ценовую категорию на розничном рынке электроэнергии, что может дать для некоторых потребителей снижение платы за электроэнергию на 10—30 % при тех же объемах потребления. Экономия должна определяться как разница платы за электроэнергию по существующей и предлагаемой системам расчетов.

В РФ с 2012 года [1] действует новая система расчетов за электрическую энергию на розничных рынках для потребителей — юридических лиц.

Сейчас предлагаются шесть ценовых категорий (1ЦК ÷ 6ЦК), т.е. шесть вариантов оплаты электроэнергии, причем вариант оплаты выбирает по-

требитель. Для каждого потребителя можно определить ценовую категорию, при которой оплата будет минимальна. Без тщательного анализа режимов электропотребления, без многовариантных расчетов нельзя однозначно сказать, какая ценовая категория будет оптимальна. Снижение оплаты возможно на основании расчетов для каждой ценовой категории, что позволит разработать рекомендации для потребителя.

Постоянно изменяется нормативно-правовая база в сфере обращения электроэнергии, постоянно меняются составляющие тарифов. Поэтому для мониторинга ситуации на рынках электроэнергии, своевременной реакции на изменение режима потребления требуется высокая квалификация энергоменеджера потребителя. Разработанные методики и программы расчетов позволяют энергоменеджеру принимать обоснованные решения при работе на розничном рынке.

Разработана программа расчета платы за электроэнергию по шести ценовым категориям. Предложена методика моделирования профилей мощности по точкам поставки для уличного освещения. Рассчитана плата за электроэнергию на уличное освещение г. Новомосковска Тульской области по четырем ценовым категориям и выбрана оптимальная ценовая категория. Произведена оценка перспективных значений параметров, влияющих на величину платы за электроэнергию.

Методы. Изложенная вербально в [1] система расчетов за электроэнергию по ценовым категориям (ЦК) нами описана аналитически в виде формул для определения платы по 1ЦК ÷ 6ЦК. Разработана программа для расчетов [2, 3].

По 1ЦК месячная плата за электроэнергию составит

$$\Pi_{1ЦК} = b_{1ЦК} W_M, \quad (1)$$

где W_M — потребленная за месяц электроэнергия, учтенная счетчиками, МВт·ч; $b_{1ЦК}$ — тарифная ставка за электроэнергию по 1ЦК в данном месяце, руб/(МВт·ч). Тарифные ставки на электроэнергию и мощность берутся с сайтов гарантирующих поставщиков [4, 5].

Плата по 2ЦК составит

$$\Pi_{2ЦК} = b_{п} W_{п} + b_{пп} W_{пп} + b_{н} W_{н}, \quad (2)$$

где $b_{п}$, $b_{пп}$, $b_{н}$ — тарифные ставки за электроэнергию в данном месяце соответственно в пиковую, полупиковую и ночную зоны суток, руб/(МВт·ч); $W_{п}$, $W_{пп}$, $W_{н}$ — месячное потребление электроэнергии в соответствующие зоны суток, МВт·ч. Диапазоны тарифных зон суток на год по месяцам публикуются АТС [6].

Плата по 3ЦК:

$$\text{Пзцк} = a_{\text{ОРЭ}} P_{\text{ОРЭ}} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{24} (b_{ij} W_{ij}), \quad (3)$$

где b_{ij} — тарифная ставка за электроэнергию в i -е сутки, j -й час суток в расчетном месяце, руб/(МВт·ч); W_{ij} — электроэнергия, потребленная в соответствующий час, МВт·ч; I — число суток в месяце; $a_{\text{ОРЭ}}$ — тарифная ставка за мощность, приобретаемую на оптовом рынке электроэнергии (мощности) (ОРЭ), руб/МВт; $P_{\text{ОРЭ}}$ — мощность, приобретаемая на оптовом рынке электроэнергии ОРЭ, МВт:

$$P_{\text{ОРЭ}} = \frac{\sum_{r=1}^R P_{\text{ОРЭ}r}}{n_{\text{рд}}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{ОРЭ}r}$ — среднечасовая мощность, фиксируемая в отчетный час пиковой нагрузки r -го рабочего дня месяца [4, 5], МВт; R — множество рабочих дней месяца; $n_{\text{рд}}$ — количество рабочих дней в месяце. Для 3ЦК требуется почасовой учет электроэнергии за расчетный месяц.

Плата по 4ЦК:

$$\text{П4цк} = a_{\text{ОРЭ}} P_{\text{ОРЭ}} + a_c P_c + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{24} (b_{ij} W_{ij}), \quad (5)$$

где P_c — мощность передачи по сетям, кВт; a_c — тарифная ставка за эту мощность (руб/МВт); мощность передачи по сетям определяется как

$$P_c = \frac{\sum_{r=1}^R P_{cr}}{n_{\text{рд}}}, \quad (6)$$

где P_{cr} — максимальная мощность из диапазона плановых часов пиковой нагрузки рабочих суток, задаваемого на каждый месяц текущего года [6].

Плата по 5ЦК:

$$\text{П5цк} = a_{\text{ОРЭ}} P_{\text{ОРЭ}} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{24} (W_{ij\phi} b_{ij\phi} + (W_{ij\Pi} - W_{ij\phi}) W b_{ij(-+)}), \quad (7)$$

где $W_{ij\phi}$, $W_{ij\Pi}$ — соответственно фактическое и плановое часовое потребление электроэнергии в i -е сутки, j -й час суток в расчетном месяце, МВт·ч; $b_{ij\phi}$ — тарифная ставка за фактически потребленную электроэнер-

гию в соответствующий час, руб/(МВт·ч); $b_{ij(-+)}$ — тарифная ставка за превышение $W_{ij\text{ ф}}$ над $W_{ij\text{ п}}$; $b_{ij(-)}$ — тарифная ставка за превышение $W_{ij\text{ п}}$ над $W_{ij\text{ ф}}$ (недобор) в i -й день, j -й час месяца, руб/(МВт·ч); $a_{\text{ОРЭ}}, P_{\text{ОРЭ}}$ — то же, что и для ЦКЗ; $b_{ij(-)}, b_{ij+}$ в [4, 5].

За превышение $W_{ij\text{ ф}}$ над $W_{ij\text{ п}}$ в ночные часы плата не берется и, наоборот, плата за недобор берется в основном в ночные часы суток.

Расчеты по 6ЦК:

$$P_{6\text{ЦК}} = a_{\text{ОРЭ}}P_{\text{ОРЭ}} + a_{\text{с}}P_{\text{с}} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{24} (W_{ij\text{ ф}}b_{ij\text{ ф}} + (W_{ij\text{ п}} - W_{ij\text{ ф}})b_{ij(-+)}), \quad (8)$$

где $a_{\text{ОРЭ}}, P_{\text{ОРЭ}}$ определяются аналогично 3ЦК; $a_{\text{с}}, P_{\text{с}}$ — определяются аналогично 4ЦК.

Разработанную программу применили для анализа платы за электроэнергию, расходуемую на уличное освещение (УО) г. Новомосковска. Администрация МО г. Новомосковск приобретает электроэнергию у сбытовой компании ООО «ГП и СЗ Новомосковская энергосбытовая компания» для разных точек поставки (ТП), рассчитываясь по 1ЦК и 2ЦК.

Для выбора оптимальной ЦК необходимо выполнить расчеты по всем ЦК, однако мы ограничились 1ЦК÷3ЦК, так как 5ЦК и 6ЦК требуют планирования месячного потребления по часам для всех ТП с оплатой отклонений от плановых значений, что усложняет отчетность и пока представляется сложной задачей для энергослужбы администрации города.

Особенность анализа вариантов оплаты электроэнергии сейчас состоит в том, что при расчетах по 1ЦК и 2ЦК отсутствуют отчетные данные по профилям мощности ТП, однако особенности режима работы УО позволили в первом приближении смоделировать профили.

Исходные данные для анализа взяты из актов приема-передачи ЭЭ (мощности). Наиболее мощные точки поставки (ТП) рассчитываются по 2ЦК, их количество составляет 133 (март 2019 г.), их электропотребление составляет 91 % общего потребления на УО города. Для предварительного анализа платы по разным ЦК взяты эти ТП. Большинство ТП (129 шт.) питаются на напряжении СН2, остальные (4 шт.) — на напряжении НН. Общее месячное потребление электроэнергии по выделенным ТП $W_{\text{м}\Sigma} = 458\,354$ кВт·ч.

На основании акта приема—передачи составлена сводная таблица, фрагмент которой приведен в табл. 1. Приняты следующие обозначения: $W_{\text{н}}, W_{\text{пш}}, W_{\text{п}}$ — соответственно месячное потребление электроэнергии в ночную, полупиковую и пиковую зоны суток; W_{Σ} — суммарное месячное потребление ТП; $W_{\Sigma*}$ — потребление в относительных единицах (в долях потребления наиболее крупной ТП); $P_{\text{ср.ч}}$ — средняя часовая мощность ТП.

Таблица 1

Месячное электропотребление по ТП (фрагмент)

Номер	$W_{п'}$ кВт·ч	$W_{пп'}$ кВт·ч	$W_{п''}$ кВт·ч	$W_{\Sigma'}$ кВт·ч	$W_{\Sigma''}$ о.е.	$P_{ср.ч'}$ кВт
1	8200	3240	1380	12 820	1	36,02
2	6740	1840	2080	10 660	0,83	29,95
3	6920	1760	1860	10 540	0,82	29,62
4	6440	1640	1720	9800	0,76	27,54
5	6240	1640	1700	9580	0,75	26,92
...
127	120	60	0	180	0,01	0,51
128	30	60	30	120	0,01	0,34
...
133	0	0	0	0	0	0

Для расчета платы по 3ЦК и 4ЦК нужен месячный график нагрузки по каждой ТП с интервалом осреднения мощности в 1 час. Так как почасовое потребление при 2ЦК не фиксируется, то смоделирован месячный график нагрузки по имеющимся данным, основываясь на следующих положениях.

1. Светильники УО включаются через 20 мин после заката солнца и отключаются за 20 мин до восхода (табл. 2), где $t_{вкл}$, $t_{откл}$, t_p — соответственно время включения, время отключения, время работы за сутки. За март время работы УО уменьшилось с 12 ч 38 мин до 10 ч 19 мин в сутки [7]. Время работы за месяц $t_{p\Sigma}$ определяется суммированием t_p по суткам.

Таблица 2

Время работы светильников УО в марте (фрагмент)

Дата	Закат	Восход	$t_{вкл}$	$t_{откл}$	t_p
01	18:02	7:21	18:22	7:01	12:38
02	18:04	7:18	18:24	6:58	12:33
03	18:06	7:16	18:26	6:56	12:29
04	18:09	7:13	18:29	6:53	12:24
...
31	19:04	6:03	19:24	5:43	10:19

2. Не учитываем, что часть светильников двухламповые и одна лампа отключается ночью, когда интенсивность движения по улицам минимальна.

3. Учитывая равномерный график нагрузки освещения, среднюю за час мощность по ТП определяем, как отношение месячного электропотребления ТП к общему времени работы за месяц:

$$P_{\text{ср.ч}} = W_{\Sigma} / t_{\text{р}\Sigma} \quad (9)$$

где $t_{\text{р}\Sigma} = 355,9$ ч — общее время работы УО в марте по табл. 2.

4. Для формирования месячного графика нагрузки по ТП определялись среднечасовые мощности в относительных единицах $P_{\text{ср.ч}}^*$ для каждого часового интервала суток (табл. 3). Если светильники работают полный час ($t_{\text{рч}} = 1$ ч), то $P_{\text{ср.ч}}^* = 1$, если неполный ($t_{\text{рч}} = X_{\text{ч}}$), то $P_{\text{ср.ч}}^* = X$. Если светильник отключен, то $P_{\text{ср.ч}}^* = 0$.

Таблица 3

Месячный почасовой график нагрузки ТП в о.е. (фрагмент)

Дата 01.03				Дата 31.03			
Время	$P_{\text{ср.ч}}^*$ о.е.	Время	$P_{\text{ср.ч}}^*$ о.е.	Время	$P_{\text{ср.ч}}^*$ о.е.	Время	$P_{\text{ср.ч}}^*$ о.е.
0—1	1,0	12—13	0	0—1	1,00	12—13	0
1—2	1,0	13—14	0	1—2	1,00	13—14	0
7—8	0,017	19—20	1,0	7—8	0,00	19—20	0,60
8—9	0	20—21	1,0	8—9	0,00	20—21	1,0
...
11—12	0	23—24	1,0	11—12	0,00	23—24	1,0

5. Месячный график нагрузки каждой ТП в именованных единицах формировался умножением $P_{\text{ср.ч}}^*$ (см. табл. 3) на $P_{\text{ср.ч}}$ (см. табл. 1).

Результаты. Суточные графики нагрузки по ТП отличаются из-за изменения продолжительности светового дня. Примеры суточных графиков нагрузки за первый и последний дни месяца в марте 2019 г. и ноябре 2021 г. приведены на рис. 1 и 2.

Месячные объемы потребления электроэнергии по ТП отличаются на два порядка $W_{\Sigma \text{ max}} = 12\,820$ кВт·ч, $W_{\Sigma \text{ min}} = 120$ кВт·ч. Расчеты платы по ЦК проводились с помощью программы, реализующей формулы (1)—(8).

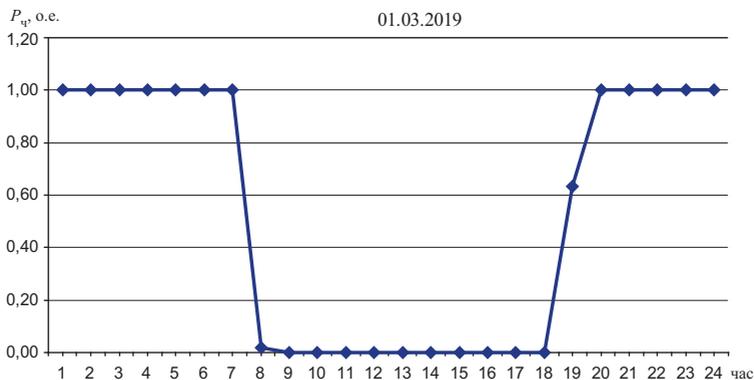


Рис. 1. Профиль мощности УО в о.е. за 01.03.2019 г.

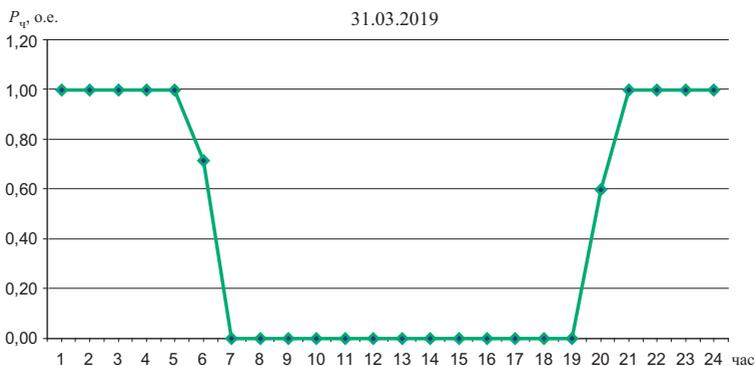


Рис. 2. Профиль мощности УО в о.е. за 31.03.2019 г.

Плата за электроэнергию по 1ЦК—4ЦК определялась с использованием тарифных ставок марта 2019 г. и марта 2021 г., данных по плановым часам пиковой нагрузки, отчетным часам пиковой нагрузки, по интервалам тарифных зон суток [4—6].

Интервалы тарифных зон суток в 2019 и в 2021 гг. одинаковые: ночная — с 23.00 до 07.00, пиковая — с 08.00 до 12.00 и с 18.00 до 21.00. Полупиковая зона — остальные часы суток.

Плата за электроэнергию определялась по каждой ТП и в целом на УО г. Новомосковска.

Обсуждение. Расчеты показали, что по данным марта 2019 г. принятая 2ЦК не оптимальна. Плата за электроэнергию по 2ЦК больше, чем для остальных сравниваемых ЦК. Минимальная плата была бы по 3ЦК.

Рассчитана экономия платы за электроэнергию при переходе с 2ЦК на другие ЦК (табл. 4).

Таблица 4

**Экономия платы за электроэнергию за март 2019 г.
по сравнению со 2ЦК с НДС, руб.**

Экономия	$\Pi_{2ЦК} - \Pi_{1ЦК}$	$\Pi_{2ЦК} - \Pi_{3ЦК}$	$\Pi_{2ЦК} - \Pi_{4ЦК}$
руб.	158 358,0	659 695,8	513 890,9
%	4,8	20,0	15,6

По данным ноября 2021 г. принятая 2ЦК также не оптимальна. Минимальная плата была бы по 4ЦК (табл. 5).

Таблица 5

**Экономия платы за электроэнергию за ноябрь 2021 г.
по сравнению со 2ЦК, с НДС, руб.**

Экономия	$\Pi_{2ЦК} - \Pi_{1ЦК}$	$\Pi_{2ЦК} - \Pi_{3ЦК}$	$\Pi_{2ЦК} - \Pi_{4ЦК}$
руб.	263 071,8	211 459,3	435 535,4
%	5,2	4,2	8,6

Заключение. Таким образом, для администрации МО г. Новомосковск выгоден переход на 3ЦК или 4ЦК при оплате электроэнергии на уличное освещение по выделенным ТП. Ожидаемая экономия платы 10—20 %.

Для проверки модели сняты реальные профили мощности по одной из ТП УО г. Новомосковск с 01.01.2021 по 31.07.2022. Расчеты платы по 1ЦК—4ЦК (табл. 6) показали, что переход с 2ЦК на 4ЦК даст годовую экономию платы за электроэнергию 26,4 %.

Таблица 6

Плата за электроэнергию по ЦК (руб. с НДС) за 2021 г.

1ЦК	2ЦК	3ЦК	4ЦК
1 083 279,68	1 038 529,34	916 725,97	764 629,74

Для отслеживания динамики платы за электроэнергию по ЦК необходимо собрать статистику и построить прогнозные модели параметров, влияющих на величину платы за ЭЭ.

Литература

1. **Постановление** Правительства РФ от 04.05.2012 г. № 442 «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии».
2. **Исаев А.С., Ошурков М.Г.** Выбор ценовой категории потребителем при заключении договора энергоснабжения // Изв. ТулГУ. Технические науки. Вып. 8. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. С. 50—59.
3. **Ошурков М.Г., Бирюков К.Р.** Программа расчета платы за электроэнергию на розничных рынках // XXIV научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов, студентов. Тезисы докладов. Новомосковск, 2022.
4. **Нерегулируемые** цены [Электронный ресурс]. <https://www.nesk71.ru/>
5. **Нерегулируемые** цены [Электронный ресурс]. <https://tula.tns-e.ru/>
6. **Администратор** торговой системы оптового рынка электроэнергии [Электронный ресурс]. <http://www.atsenergo.ru/>
7. **Солнечный** календарь в Новомосковске [Электронный ресурс]. <https://ru.365.wiki/world/russia/novomoskovsk/sun/calendar/>

СЕКЦИЯ 3

РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ, ОРГАНИЗАЦИЙ И УЧРЕЖДЕНИЙ

*В.В. Вахнина, vvahnina@yandex.ru,
А.А. Кувшинов, alekseikuvshinov@yandex.ru,
Р.Н. Пудовинников, roman73-73@yandex.ru,
ФГБОУ ВО «ТГУ», г. Тольятти*

ОЦЕНКА СИММЕТРИЧНОЙ ПЕРЕГРУЗКИ СТАТОРА И РОТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ НАСЫЩЕНИИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ БЛОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Оценка симметричной перегрузки статора и ротора синхронных генераторов (СГ) электростанций при геомагнитных возмущениях имеет значение при проектировании и эксплуатации электроэнергетических систем (ЭЭС), особенно расположенных в высокоширотных регионах. Большая часть главных схем электрических соединений всех типов электростанций (тепловых, атомных, гидравлических) строится по блочному принципу [1]. В блочных трансформаторах с номинальной мощностью более 100 МВА обычно используют бронестержневую или броневую конструкции магнитной системы при трехфазном и однофазном исполнении соответственно, которые представляют наибольшую уязвимость к геомагнитным возмущениям [2]. Поэтому насыщение магнитной системы блочных трансформаторов во время геомагнитных возмущений может вызвать существенные проблемы функционирования синхронных генераторов в ЭЭС из-за увеличения реактивной нагрузки статора и тока возбуждения ротора [3].

Для оценки возможной симметричной перегрузки статора реактивным током и ротора током возбуждения рассмотрим типовую нагрузочную диаграмму турбогенератора, которая представлена на рис. 1 [4].

Нагрузочная диаграмма построена в осях «активная мощность (P) — реактивная мощность (Q)», значения которых указаны в относительных единицах. В качестве базисной величины использована номинальная полная мощность турбогенератора. Точка «Н» типовой нагрузочной диаграммы соответствует номинальному режиму работы турбогенератора с номинальной величиной коэффициента мощности и номинальной активной

мощностью. Область допустимых режимов работы турбогенератора ограничивается кривыми A , B и C .

Кривая A соответствует работе турбогенератора с номинальным током возбуждения и характеризуется поэтому примерно постоянным превышением температуры обмотки ротора; кривая B соответствует работе турбогенератора с номинальным током статора и также характеризуется примерно постоянным превышением температуры обмотки статора; кривая C показывает предел, обусловленный местными нагревами в торцевой зоне или статической устойчивости турбогенератора.

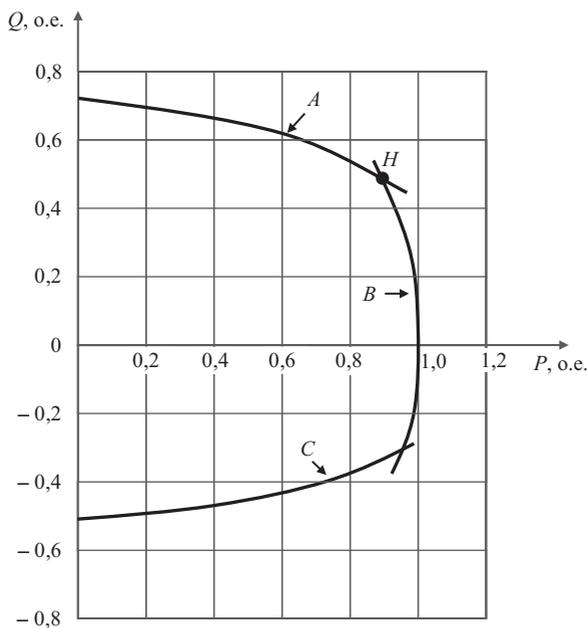


Рис. 1. Типовая нагрузочная диаграмма турбогенератора

В области допустимых режимов возможна работа турбогенератора как с выдачей реактивной мощности (положительные значения Q на рис. 1), так и с ее потреблением (отрицательные значения Q на рис. 1).

Работа турбогенератора за пределами области допустимых режимов сопровождается перегрузкой по току статора (нарушение границы, обозначенной кривой B) или по току ротора (нарушение границы, обозначенной кривой A), продолжительность которых должна быть ограничена [4, 5].

В частности, турбогенераторы должны без повреждений и остаточных деформаций допускать перегрузку кратностью 1,5 номинального тока статора в течение [4]:

- 120 с при косвенном охлаждении обмотки статора;
- 60 с при непосредственном (газовом или жидкостном) охлаждении обмотки статора.

Гидрогенераторы должны допускать перегрузки по току статора, указанные в табл. 1 [5].

Возможность перегрузки гидрогенераторов по току статора с кратностью 2,0 допускается только при косвенном воздушном охлаждении статорных обмоток. Для всех остальных типов гидрогенераторов и всех турбогенераторов предельная кратность перегрузки по току статора не должна превышать 1,5.

Таблица 1

Допустимые перегрузки гидрогенераторов по току статора

Кратность перегрузки	Продолжительность перегрузки, мин	
	При косвенном воздушном охлаждении обмотки статора	При непосредственном водяном охлаждении обмотки статора
1,1	60	
1,15	15	
1,2	6	
1,25	5	
1,3	4	
1,4	3	2
1,5	2	1
2,0	1	—

Роторы турбогенераторов и гидрогенераторов должны выдерживать 2-кратный номинальный ток возбуждения в случае форсировки возбуждения, допустимая продолжительность которой указана в табл.2 [4, 5].

Максимальная перегрузка турбогенераторов и гидрогенераторов активной мощностью ограничивается мощностью, которую могут развивать первичные двигатели (паровые турбины и гидротурбины), и оказывается крайне незначительной при геомагнитных возмущениях на блок «синхронный генератор — трансформатор». Это объясняется тем, что возникающие при геомагнитных возмущениях квазипостоянные токи (КПТ) практически не оказывают влияния на режим работы первичных двигателей.

Допустимые длительные форсировки возбуждения

Длительность форсировки, с	Турбогенераторы	Гидрогенераторы
50	С косвенным охлаждением обмотки ротора	
20	С непосредственным охлаждением обмотки ротора	
15	Мощностью от 800 МВт до 1200 МВт	—
10	Мощностью от 1200 МВт и более	—

Перегрузка турбогенераторов и гидрогенераторов реактивной мощностью, вызванная необходимостью компенсации возрастающей под действием КПТ мощности намагничивания блочного трансформатора путем форсирования возбуждения вплоть до потолочного, может оказываться весьма значительной. При сохранении неизменного уровня активной мощности увеличение реактивной мощности генератора вызовет перегрузку полной мощностью (см. рис. 1), которая будет сопровождаться перегрузкой по току статора кратностью до 2,0 ... 2,5 за счет реактивной составляющей тока. Одновременно будет перегружаться и обмотка возбуждения вследствие форсирования возбуждения.

Выполнена оценка возможной симметричной перегрузки статора и ротора СГ блока «турбогенератор ТВВ-320 — блочный трансформатор ТДЦ-400000/220/20». Упрощенная электрическая схема блока представлена на рис. 2. Параметры электрической схемы определяются из паспортных данных элементов блока. При моделировании принято предположение, что турбогенератор оснащен АРВ, функционирование которого при воздействии КПТ на ЭЭС позволяет поддерживать напряжения на генераторных шинах постоянным и равным номинальному значению $U_{\Gamma} = 20$ кВ. Напряжение на шинах приемной энергосистемы ЭЭС принято равным

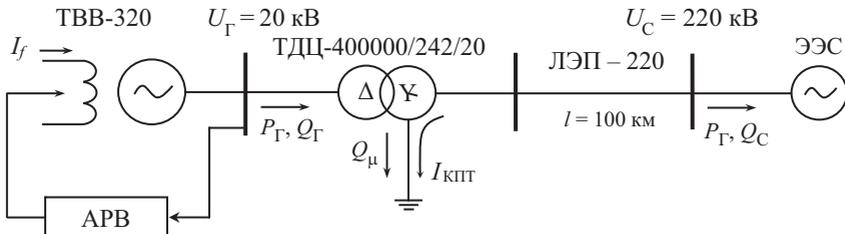


Рис. 2. Упрощенная электрическая схема блока «ТВВ — 320 — ТДЦ — 400000/242/20»

$U_C = 220$ кВ. Полная мощность турбогенератора ТВВ-320 состоит из двух составляющих P_Γ и Q_Γ , одна из которых (активная мощность) в расчетах принимается неизменной $P_\Gamma = P_H = \text{const}$.

В таблице 3 приведены полученные в результате моделирования режимные параметры турбогенератора ТВВ—320 — ток статора $I_{\Gamma(\mu)}$ и ток возбуждения $I_{f(\mu)}$ от величины КПТ.

Выполненные исследования демонстрируют, что увеличение КПТ сопровождается увеличением тока статора и тока возбуждения турбогенератора ТВВ-320. В результате выполненного моделирования получили значение КПТ (примерно 500 А), превышение которого приведет к невыполнению требований [4] и отключению блока.

Таблица 3

Зависимости режимных параметров турбогенератора ТВВ-320 от КПТ

$I_{\text{КПТ}}, \text{ А}$	0	2,4	19	64	148	280	468	713	1015	1367
$I_{\Gamma(\mu)}, \text{ А}$	10,8	10,9	11,0	11,4	12,3	13,7	15,9	18,7	22,1	25,8
$I_{f(\mu)}, \text{ кА}$	2,63	2,64	2,68	2,77	2,95	3,22	3,57	4,04	4,57	5,13

Таким образом, при геомагнитных возмущениях воздействие на блок «синхронный генератор — трансформатор» квазипостоянных токов, достаточных для насыщения магнитной системы блочного трансформатора, будет вызывать одновременную перегрузку синхронного генератора по току статора и току возбуждения. Допустимые уровни и продолжительность указанных перегрузок, представляющих серьезную опасность для синхронных генераторов, регламентированы требованиями ГОСТ ИЕС 60034-3—2015 и ГОСТ 5616—89 (см. табл. 1 и 2) и должны учитываться при выборе уставок релейной защиты, в частности защиты от симметричной перегрузки обмотки статора и защиты ротора от перегрузки током возбуждения.

Литература

1. **Электротехнический справочник**: В 3 т. Т. 3. В 2 кн. Кн. 1. Производство и распределение электрической энергии / под общей ред. профессоров МЭИ: И.Н. Орлова (гл. ред.) и др. — 7-е изд., испр. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1988. 880 с.
2. **Rezaei-Zare A.** Reactive Power Loss Versus GIC Characteristic of Single-Phase Transformers // IEEE Transactions on Power Delivery. January 2015.
3. **Реактивная** нагрузка синхронного генератора при насыщении магнитной системы блочного трансформатора под воздействием квазипостоянных токов / А.А. Кувшинов, В.В. Вахнина, А.Н. Черненко, Р.Н. Пудовинников // Промышленная энергетика. 2021. № 4. С. 11—19.

4. **ГОСТ ИЕС 60034-3—2015.** Машины электрические вращающиеся. Часть 3. Специальные требования для синхронных генераторов, приводимых паровыми турбинами и турбинами на сжатом газе.
5. **ГОСТ 5616—89.** Генераторы и генераторы-двигатели электрические гидротурбинные. Общие технические условия.

*А.В. Бычков, omgwtf955@gmail.com,
О.В. Федяй, o.fedyai@yandex.ru,
ТГУ, г. Тольятти*

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ КВАЗИПОСТОЯННЫХ ТОКОВ НА СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Наиболее восприимчивы к воздействию квазипостоянных токов силовые трансформаторы с броневого и бронестержневой конструкциями магнитной системы [1, 2]. Отключение или повреждение трансформаторов из-за воздействия квазипостоянных токов (КПТ) может приводить к нарушению электроснабжения значительных объемов потребителей [3]. В этой связи актуальной становится проблема защиты силовых трансформаторов от воздействия КПТ.

Структура защитного устройства приведена на рис. 1.

Устройство (рис. 1) содержит токоограничивающий резистор 1, тиристорный ключ 2, соединенные между собой параллельно. Один общий вывод токоограничивающего резистора 1 и тиристорного ключа 2 соединен с моделью источника питания 3 (данная модель имитирует присутствие/отсутствие КПТ; в реальности данный вывод подключен к нейтрали обмоток высокого напряжения силового трансформатора), а второй общий вывод заземлен через измеритель тока 4. Тиристорный ключ 2 образован встречно-параллельно соединенными силовыми тиристорами 5, 6, управляющие электроды которых подключены к блоку управления тиристорами 7. Сигнал с измерителя тока 4 подается на фильтр нижних частот 8 (частота среза фильтра нижних частот выбирается равной $f_c \approx 0,1$ Гц максимально возможной частоте квазипостоянных токов) соединенный с входом триггера Шмитта 9. Также сигнал с измерителя тока 4 подается и на полосовой фильтр 10 (резонансная частота полосового фильтра выбирается равной $f_p = 300$ Гц частоте 6-й гармоники тока намагничивания, которая появляется в нейтрали только при одностороннем насыщении магнитной системы силового трансформатора под воздействием квазипостоянных то-

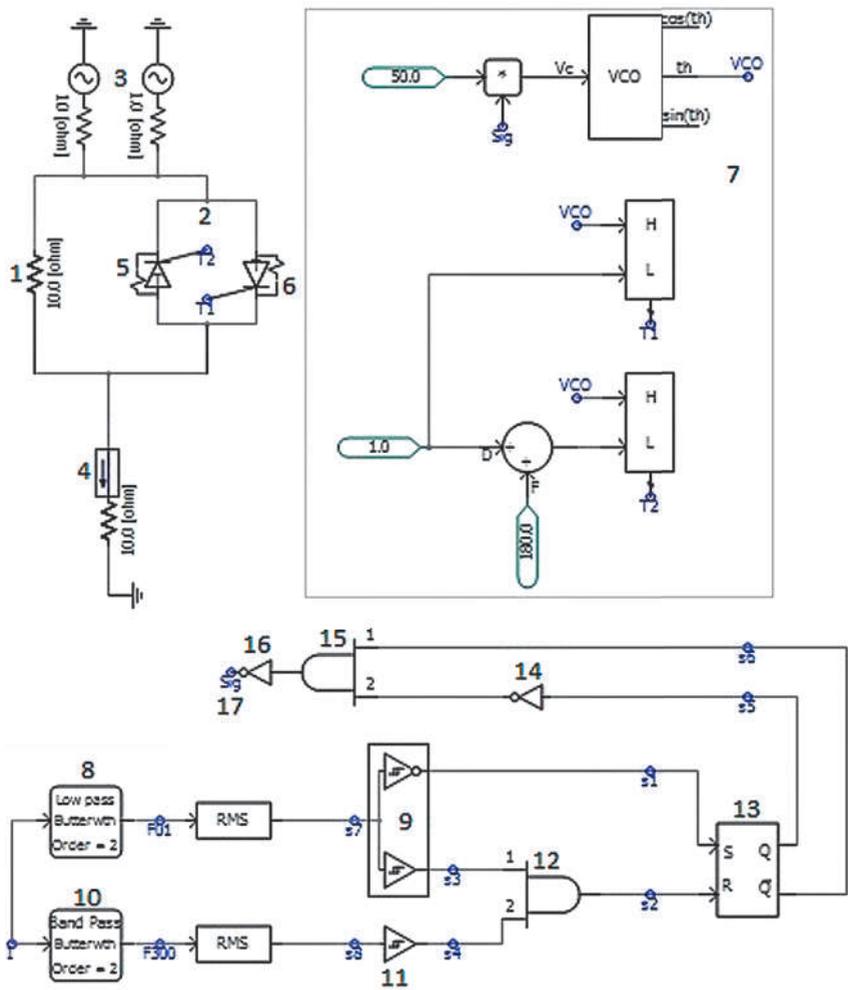


Рис. 1. Схема устройства защиты

ков), соединенный с входом триггера Шмитта 11. Прямые выходы триггера Шмитта 9 и 11 соединены с входами двухвходового конъюнктора 12. Инверсный выход триггера Шмитта 9 соединен с установочным входом «S», а выход двухвходового конъюнктора 12 соединен с установочным входом «R» асинхронного RS-триггера 13. Прямой выход асинхронного RS-триггера 13 соединен через логический инвертер 14 с входом двухвходового конъюнктора 15. Инверсный выход асинхронного RS-триггера 13

соединен с входом двухвходового конъюнктора 15 напрямую. Сигнал с выхода двухвходового конъюнктора 15 через логический инвертер 16 поступает в элемент Sig 17, который осуществляет активизацию или деактивацию тиристорного ключа в зависимости от разряда сигнала (0 или 1).

При отсутствии воздействия КПП система управления СУ формирует управляющие импульсы T1, T2 таким образом, чтобы через силовые тиристоры VS1, VS2 протекали токи i_{VS1} , i_{VS2} , составляющие положительную и отрицательную полуволны тока нулевой последовательности. В результате обеспечивается режим глухозаземленной нейтрали, поскольку дифференциальное сопротивление силовых трансформаторов в открытом состоянии имеет крайне малое значение.

При воздействии КПП формирование управляющих импульсов прекращается, и силовые тиристоры VS1, VS2 запираются, блокируя протекание как токов нулевой последовательности, так и КПП. В результате в период воздействия КПП обеспечивается режим резистивного заземления нейтрали, что позволяет уменьшить величину квазипостоянного тока.

Таким образом устройство успешно выполняет свою защитную функцию.

Литература

1. **Механизмы** воздействия квазипостоянных геоиндуцированных токов на электрические сети: монография / В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, В.А. Шаповалов и др. М.: Инфра-Инженерия, 2018. 256 с.
2. **Boteller D.H.** Effect of geomagnetically induced current B.C. Hydro 500 kV — System // IEEE Trans. Power Deliv. 1989. V. 4. No 1. P. 818—823.
3. **Гершенгорн А.И.** Воздействие геомагнитных токов на электрооборудование энергосистем // Электрические станции. 1993. № 6. С. 54—63.

*Д.С. Чистяков, chistiakov.denis2017@tgu2017@yandex.ru,
О.В. Самолина, 23helga@mail.ru, ТГУ, Тольятти*

СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Развитие цифровых технологий в промышленности вызывает необходимость применения оборудования и приборов, имеющих в своей основе полупроводниковые компоненты. Приборы, содержащие преобразователи сигнала, являются причиной возникновения в сети некоторой доли помех — высших гармоник, которые в свою очередь приводят к появле-

нию негативных последствий. Существуют определенные нормы для порядковых номеров гармонических составляющих, которые описаны в технической документации ГОСТ 30804.3.12—2013 [1]. Считается, что если суммарная составляющая гармоник, определяемая коэффициентом искажения, составляет более 8,5 %, то следует предпринимать какие-либо действия, направленные на снижение уровня гармоник в сети.

Основными действиями, снижающими влияние высших гармоник, являются использование пассивных активных и комбинированных фильтров, магнитных синтезаторов, линейных дросселей, разделительных трансформаторов.

Пассивные фильтры гармоник нашли свое применение в промышленных сетях, где возникает необходимость оптимизации качества подаваемой электроэнергии путем устранения вносимых помех, поступающих от электроустановок с нелинейными нагрузками. Преимущественно такие фильтры используются в выпрямителях, источниках бесперебойного питания и других электроустановках с нелинейной нагрузкой мощностью до 300 кВт, также могут использоваться в электроустановках с более высоким классом мощности. Пассивные фильтры могут состоять как из индуктивности L и емкости C , так и из RLC -цепи. В промышленных сетях используют как однофазные, так и трехфазные пассивные фильтры с преимущественно последовательным соединением LC -цепи и параллельным присоединением к сети (рис. 1).

Звено параллельно подключенного фильтра настраивается на необходимую частоту гармоники и поглощает возникающие помехи, не пропуская их в сеть. Количество звеньев в пассивных LC или RLC фильтрах зависит от генерируемого спектра гармоник или от числа гармоник, которые необходимо компенсировать. Следует отметить, что каждая цепь отвечает за свой порядковый номер гармоники. В RLC -цепях резистор применяют для демпфирования зависимости работы цепи от гармонических колебаний (рис. 2).

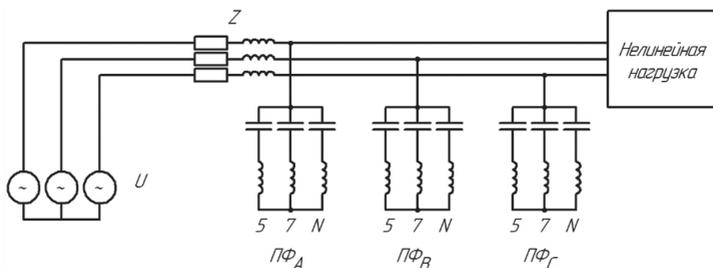


Рис. 1. Пример подключения пассивного фильтра

Последнее звено фильтра может выполняться в виде демпфирующего широкополосного фильтра для большего захвата спектра высших частот. Такое исполнение оправдано при небольших амплитудах частот, так как эффективность такого фильтра снижается при больших колебаниях частоты.

В настоящее время все большее распространение получают демпфирующие LCL фильтры, предназначенные для определенной нагрузки и используемые преимущественно для широтно-импульсных модуляторов. Например, существуют фильтры с демпфирующим резистором, RC демпфером, параллельным и последовательным соединением RLC демпфера. Различные вариации звена фильтра направлены на повышение эффективности его работы в диапазоне компенсируемых частот, снижение расхода материалов и уменьшение стоимости [3].

Можно выделить следующие преимущества пассивных фильтров: надежность, низкая стоимость, могут быть изготовлены на большие мощности, не требуют высоких эксплуатационных затрат. В дополнение к улучшению качества электроэнергии хорошо продуманные пассивные фильтры могут служить способом коррекции коэффициента мощности и падения напряжения, связанных с включением больших нагрузок (например, мощных асинхронных двигателей).

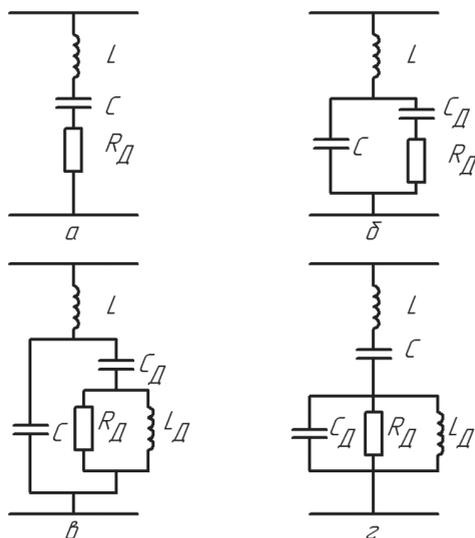


Рис. 2. Современные виды звеньев:

a — звено с демпфирующим резистором; $б$ — звено с параллельным RC демпфером; $в$ — звено с параллельным RLC демпфером; $г$ — звено с последовательным RLC демпфером

Также отметим недостатки пассивных фильтров, некоторые из которых существенны: компенсация или уменьшение влияния только гармоник определенных частот, большой размер, возможность резонанса с сопротивлением системы питания на основной и/или других частотах, сложность изменения настроенной частоты и размеров фильтра после установки, уменьшение эффективности работы фильтра вследствие внешних воздействий, несмотря на то, что в фильтре установлены реакторы; невозможно осуществить бесступенчатое управление, так как фильтр может быть либо включен, либо выключен. Для эффективности действия сопротивление фильтра должно быть меньше сопротивления системы, что может стать проблемой для мощных или жестких систем электроснабжения. Надежность работы фильтра обеспечивается наличием специальных защитных и следящих устройства для контроля коммутационных перенапряжений.

Активные фильтры гармоник можно применять в комбинации с пассивными фильтрами, их также преимущественно подключают параллельно нелинейной нагрузке, хотя возможно и последовательное включение. На рисунке 3 приведен пример параллельного включения активного фильтра.

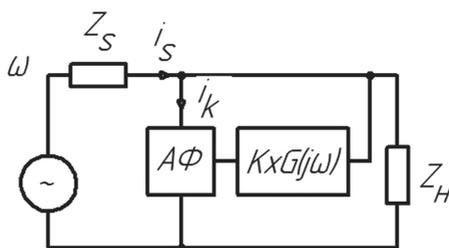


Рис. 3. Параллельное включение активного фильтра

Фильтр представляет собой источник тока, который в свою очередь состоит из токов высших гармоник и реактивной составляющей тока основной гармоники нагрузки. Пункт управления с учетом коэффициента усиления K обеспечивает формирование сигнала управления, задающий фильтру значение тока, который необходимо сгенерировать. В состав активных фильтров входят инверторы, в цепи которых включены силовые транзисторы или тиристоры, управляемые индивидуально. Конденсаторы являются накопителями энергии и служат для сглаживания пульсации. В устройстве, задающем ток, реализуется алгоритм снижения влияния гармоник, преобразуются непрерывные сигналы в управляющие импульсы, и вместе со сглаживающими реакторами обеспечивается отслеживание изменений тока и токов компенсации [2].

При последовательном включении работа фильтра происходит аналогично, но в таком случае фильтр работает эффективнее при близком расположении к объекту компенсации.

Из достоинств такого вида фильтров можно выделить следующие: возможность уменьшения токов нейтрали, отсутствие необходимости тщательного гармонического анализа, возможность настройки, возможность простой модернизации, широкий спектр выбора мощности. К недостаткам относят высокую стоимость относительно пассивных фильтров и большие эксплуатационные затраты.

Гибридные фильтры высших гармоник нашли наибольшее распространение в промышленной энергетике. В основном такие фильтры применяют в системах с преимущественно низковольтными нелинейными трехполюсными нагрузками. Гибридные фильтры представляют собой совокупность пассивных звеньев и активного фильтра. На рисунке 4 приведена схема включения параллельного гибридного фильтра. Как видно из схемы, пассивные звенья настроены на компенсацию гармоник 5 и 7, дополнительно установлен один широкополосный демпфирующий фильтр и активный фильтр.

В гибридных установках мощность активных фильтров значительно меньше, чем у отдельно установленного активного фильтра. Это связано с тем, что он действует как вспомогательное устройство, обеспечивающее дополнительный уровень фильтрации, сглаживающий кривые напряже-

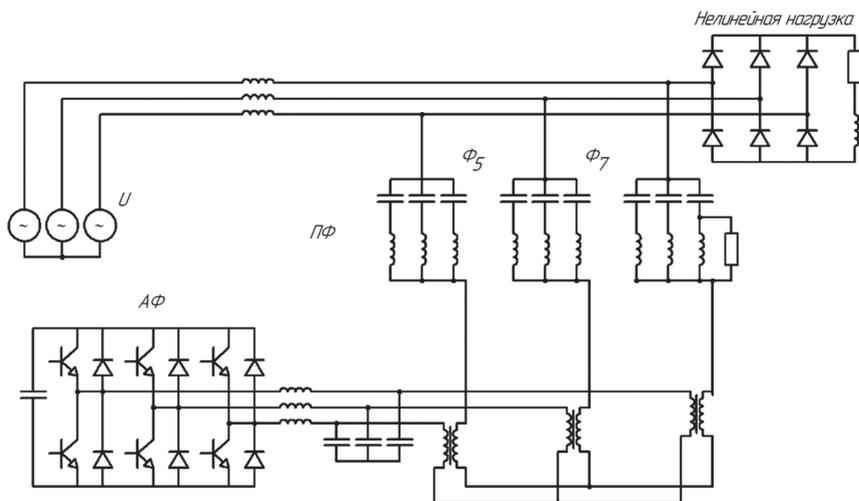


Рис. 4. Схема гибридного фильтра гармоник

ния и тока источника, искажаемых нелинейным потребителем. Такой тип фильтров также имеет способ последовательного включения через трансформатор тока с одинарным коэффициентом трансформации.

Из преимуществ гибридных фильтров выделяют: возможность увеличения коэффициента мощности, уменьшение потерь в системе, улучшение формы кривой тока. К недостаткам относят относительно небольшую мощность и высокую стоимость.

В заключение хотелось бы отметить, что вышеперечисленные фильтры следует применять на основании технико-экономического обоснования. Для точного определения типа проектируемого фильтра следует провести ряд мероприятий, направленных на исследование проектируемой системы:

- провести анализ условий эксплуатации и технических характеристик источников энергии и распределительной системы сети;
- определить гармонические составляющие токов, потребляемую мощность и места подсоединения к сети нелинейных электроприемников;
- выполнить моделирование системы с использованием компенсирующего фильтра;
- проанализировать параметры работы системы с учетом выполненной компенсации.

Проведение таких мероприятий необходимо для проектирования системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой и выбора правильного фильтра. Это позволит уменьшить помехи сети, что положительно скажется как на работе оборудования (продлевается срок его эксплуатации), так и на функционировании системы в целом (уменьшается вероятность нарушения работы).

Например, на промышленных предприятиях источником высших гармоник может быть система освещения. Большая часть осветительных установок генерирует некоторое количество помех в сеть. В основном наибольшее влияние вносят гармоники с 3 по 11. В таком случае оптимальным решением будет использование пассивного фильтра со звеньями, компенсирующими 3, 5, 7, 11 гармоники, с широкополосным демпфирующим фильтром.

Литература

1. **ГОСТ 30804.3.12—2013.** Нормы и методы испытаний. Дата введения 01.01.2014.
2. **Жежеленко И.В.** Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. — 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
3. **Топологии** пассивных фильтров гармоник для низковольтных сетей. ООО «МИКРОН»: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mircond.com/blog/topologii-passivnykh-filtrov-garmonik-dlya-nizkovoltnykh-setey/>

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГИБРИДНОГО ФИЛЬТРА В УСЛОВИЯХ УХУДШЕННОГО КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ

Гибридные фильтры (ГФ) [1—3] представляют собой комбинацию пассивных фильтров (ПФ) и активных фильтров (АФ), что позволяет объединить достоинства и исключить недостатки обоих подходов. В результате обеспечивается эффективность снижения высших гармоник (ВГ) мощных нелинейных нагрузок, широкие возможности регулирования характеристик подавления при изменении структуры сети и уровней гармонической эмиссии, исключается возникновение параллельных резонансов с емкостью ПФ [4], снижается стоимость устройства.

Наиболее часто при реализации системы управления для ГФ и АФ используется p - q регулирование [5, 6], которому свойственны недостатки. Например, если при вычислении компенсирующих токов используется несинусоидальное или несимметричное напряжение, скомпенсированный с помощью ГФ ток нагрузки будет содержать существенные уровни ВГ [7, 8].

В данной статье при помощи моделирования в среде MatLab-Simulink оценивается эффективность работы ГФ с системой управления на базе p - q регулирования в реальных условиях электрической сети с ухудшенным качеством электроэнергии: при наличии несимметрии и несинусоидальности напряжения сети.

Моделирование гибридного фильтра. На рисунке 1, *а* показана наиболее распространенная конфигурация ГФ [1, 2, 4], представляющая собой комбинацию ПФ и АФ, включаемого через трансформатор последовательно с ПФ, что позволяет снизить мощность дорогостоящей активной части ГФ. Такой конфигурации соответствует схема замещения, показанная на рис. 1, *б*, в которой нагрузка представляется в виде источника тока ВГ $I_{НГ}$, ПФ — в виде RLC -цепочки, настроенной в резонанс на частоте ВГ порядка h , а последовательный АФ — в виде источника напряжения $U_{АФ}$.

Напряжение ВГ порядка h в точке подключения нагрузки при условии, что ПФ настроен в резонанс на соответствующей частоте, определяется как

$$U_h = I_{ГФ} Z_{ПФ} U_{АФ} = I_{ГФ} R_{ПФ} U_{АФ} \rightarrow 0. \quad (1)$$

Так, за счет изменения напряжения на выходе АФ (рис. 1, *б*) обеспечивается компенсация падения напряжения на активном сопротивлении ПФ

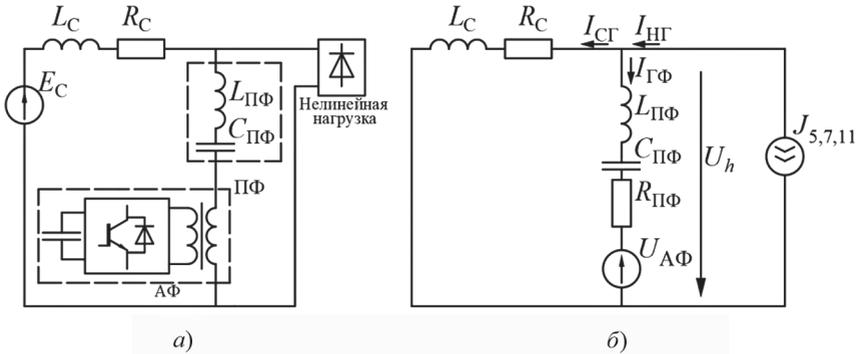


Рис. 1. Структура гибридного фильтра (а), однофазная схема замещения гибридного фильтра для ВГ порядка h (б)

и, тем самым, регулирование добротности Q фильтра (рис. 2, а). В результате повышается эффективность ПФ.

Сетевой ток ВГ можно найти в соответствии с выражением

$$I_{СГ} = I_{НГ} - I_{ГФ} \rightarrow 0. \quad (2)$$

В результате токи ВГ замыкаются через ГФ и, таким образом, вычитаясь из тока нагрузки, не попадают в ток сети. На рис. 2, б представлен результат компенсации токов ВГ нагрузки для случая установки ГФ совместно с каскадом из нескольких ПФ [1].

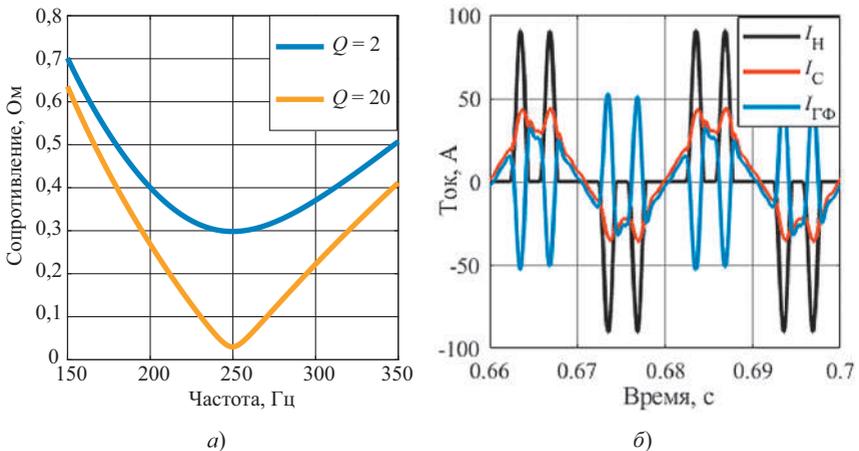


Рис. 2. Влияние добротности на АЧХ сопротивления фильтра (а), кривые токов нагрузки, ГФ и сети (б)

Анализ эффективности работы фильтра проводится для обобщенной сети с нелинейной нагрузкой в виде трехфазного выпрямителя с емкостным фильтром на стороне постоянного тока (рис. 3).

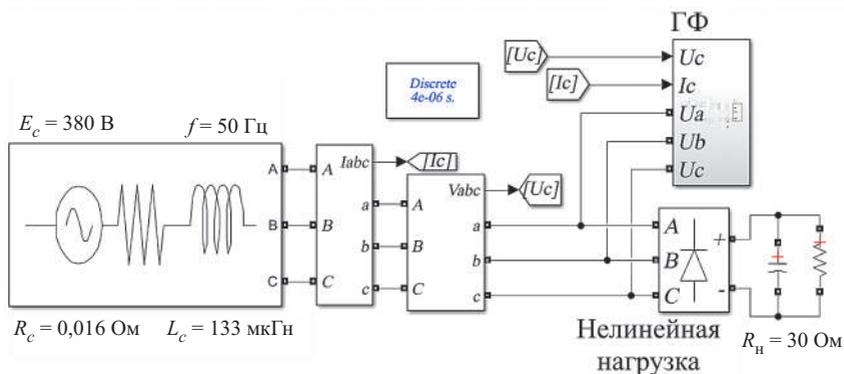


Рис. 3. Схема подключения нелинейной нагрузки и ГФ к электрической сети

На рисунке 4 приведена модель ГФ в среде MatLab-Simulink, которая включает в себя активную часть на базе инвертора напряжения (ИН) и сглаживающего LC -фильтра высокочастотных коммутационных помех, трансформатор связи, обеспечивающий последовательное включение ИН в силовые цепи ПФ и блок системы управления, формирующей на основе измеряемых сетевых параметров и заданного алгоритма регулирования сигналы управления ключами ИН. В результате на выходе ИН формируются напряжение и ток компенсации требуемого гармонического состава. Схема системы управления ИН на базе p - q регулирования приведена на рис. 5.

Гармонический состав сигнала на выходе ИН, обеспечивающий выполнение условий (1) и (2), формируется в результате вычисления мгновенных активной и реактивной мощностей в двухфазной α - β системе координат:

$$\begin{bmatrix} P_{\alpha\beta} \\ q_{\alpha\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\alpha} & u_{\beta} \\ -u_{\beta} & u_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где u_{α} , u_{β} , i_{α} , i_{β} — мгновенные значения напряжений и токов в двухфазной системе координат α - β .

Определяемые мгновенные мощности могут быть также выражены в виде сумм постоянных $p_{=}$, $q_{=}$ и переменных p_{\sim} , q_{\sim} составляющих:

$$P_{\alpha\beta} = p_{=} + p_{\sim}; \quad (4)$$

$$q_{\alpha\beta} = q_{=} + q_{\sim}. \quad (5)$$

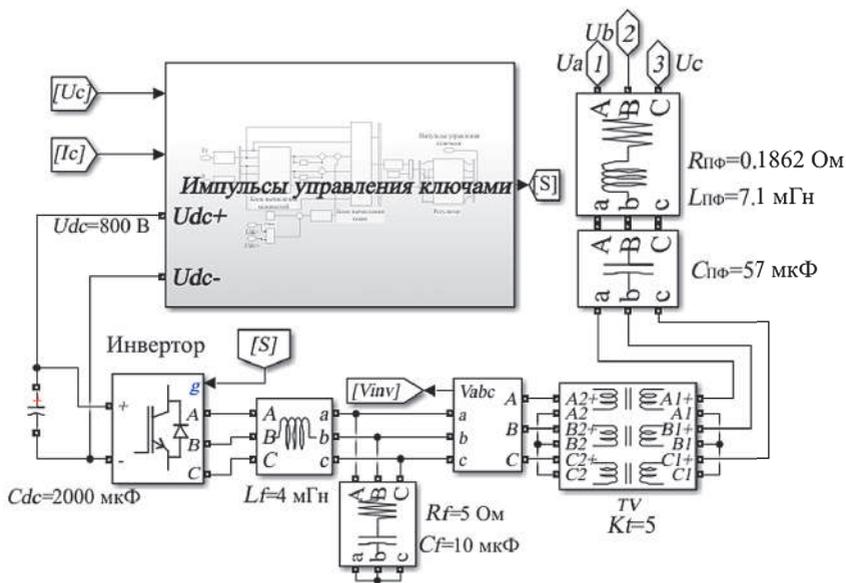


Рис. 4. Модель гибридного фильтра

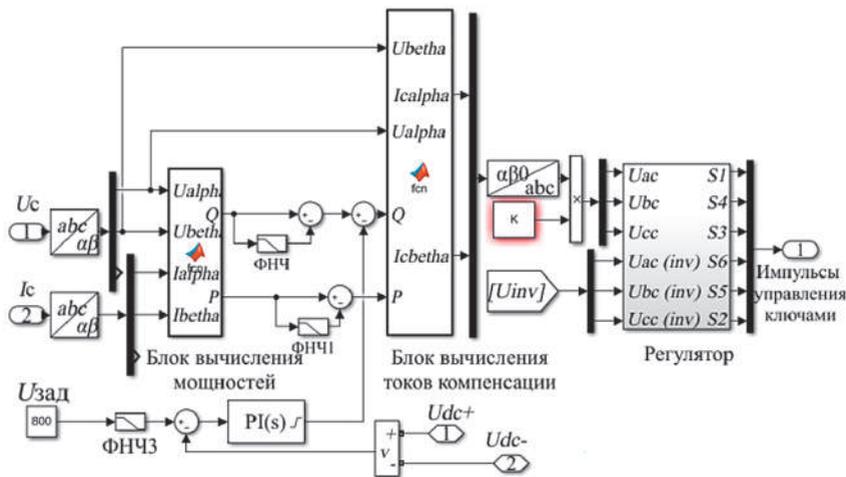


Рис. 5. Система управления ГФ на базе p - q регулирования

В данных выражениях постоянные составляющие активной и реактивной мощностей соответствуют мощности нелинейной нагрузки на основной частоте; а переменные составляющие — мощностьгармонических искажений нагрузки.

В результате выделение переменной составляющей мгновенных мощностей с помощью фильтра низких частот (см. рис. 5) позволяет определить гармонический состав тока нагрузки:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{(u_\alpha^2 + u_\beta^2)} \begin{bmatrix} u_\alpha & -u_\beta \\ u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_\sim \\ q_\sim \end{bmatrix}. \quad (6)$$

После токи (6) переводятся в трехфазную систему координат и усиливаются в K раз для использования в качестве опорного сигнала при формировании кривой напряжения компенсации на выходе ИН, обеспечивающую компенсацию ВГ напряжения и тока в соответствии с (1) и (2).

Влияние несимметрии и несинусоидальности напряжения на работу ГФ. Далее рассматривается эффективность ГФ при обеспечении синусоидальности тока питания сети при совместной работе с нелинейной нагрузкой в условиях ухудшенного качества электроэнергии сети.

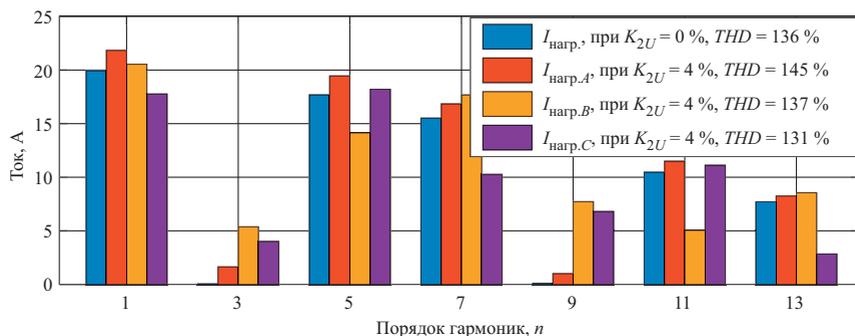
Ток сети при выполнении условия (2) определяется только постоянными составляющими мощностей в трехфазной системе координат [8]:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{1}{(u_\alpha^2 + u_\beta^2)} \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3} \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha & -u_\beta \\ u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_\sim \\ q_\sim \end{bmatrix}. \quad (7)$$

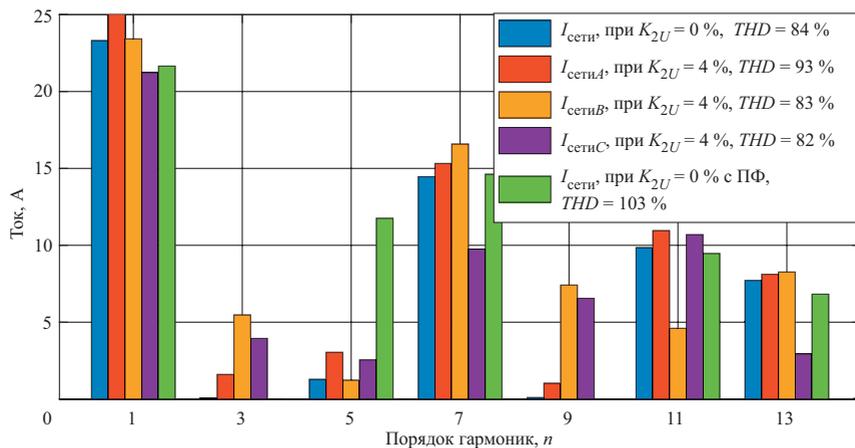
При этом синусоидальность сетевого тока при работающем ГФ обеспечивается при равенстве и ортогональности векторов u_α и u_β , что соответствует синусоидальному и симметричному напряжению сети в трехфазной системе координат. При наличии искажений напряжения сумма u_α^2 и u_β^2 в (7) становится переменной величиной [8], что приводит к появлению ВГ в спектре тока сети в трехфазной системе координат. Для демонстрации этого эффекта модель совместной работы нелинейной нагрузки и ГФ на рис. 2 питалась несимметричным и несинусоидальным напряжением и оценивалась эффективность подавления 5-й ВГ, на которую настроен ПФ в сетевом токе.

На рисунке 6 показаны спектры основных ВГ тока нагрузки (рис. 6, *a*) и сетевого тока (рис. 6, *б*) при питании несимметричным синусоидальным напряжением с коэффициентом несимметрии по обратной последовательности, равным 4 %.

Несимметрия напряжения существенно влияет на уровни ВГ фазных токов нагрузки и, в частности, на уровни тока фильтруемой 5-й гармоники (рис. 6, а). При работе гибридного фильтра сетевой ток 5-й гармоники существенно ослабляется во всех фазах (красные, желтые, фиолетовые столбцы, рис. 6, б) даже по отношению к току сети при работе с пассивным фильтром (зеленые столбцы, рис. 6, б), но тем не менее в фазах А и С его величина больше, чем при симметричном синусоидальном напряжении (синие столбцы, рис. 6, б), что свидетельствует о снижении эффективности ГФ при несимметричном напряжении сети.



а)



б)

Рис. 6. Спектры тока нагрузки (а) и тока сети (б) при симметричном синусоидальном напряжении и несимметричном синусоидальном напряжении

Аналогично на рис. 7 показаны спектры основных ВГ тока нагрузки (рис. 7, а) и сетевого тока (рис. 7, б) при питании симметричным несинусоидальным напряжением, представляющим собой синусоидальную кривую с добавленной одиночной ВГ низкого порядка (6-я, 7-я, 11-я).

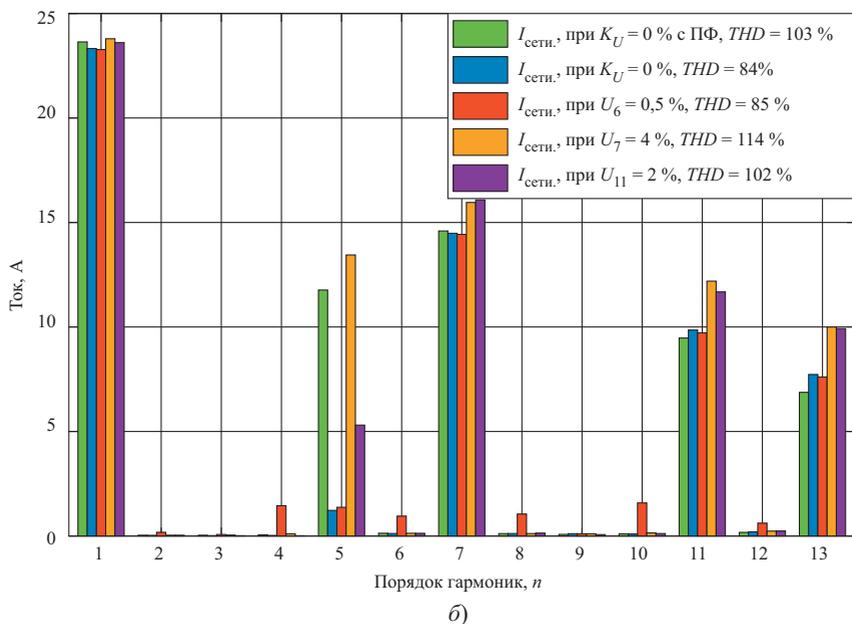
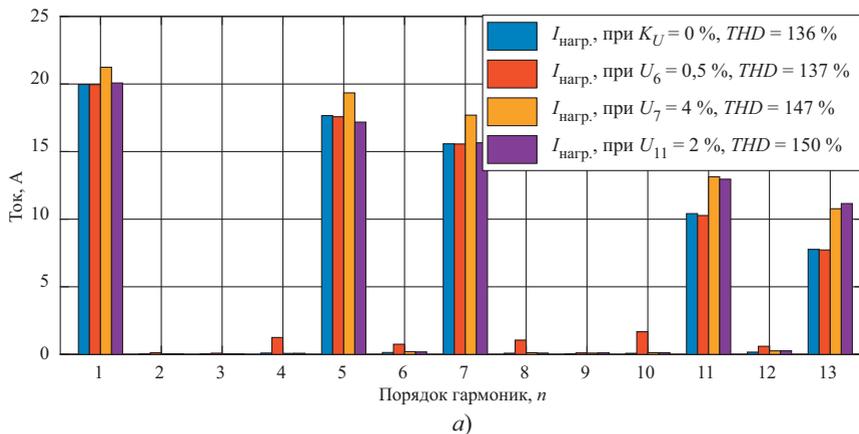


Рис. 7. Спектры тока нагрузки (а) и тока сети (б) при искажении кривой напряжения сети высшими гармониками

Введение 6-й гармоники в кривую напряжения приводит к появлению четных гармоник небольшой величины в токе нагрузки (красные столбцы, рис. 7, а) и, соответственно, в сетевом токе (красные столбцы, рис. 7, б), но не оказывает влияния на эффективность работы фильтра по снижению тока 5-й гармоники сети по сравнению со случаем питания симметричным и синусоидальным напряжением (синие столбцы, рис. 7, б), что может быть обусловлено сравнительно низким уровнем напряжения 6-й гармоники. В то же время наличие 7-й и 11-й гармоник в кривой напряжения сети значительно снижает эффективность ГФ (фиолетовые и зеленые столбцы, рис. 7, б) в сравнении с режимом работы при синусоидальном и симметричном напряжении сети.

Стоит отметить, что «чувствительность» ГФ к влиянию несинусоидальности и несимметрии кривой напряжения сети во многом определяется величиной коэффициента усиления K , уровень которого ограничивается потерей устойчивости системы управления при чрезмерном увеличении. В рамках данной работы принималось значение коэффициента усиления, при котором ГФ показывал наилучшие результаты, работая с симметричным и синусоидальным напряжением.

Вывод. Несинусоидальность и несимметрия кривой напряжения сети неизбежно оказывают влияние на эффективность работы ГФ с p - q регулированием. В рамках данной работы установлено, что ГФ с пассивной частью, настроенной на частоту 5-й гармоники, теряет эффективность при несимметричном напряжении и при искажении кривой напряжения сети 7 и 11-й гармониками, что следует принимать во внимание при использовании ГФ. Следовательно, необходима доработка метода регулирования для эффективной работы в условиях ухудшенного качества электроэнергии.

Литература

1. **Fujita H., Hirofumi A.** A practical approach to harmonic compensation in power systems-series connection of passive and active filters. Conference Record of the 1990 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (1990): 1107—1112, v. 2.
2. **Singh B., Chandra A., Al-Haddad K.** (2015). Power Quality Problems and Mitigation Techniques. 1-582. 10.1002/9781118922064.
3. **Improving** passive filter compensation performance with active techniques / D. Rivas, L. Moran, J. Dixon, J. Espinoza (2003). Industrial Electronics, IEEE Transactions on. 50. 161—170. 10.1109/TIE.2002.807658.
4. **Lam C., Wong M.** (2014). Design and Control of Hybrid Active Power Filters. Springer Briefs in Electrical and Computer Engineering.
5. **Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A.** Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase currents. International Conference on Power Electronics, 1983, pp. 1375—1386.

6. **Akagi H., Ogasawara S., Kim H.** The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems: a comprehensive approach. Conference of Record IEEE-34th IAS Annual Meeting, v. 1, 1999, pp. 431—439.
7. **Watanabe E., Aredes M., Akagi H.** (2004). The p - q theory for active filter control: some problems and solutions. Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica. 15. 10.1590/S0103-17592004000100010.
8. **Hang S.-J., Wu J.-C.** A control algorithm for three-phase three-wired active power filters under nonideal mains voltages. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 14, no. 4, pp. 753—760, July 1999, doi: 10.1109/63.774215.

*А.А. Иванов, kosorotov_a@tcn-nn.ru,
О.В. Крюков, o.v.kryukov@mail.ru,
Е.С. Подшивалов, info@tcn-nn.ru,
ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород*

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ

В настоящее время проблема обеспечения потребителей электрической энергией высокого качества значительно усложняется по мере расширения использования нелинейных систем с полупроводниковой преобразовательной техникой в промышленных системах электроснабжения (СЭС) [1—3]. Особенно острой данная проблема стала в последнее время в связи с массовым внедрением частотно-регулируемых электроприводов (ЧРП) переменного тока [4—7], генерирующих высшие гармоники, что характерно для предприятий топливно-энергетического комплекса (ТЭК). В результате в узлах электрической нагрузки и на трансформаторных подстанциях некоторых производств (рис. 1) суммарная доля мощности ЧРП достигает, а в некоторых режимах СЭС и превышает 50 % общей нагрузки.

Однако системы электроснабжения многих промышленных предприятий ТЭК оказались не готовы к модернизации технологических процессов средствами ЧРП, поскольку стало ухудшаться качество электроэнергии во внутризаводских распределительных сетях, что привело к увеличению количества отказов электрооборудования [8—11].

Вместе с тем часть потребителей электроэнергии предприятий ТЭК (вентиляторы приточно-вытяжных систем взрывоопасных технологических установок, системы управления и аварийного освещения, светограждение дымовых труб, питательные насосы котлов, противопожарные насосы и насосы системы водооборота и др.) относится к особой группе



Рис. 1. Общий вид модульного НКУ трансформаторной подстанции

I категории с жесткими требованиями по надежности, для которой необходим третий автономный источник питания.

Ситуация усугубляется тем, что внедрение ЧРП и другого полупроводникового оборудования осуществляется на действующих производствах при отсутствии системной методологической базы, позволяющей контролировать выполнение условий электромагнитной совместимости преобразовательной техники в многомашинных электротехнических системах [12—16]. Основным действующим отечественный государственный стандарт в области электромагнитной совместимости и норм качества электрической энергии ГОСТ 32144—2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [17] в первую очередь ориентирован на задачи, решаемые при взаимоотношениях поставщиков и потребителей электрической энергии. Ряд других отечественных стандартов (например, [18, 19]) регламентирует вопросы, в первую очередь относящиеся к производителям преобразовательной техники и ЧРП.

Технологические процессы предприятий ТЭК уязвимы к кратковременным нарушениям электроснабжения [20—23]. Они приводят к значительным убыткам как от недоотпуска продукции, так и от многократно увеличивающейся платы за сверхнормативные выбросы токсичных веществ и порчу оборудования. В связи с этим системы внутреннего электроснабжения предприятий должны быть хорошо развиты и обладать высокой степенью структурной избыточности электрических сетей, на которых применяют двухтрансформаторные подстанции 6/0,4 кВ (ТП). Их номинальный ряд мощностей располагается в диапазоне от 100 до 2500 кВА. Типовая схема низковольтной СЭС представлена на рис. 2.

Если резервированием электроснабжения нельзя обеспечить необходимую непрерывность технологического процесса или если резервирование электроснабжения экономически нецелесообразно, то осуществляется

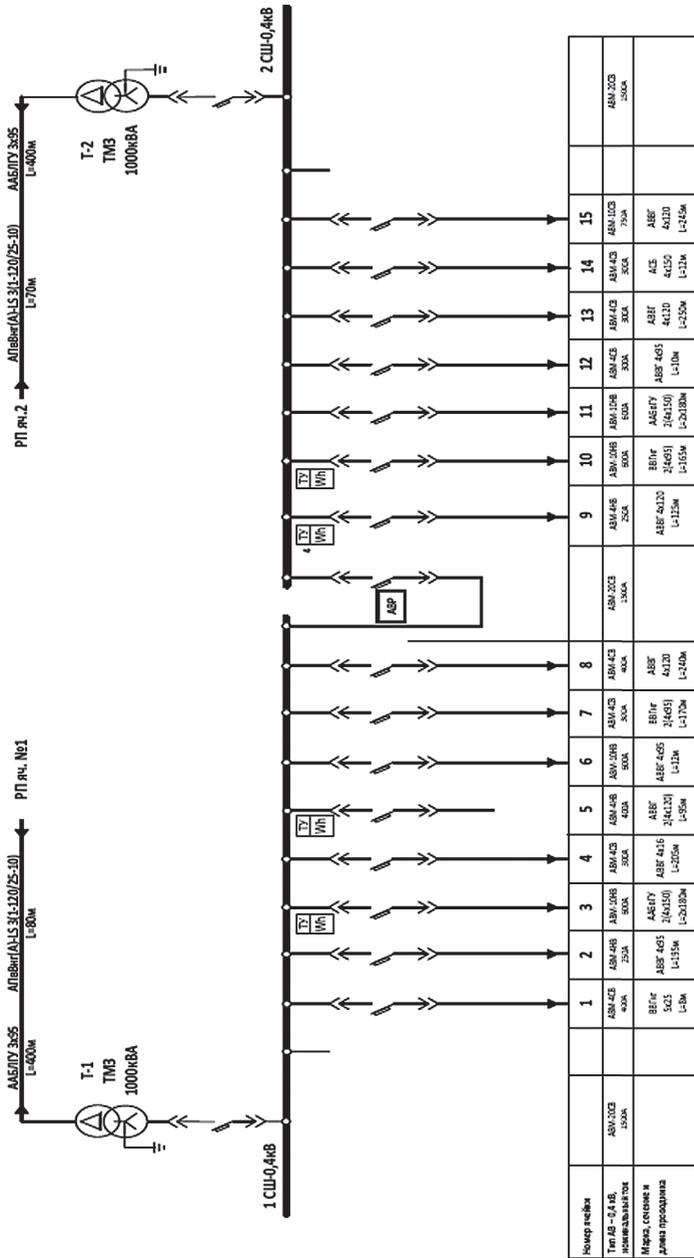


Рис. 2. Пример типовой схемы ТП 6,3/0,4 кВ для штатного режима работы

технологическое резервирование, например путем установки взаимно резервирующихся технологических агрегатов, специальных устройств безаварийного режима технологического процесса, действующего при нарушении электроснабжения [24, 25].

Анализ распределения установленной мощности СЭС. Внедрение ЧРП в технологические процессы, которые включают в себя операции по транспортировке жидкости, дозировке химических реагентов, вентиляции и поддержанию заданного температурного режима, позволяет обеспечить оптимальные режимы работы технологического оборудования. Кроме того, они имеют следующие положительные характеристики: отсутствие необходимости применения внешних датчиков тока, потока, напряжения, частоты вращения и положения ротора; простоту регулирования технологических параметров путем организации соответствующих обратных связей и использования вычислительных ресурсов преобразователей частоты; возможность организации взаимосвязи ЧРП с внешними компьютерными сетями (АСУ технологическим производством); повышение надежности и срока службы асинхронных двигателей, приводных механизмов и деталей трубопроводов за счет «мягкого» пуска; исключение провалов напряжения при пуске двигателей; реализацию режимов разгона и торможения с заданной скоростью; ЧРП позволяет максимально эффективно адаптировать работу электрооборудования и нагрузки к требованиям технологического процесса.

Типичный график внедрения ЧРП по годам в процессы технологических установок на одном из предприятий ТЭК показан на рис. 3, из которого видно, что в период с 2006 по 2017 гг. было внедрено более 25 000 кВт установленной мощности ЧРП мощностью от 0,37 до 1700 кВт, что составляет примерно 25 % потребляемой фактической мощности завода. При этом доля мощности высоковольтных ЧРП составляет всего 7 %, так как внедрение высоковольтной преобразовательной техники в СЭС происходит значительно медленнее, чем в низковольтных сетях, из-за высокой стоимо-

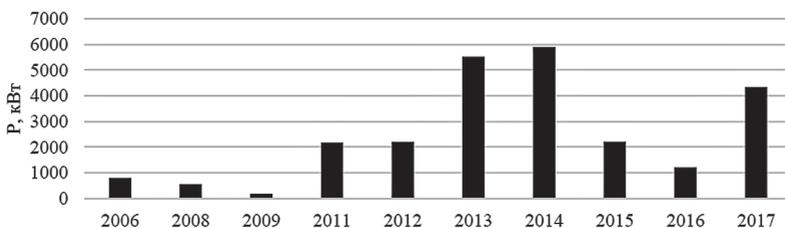


Рис. 3. Хронология внедрения ЧРП на одном из предприятий ТЭК

сти и сложности реализации технических решений для обеспечения гибкости ведения технологического процесса с приводимыми механизмами.

Анализ распределения установленной мощности $S_{\text{ЧРП}}$ по отношению к мощности трансформатора (S_T) подстанций предприятия на примере нормальной схемы (два силовых трансформатора в работе) и ремонтной схемы (в работе один силовой трансформатор) представлен на рис. 4.

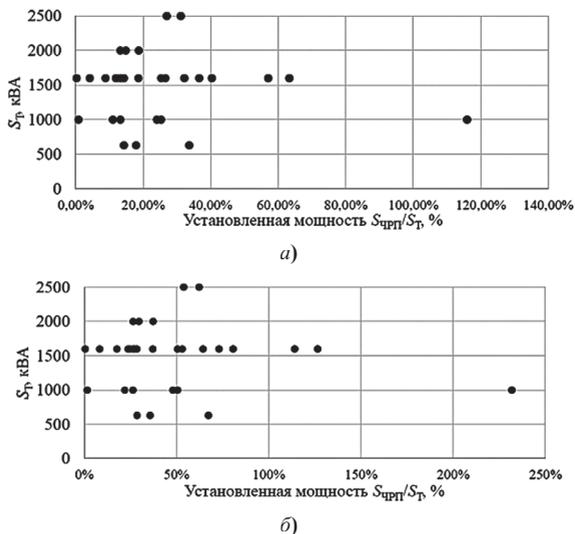


Рис. 4. Распределение установленной мощности ЧРП по отношению к мощности трансформаторов на примере нормального (а) и ремонтного (б) режимов ТП

Распределение доли установленной мощности $S_{\text{ЧРП}}$ зависит как от номинальной мощности S_T , которая варьируется в диапазоне $630 \div 2500$ кВА, так и от установленной мощности $S_{\text{ЧРП}}$. Наибольшее значение установленной мощности $S_{\text{ЧРП}}$ для нормальной (116 %) и ремонтной (232 %) схем по отношению к мощности S_T выявлено для трансформаторов 1000 кВА, а наименьшее (0,3 %) — для трансформаторов 1600 кВА. Наиболее широкий диапазон (0,8 ÷ 232 %) для обеих схем был выявлен для трансформаторов 1000 кВА.

Анализ гармонических составляющих напряжения. Распределение значений суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (СКГ) по отношению к мощности S_T для нормального режима работы схемы СЭС представлено на рис. 5. Наибольшее значение СКГ (4,7 %) выявлено для нормальной схемы при мощности трансформатора 1600 кВА. Наименьшее значение СКГ (0,59 и 0,78 %) получено для нор-

мальной схемы при мощности 1600 и 2500 кВА соответственно. Наиболее широкий диапазон значений СКГ (0,59 ÷ 4,7 %) для нормальной схемы был выявлен при мощности трансформаторов 1600 кВА.

Необходимо отметить, что значения СКГ для 1 и 2 СШ ТП, питающих одну и ту же технологическую установку, отличаются между собой, что свидетельствует о влиянии технологического режима на величину несинусоидальности, так как в большинстве случаев установленная мощность $S_{\text{ЧРП}}$, питающихся от 1 и 2 СШ ТП, идентична.

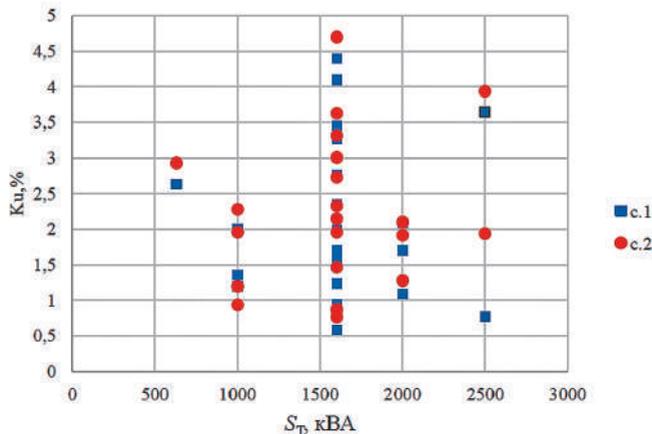


Рис. 5. Распределение величин СКГСН по отношению к S_T

Основными элементами преобразовательной техники на НПП являются ЧРП на основе асинхронных короткозамкнутых ЭД и полупроводниковых преобразователей частоты (ПЧ, нелинейная нагрузка), которые приводят к появлению в СЭС высших гармоник (ВГ), отличных по частоте от основной гармоники вследствие потребления ими гармонически насыщенного несинусоидального тока из питающей сети. Нелинейная нагрузка создает периодически искаженную форму волны тока, которая является несинусоидальной и непропорциональна приложенному напряжению. Эта переменная величина численно состоит из определенного количества синусоид разных частот, среди которых имеется синусоида 50 Гц.

Реальная сеть для любого электропотребителя представляет собой некое сопротивление, и несинусоидальные токи, протекая по этому сопротивлению, вызывают падение напряжения, что в результате приводит к появлению несинусоидального напряжения на шинах электроприемников.

Любой несинусоидальный периодически искаженный сигнал $x(t)$ можно представить в виде ряда Фурье. Искаженная форма волны обладает характеристиками симметрии. Индикатором полуволновой симметрии в искаженной форме волны является наличие только гармоник нечетного порядка. Если присутствуют гармоники четного порядка, форма сигнала не имеет полуволновой симметрии и может быть обусловлена наличием не только симметрией в СЭС предприятия, но и неисправностью электрооборудования. Нецелочисленные гармоники, характерные для такой нелинейной нагрузки, как дуговая печь или циклоконвертор, в СЭС предприятий ТЭК, как правило, отсутствуют.

Для исследования природы нелинейных искажений, оказываемых регулируемым электроприводом на питающую сеть, а также для определения мер по увеличению его электромагнитной совместимости (ЭМС) с питающей сетью и другим электрооборудованием необходим анализ процессов, происходящих во время работы преобразователя частоты (ПЧ).

ПЧ с общим звеном постоянного тока в составе ЧРП является источником широкого спектра высших гармонических, интергармонических, субгармонических составляющих и радиопомех, возникающих в результате дискретного управления потоками электроэнергии и оказывающих влияние как на ЭД, так и на сеть. При этом степень влияния ПЧ на питающую сеть зависит от мощности источника питания, режима работы распределительного устройства, топологии ЧРП и его фактической загрузки, выпрямителя, инвертора, фильтров и способа управления ими.

Основные отрицательные эффекты от высших гармоник тока и напряжения в СЭС предприятия связаны с ухудшением изоляции силового электрооборудования (трансформаторов, кабелей, ЭД) и ростом активных потерь внутри него, что ведет к повышению температуры и сокращению ресурса, а в некоторых случаях, если гармоники выходят за допустимые пределы, и к выходу из строя.

Наиболее распространенной и очевидной проблемой, вызванной наличием высших гармоник, в СЭС является возникновение резонансных явлений. Одновременное использование LC -устройств в СЭС приводит к возникновению параллельного резонанса. При несинусоидальных токах батареи конденсаторов одновременно являются элементами, поглощающими гармоники, генерируемые нелинейной нагрузкой, в связи с чем в них создаются дополнительные потери, сокращающие срок их службы.

Выводы

1. За последнее время произошел резкий рост состава нелинейной нагрузки из-за широкого внедрения ЧРП на предприятиях ТЭК. Применение ЧРП дает преимущества для автоматизированного управления технологи-

ческим процессом. Однако появляется необходимость исследования загрузки трансформаторов нелинейной нагрузкой в различных режимах.

2. Требования безопасной и энергоэффективной работы технологических процессов обусловили необходимость проведения анализа ЭМС. Основным источником высших гармоник тока в СЭС являются низковольтные ЧРП. Высокая доля ЧРП, отсутствие методик и алгоритмов проверки электромагнитной совместимости при их внедрении могут привести к ухудшению качества электроэнергии и повреждениям электрооборудования.

Литература

1. **Диагностика** и прогнозирование технического состояния электротехнических систем энергетики: монография / Крюков О.В., Сычев Н.И., Сычев М.Н. и др. Вологда, Инфра-Инженерия. 2021. 184 с.
2. **Воробьев С.В., Крюков О.В., Гуляев И.В.** Средства и методы релейной защиты и автоматики для вдольтрассовых ЛЭП // Фёдоровские чтения — 2021: LI международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2021. С. 151—159.
3. **Крюков О.В.** Особенности энергоснабжения подводных добычных комплексов морских месторождений углеводородов // Фёдоровские чтения — 2019: XLIX международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 357—359.
4. **Воеков В.Н., Мещеряков В.Н., Крюков О.В.** Вентильный электропривод для погружных нефтяных насосов с импульсным повышающим преобразователем напряжения в звене постоянного тока ПЧ и релейным управлением инвертора. Серия: Энергетика. 2020. Т. 20. № 2. С. 110—119.
5. **Belousov A.S., Meshcheryakov V.N., Valtchev S.** Development of a control algorithm for three-phase inverter in two-phase electric drives reducing the number of commutations // Proceedings — 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. 2019. С. 444—449.
6. **Васенин А.Б., Степанов С.Е., Титов В.Г.** Реализация капсулированных электроприводных ГПА на объектах ПАО «Газпром» // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2020. Т. 63. № 1. С. 31—37.
7. **Крюков О.В., Саушев А.В.** Методология вейвлет-преобразования при анализе автоматизированных электроприводов // Фёдоровские чтения — 2020: L международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2020. С. 174—178.
8. **Мониторинг** и прогнозирование технического состояния электромеханических систем энергетики // О.В. Крюков, А.В. Серебряков, Л.А. Макриденко и др. М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2017.

9. **Крюков О.В., Степанов С.Е.** Организация диспетчерского управления подстанциями компрессорных цехов с экспертной оценкой проектных решений // Промышленная энергетика. 2021. № 1. С. 27—34.
10. **Крюков О.В., Титов В.Г.** Эффективность комплексных испытаний нового энергетического оборудования // Промышленная энергетика. 2021. № 2. С. 17—26.
11. **Ипполитов В.А., Кононенко А.Б., Косоротов А.А.** Мониторинг и новые функциональные возможности распределительных устройств трансформаторных подстанций с НКУ «Каскад» // Контроль. Диагностика. 2021. № 5. С. 32—39.
12. **Косоротов А.А., Крюков О.В., Саушев А.В.** Функциональные возможности мониторинга распределительных устройств цифровых подстанций // Фёдоровские чтения — 2021: LI международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2021. С. 143—151.
13. **Кононенко А.Б., Косоротов А.А., Крюков О.В.** Расширение функциональных возможностей автоматизации и мониторинга распределительных устройств КТП «Каскад» // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2020. № 12. С. 26—31.
14. **Крюков О.В., Серебряков А.В.** Экспериментальные исследования безопасности электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Промышленная энергетика. 2016. № 2. С. 24—32.
15. **Крюков О.В., Серебряков А.В.** Экологические направления электроснабжения и задачи энергосбережения при реконструкции объектов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2015. № 8. С. 23—33.
16. **Крюков О.В.** Коммуникационная среда передачи данных сети ETHERNET на полевом уровне различных объектов // Автоматизация в промышленности. 2012. № 12. С. 26—30.
17. **ГОСТ 32144—2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». М.: Стандартиформ, 2014. 39 с.
18. **ГОСТ Р 51317.3.4—2006.** (МЭК 61000-3-4-1998) Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение эмиссии гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током более 16 А, подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения. Нормы и методы испытаний. М.: Стандартиформ, 2007. 26 с.
19. **Ершов М.С., Чернев М.Ю.** Определение и оценка показателей эмиссии гармонических составляющих токов от низковольтных асинхронных частотно-регулируемых приводов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2019. Т. 62. № 1. С. 59—64.
20. **Васенин А.Б., Степанов С.Е., Крюков О.В.** Методология и средства оперативного мониторинга электродвигателей на КС // Контроль. Диагностика. 2019. № 11. С. 52—58.
21. **Крюков О.В., Степанов С.Е., Васенин А.Б.** Поддержка диспетчерских решений ГТС на базе оценки их энергоэффективности // Наука и техника в газовой промышленности. 2019. № 4 (80). С. 71—81.

22. **Степанов С.Е., Крюков О.В.** Выбор методов мониторинга и прогнозирования технического состояния автоматизированных электроприводов энергетических объектов // Контроль. Диагностика. 2018. № 11. С. 32—39.
23. **Груздев В.В., Волков А.С., Крюков О.В.** Методологический подход к прогнозированию технического состояния трансформаторов распределительных устройств // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2021. № 1 (138). С. 14—19.
24. **Крюков О.В., Степанов С.Е., Васенин А.Б.** Поддержка диспетчерских решений ГТС на базе оценки их энергоэффективности // Наука и техника в газовой промышленности. 2019. № 4. С. 71—81.
25. **Kryukov O.V., Serebryakov A.V.** Energy efficient power supply systems of oil and gas pipelines electric drives // Bulletin of South Ural State University. Series: Power-Engineering. 2017. V. 17. No 3. P. 102—110.

*М.А. Назаров, maximnazarov27@gmail.com,
ТГУ, г. Тольятти
А.Ю. Хренников, ak2390@inbox.ru,
НТЦ Россети ФСК ЕЭС, Москва*

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ РАСХОДА ЭНЕРГИИ НА СОБСТВЕННЫЕ НУЖДЫ ПОДСТАНЦИЙ

Объекты собственных нужд подстанций (СН ПС), такие как тепловые и циркуляционные насосы, вентиляторы охладителей трансформаторов и др., потребляют ощутимую часть электроэнергии — в определенных случаях до 7 % всей передаваемой энергии. Получается, что сама энергетика также является одним из крупных потребителей электроэнергии. Заметим, что большая часть данных механизмов управляется неэффективно и имеет обычно избыточное энергопотребление [1, 2].

Чтобы определить возможности сокращения расхода на СН ПС, была проведена оценка потенциала и показателей эффективности различных мероприятий по сокращению расхода: по существующим ПС на 15—30 %, по новым и проектируемым ПС на 40—50 % удельного потребления электроэнергии [3].

При планировании мероприятий и анализе эффективности работы оборудования СН ПС приходится ориентироваться на структуру нормативного расхода, корректируя ее в соответствии с величиной фактического расхода по каждой ПС. Такой подход вносит определенную погрешность, но в целом позволяет оценить структуру расхода электроэнергии на собствен-



Рис. 1. Структура расхода электроэнергии на СН ПС

ные нужды по каждой подстанции. Результаты оценки структуры расхода для всех ПСПАО «ФСК ЕЭС» приведены на рис. 1.

Преобразователи частоты на сегодня являются наиболее распространенным способом управления производительностью электроприводов компрессоров тепловых насосов (рис. 2) на ПС, дутьевых вентиляторов охлаждения трансформаторов, циркуляционных насосов (масляного контура и отопительного контура) и позволяют регулировать скорость вращения электродвигателя за счет изменения входной частоты питающего напряжения.

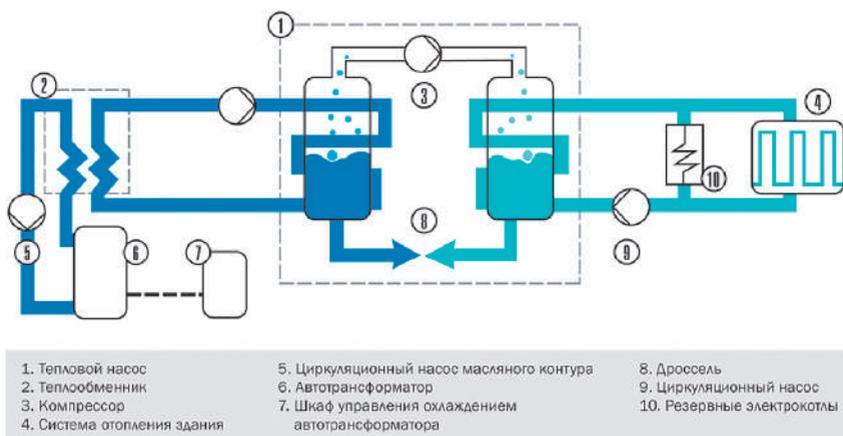


Рис. 2. Принципиальная схема установки утилизации тепла трансформатора

Рассмотрим еще одно направление повышения энергетической эффективности. На подстанции ПАО «ФСК ЕЭС» для снижения расхода электроэнергии на отопление здания общеподстанционного пункта управления (ОПУ) внедрена система утилизации тепла масла автотрансформатора (рис. 2). Преобразователи частоты позволяют изменять производительность дутьевых вентиляторов охлаждения трансформаторов в зависимости от условий работы [4, 5].

Применение частотно-регулируемых приводов позволяет получить значительную экономию электроэнергии за счет регулирования расхода (до 60 %). С помощью преобразователей частоты можно регулировать производительность системы охлаждения трансформатора путем изменения уровня частоты вращения, поддерживая при этом заданный уровень технологического параметра.

Использование частотного привода позволяет также экономить значительные объемы (более 30 %) электроэнергии за счет регулирования скорости электроприводов насосов отопительного контура ОПУ. Помимо экономии электроэнергии за счет снижения давления в системе уменьшаются утечки воды в контуре ОПУ, следовательно, экономится и перекачиваемая жидкость до 10 %.

Преобразователи частоты позволяют избежать и повреждения двигателей, так как за их счет осуществляется плавный пуск и отсутствуют прямые пуски с 6—7-кратными пусковыми токами. Гибкое управление осуществляется за счет простоты перенастройки параметров технологического цикла (изменение скорости). Встроенные в преобразователи частоты функции позволяют реализовать сложные задачи автоматического управления без дополнительных внешних устройств.

Преобразователь частоты имеет ряд встроенных защитных функций для работы с насосами: обнаружение утечек, защита от сухого хода и др. Данные защитные функции увеличивают срок службы насосов и повышают надежность их работы, исключая возможные аварийные остановки.

Таким образом, преобразователи частоты позволяют значительно повысить эффективность использования энергоресурсов, а также являются подходящим решением для оптимизации работы потребителей ПС.

Литература

1. **Особенности** применения частотных преобразователей на насосных агрегатах в системах теплоснабжения / Н.И. Баранчикова, С.П. Епифанов, И.М. Исаков, С.Т. Цуканов // Промышленная энергетика. 2022. № 5. С. 22—29.

2. **Использование** преобразовательной частоты в энергетике [Электронный ресурс]: Официальный сайт продукции DanfossDrives. URL: <https://drives.ru/po-otraslyam/energetika/#> (дата обращения: 09.09.2022).
3. **Рябин Т.В., Давыдов Е.Ю., Паринов И.А.** Возможности снижения расхода энергии на собственные нужды подстанций // Энергосбережение. 2016. № 6. С. 36—45.
4. **Хренников А.Ю.** Техническая диагностика и аварийность электрооборудования: учебно-методическое пособие. М.: Литрес, 2021. 230 с.
5. **Хренников А.Ю., Точилкин В.Г.** Наладка и эксплуатация релейной защиты и автоматики: учебно-методическое пособие. Москва, Берлин: Директ-Медиа, 2021. 212 с.

*А.В. Виноградов, winaleksandr@gmail.com,
А.А. Лансберг, lansberga@vk.com,
ФГБНУ «ФНАЦ ВИМ», Москва*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ РЕКЛОУЗЕРОВ И УПРАВЛЯЕМЫХ РАЗЪЕДИНИТЕЛЕЙ

В последнее время исследованиям, связанным с повышением эффективности эксплуатации воздушных линий (ВЛ) электропередачи 6—10 кВ, посвящено множество работ [1—4]. Это объясняется тем, что аварийность сетей данного класса напряжения остается высокой и они характеризуются низкой надежностью электроснабжения. В свою очередь обеспечить повышение его надежности возможно следующими способами:

1) внедрением средств сетевого секционирования в электрические сети, позволяющих производить отключение поврежденных участков при возникновении аварийных режимов работы сети;

2) реконструкцией электрических сетей и заменой голых проводов на самонесущие изолированные провода СИП, заменой опор, арматуры. Данный вариант с точки зрения обеспечения надежности электроснабжения является наиболее целесообразным, но значительно дороже, чем секционирование линии.

Первый способ повышения надежности электроснабжения потребителей, заключающийся в секционировании линии защитными коммутационными аппаратами, не является инновационным. Идеи секционирования сетей появились более 80 лет назад, что было обусловлено необходимостью повышения электробезопасности эксплуатации ВЛ 0,4 кВ. Например, в работе Спешакова П.И. в журнале «Электричество» в 1939 г. [5] предложено

устанавливать защитные коммутационные аппараты — плавкие предохранители (ПП 0,4 кВ) и автоматические выключатели (АВ 0,4 кВ) в расщелку проводов электрической сети 0,4 кВ на таком расстоянии, чтобы выполнялись требования по обеспечению чувствительности к токам однофазного короткого замыкания. Недостаток предложенного решения заключается в невозможности автоматизации устанавливаемого в линию АВ, что ограничивает его применение и не позволяет осуществлять дистанционное управление, а также реализовывать автоматическое повторное включение.

В рамках реализуемой в последние годы в электросетевом комплексе концепции распределенной автоматизации повышение надежности сельских электрических сетей обеспечивается за счет внедрения средств секционирования линий электропередачи, позволяющих изменять конфигурацию сети при возникновении в ней повреждений, отключать поврежденные участки сети и подавать питание на неповрежденные, в том числе за счет реализации автоматического повторного включения (АПВ) и автоматического ввода резерва (АВР) при наличии резервного источника. Широкое распространение в реализации данной концепции в распределительных сетях всего мира напряжением 2,4—38 кВ получили реклоузеры [6].

Так, на примере одной из линий 10 кВ «Смоленскэнерго» протяженностью 31,64 км с нагрузкой 2276 кВА, представленной двадцатью ТП 10/0,4 кВ, была произведена оценка эффективности секционирования линии с установкой реклоузера и двух управляемых выключателей нагрузки. На основании расчетов показателей надежности было выявлено снижение недоотпуска электроэнергии с 8,4 до 0,38 тыс. кВт·ч и суммарного годового времени отключения потребителей с 73,5 до 11,68 ч [7].

Следует отметить, что в кольцевых ВЛ 6—10 кВ с несколькими реклоузерами знание величин токов короткого замыкания в разных участках электрической сети позволит осуществлять дистанционный контроль работы реклоузеров и оперативно реагировать на возникновение различных ситуаций, за счет чего сокращается время перерывов в электроснабжении потребителей, подключенных к поврежденным участкам [8].

В последние годы также появилось новое решение секционирования электрических сетей с использованием управляемых выключателей нагрузки и разъединителей с моторным приводом, заключающееся в отключении поврежденных участков с устойчивыми замыканиями в бестоковую паузу. Данные коммутационные аппараты связаны с реклоузерами и высоковольтными выключателями в единую SCADA-систему [9].

Однако остается нерешенным вопрос расчетов надежности электропитания потребителей в электрических сетях 6—10 кВ с реклоузерами и

управляемыми выключателями нагрузки, которые непосредственно устанавливают в расщелку линии. Это проявляется в отсутствии показателей надежности реклоузеров и управляемых выключателей нагрузки в нормативных документах и научных публикациях, в связи с чем их определение является актуальной задачей.

Материалы и методы исследования. Цель нашего исследования заключается в определении показателей надежности реклоузеров. Были использованы данные о количестве реклоузеров и управляемых выключателей нагрузки и их отказах за 2021 г., представленные на открытом заседании Годовой коллегии — стратегической сессии электросетевой организации ПАО «Россети Центр и Приволжье», состоявшейся в марте 2022 г. в городе Орле. Сведения о количестве и аварийных отказах реклоузеров и управляемых выключателей нагрузки за 2021 г. представлены в табл. 1 и 2.

В настоящее время в филиале ПАО «Россети Центр»—«Орелэнерго» установлен 141 реклоузер. Из них 32 коммутационных аппарата являются кольцевыми и используются для резервирования линии электропередачи 6—10 кВ, подключенной к секции шин подстанции, от другой секции шин этой же подстанции или секции шин 6—10 кВ другой подстанции. Используются реклоузеры двух типов: 14 коммутационных аппаратов OSM15-16-800-310 с номинальным током 800 А и отключающей способностью 16 кА (производства австралийской компании NOJA Power) и 127 коммутационных аппаратов типа PBA/TEL-10-12.5/630 с номинальным током 630 А и отключающей способностью 12,5 кА (производства российской компании ЗАО «ГК «Таврида Электрик»).

Ни один из коммутационных аппаратов не превысил заявленный срок службы в 25 лет [6]. При этом наибольшим сроком эксплуатации характеризуются три реклоузера типа PBA/TEL-10-12.5/630, установленные в августе 2008 г. в Болховском РЭС филиала ПАО «Россети Центр»—«Орелэнерго» на ВЛ 10 кВ № 2 ПС 35 кВ «Краснознаменка».

Таблица 1

Сведения об аварийных отказах реклоузеров в филиалах электросетевой организации ПАО «Россети Центр и Приволжье» за 2021 год

№ п/п	Филиал	Количество общее, шт.	Количество отказавших, шт.
1	Калугаэнерго	226	3
2	Владимирэнерго	254	14
3	Воронежэнерго	155	6
4	Гулэнерго	190	8
5	Липецкэнерго	85	7

Окончание табл. 1

№ п/п	Филиал	Количество общее, шт.	Количество отказавших, шт.
6	Рязаньэнерго	124	2
7	Курскэнерго	71	6
8	Белгородэнерго	181	4
9	Орелэнерго	141	1
10	Ярэнерго	171	3
11	Удмуртэнерго	73	0
12	Костромаэнерго	49	1
13	Нижегородэнерго	244	1
14	Тамбовэнерго	78	0
15	Тверьэнерго	107	1
16	Брянскэнерго	112	0
17	Ивэнерго	129	0
18	Кировэнерго	85	0
19	Мариэнерго	16	0
20	Смоленскэнерго	110	0
	Всего	2601	57

Таблица 2

Сведения об аварийных отказах управляемых разъединителей в филиалах электросетевой организации ПАО «Россети Центр и Приволжье» за 2021 год

№ п/п	Филиал	Количество общее, шт.	Количество отказавших, шт.
1	Калугаэнерго	104	16
2	Владимирэнерго	110	0
3	Воронежэнерго	64	4
4	Тулэнерго	82	2
5	Липецкэнерго	46	1
6	Рязаньэнерго	71	6
7	Курскэнерго	38	0
8	Белгородэнерго	104	0
9	Орелэнерго	45	3
10	Ярэнерго	17	1
11	Удмуртэнерго	41	2

№ п/п	Филиал	Количество общее, шт.	Количество отказавших, шт.
12	Костромаэнерго	19	0
13	Нижновэнерго	47	0
14	Тамбовэнерго	50	1
15	Тверьэнерго	8	0
16	Брянскэнерго	6	0
17	Ивэнерго	37	0
18	Кировэнерго	47	0
19	Мариэнерго	19	0
20	Смоленскэнерго	45	0
Всего		1000	36

Из таблицы 1 следует, что среди 2601 реклоузера в 20 филиалах за 2021 г. отказали 57, из них наибольшее число (254) — в филиале «Владимирэнерго», а наименьшее (16) — в филиале «Мариэнерго»; при этом в 7 филиалах за год не наблюдалось ни одного отказа.

В настоящее время в филиале ПАО «Россети Центр»—«Орелэнерго» эксплуатируется 45 управляемых разъединителей типа РЛКв-24/400 на номинальное напряжение до 24 кВ и номинальный ток 400 А производства компании ООО «ЭНКОР» с заявленным механическим ресурсом в 10 000 коммутаций [10]. Разъединители были установлены в электрические сети 6—10 кВ в 2019—2020 гг. т.е. находятся в эксплуатации 2—3 года.

Согласно данным, представленным в табл. 2, в настоящее время в 20 филиалах электросетевой организации ПАО «Россети Центр и Приволжье» эксплуатируется 1000 управляемых разъединителей. За 2021 г. по всем филиалам был зафиксирован отказ 36 данных коммутационных аппаратов. Так, наибольшее количество управляемых разъединителей со значением 110 единиц эксплуатируется в филиале «Владимирэнерго»; наименьшее количество управляемых разъединителей с моторным приводом установлено в филиале «Брянскэнерго» (6 коммутационных аппаратов); наибольшее число отказов управляемых разъединителей за 2021 г. было зафиксировано в филиале «Калугаэнерго» — 16 единиц. В свою очередь отказов управляемых разъединителей нагрузки не было зафиксировано в 11 филиалах ПАО «Россети Центр и Приволжье» (см. табл. 2).

Исходя из данных по количеству реклоузеров и управляемых разъединителей, а также их отказов за 2021 г., представленных в табл. 1, 2, поток

отказов, ω_0 , год⁻¹/100 шт., как отдельно по филиалам, так и в целом по 20 регионам, определяют по формуле [11]:

$$\omega_0 = \frac{n_{\text{отк}} 100}{N}, \quad (1)$$

где $n_{\text{отк}}$ — значение количества отказов коммутационных аппаратов (реклоузеров или управляемых разъединителей) за 2021 г. в рассматриваемой электросетевой организации, ед.; N — общее количество соответствующих аппаратов в этой организации, ед.

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты расчетов значений потока отказов реклоузеров в филиалах ПАО «Россети Центр и Приволжье», полученные по данным табл. 1, представлены на рис. 1.

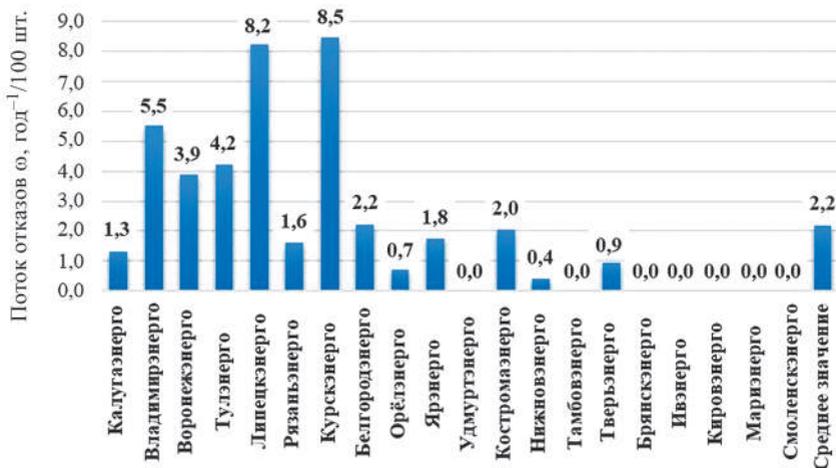


Рис. 1. Расчетные значения потока отказов реклоузеров в филиалах ПАО «Россети Центр и Приволжье»

Так, наибольшие значения потока отказов 8,2 и 8,5 год⁻¹/100 шт. характерны для филиалов «Липецкэнерго» и «Курскэнерго», несмотря на то, что наибольшее количество отказавших реклоузеров было в филиале «Владимирэнерго», для которого значение составило 5,5 год⁻¹/100 шт. Соответственно среднее значение потока отказов реклоузеров исходя из статистики аварийных отказов в 20 регионах составляет 2,2 год⁻¹/100 шт.

Значения потока отказов управляемых разъединителей с моторным приводом в филиалах ПАО «Россети Центр и Приволжье» по данным табл. 2 представлены на рис. 2.

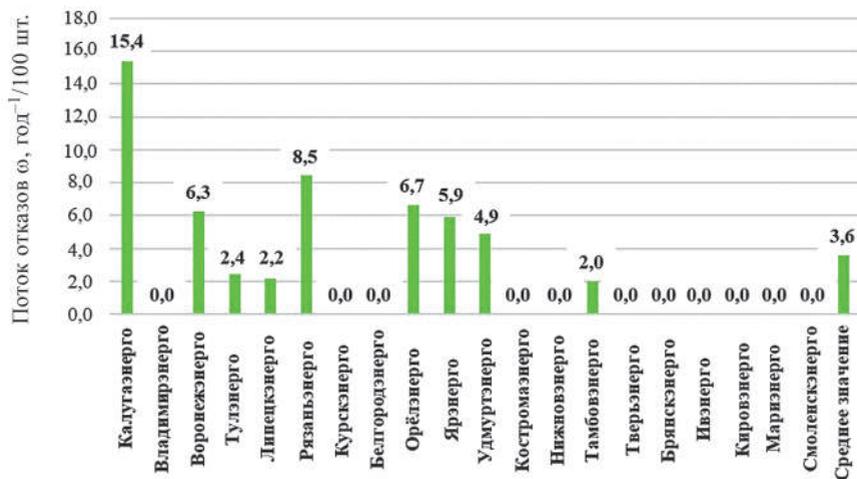


Рис. 2. Расчетные значения потока отказов управляемых выключателей нагрузки в филиалах ПАО «Россети Центр и Приволжье»

Наибольшее значение потока отказов управляемых разъединителей, как и наибольшее количество отказавших коммутационных аппаратов, характерно для филиала «Калугазэнерго» и составляет $15,4 \text{ год}^{-1}/100 \text{ шт.}$. С учетом того, что в 11 филиалах отказов управляемых разъединителей за 2021 г. не наблюдалось, а для 5 филиалов значение составило менее $5 \text{ год}^{-1}/100 \text{ шт.}$, то среднее значение потока отказов в 20 регионах составляет $3,6 \text{ год}^{-1}/100 \text{ шт.}$. Полученное значение превышает поток отказов для реклоузеров в 1,6 раза.

Закключение. В ходе исследования было выявлено, что расчетное значение потока отказов реклоузеров составляет $2,2 \text{ год}^{-1}/100 \text{ шт.}$, а управляемых разъединителей нагрузки — $3,6 \text{ год}^{-1}/100 \text{ шт.}$. Данные значения можно использовать в расчетах надежности как при проектировании, так и при автоматизации действующих электрических сетей 6—10 кВ.

Полученные расчетные значения можно учитывать при оценке эффекта от повышения надежности электроснабжения, если при аварии на определенном участке можно будет его локализовать путем отключения сетевых коммутационных аппаратов, а также для оценки возможных последствий отказа коммутационных аппаратов, так как рассмотренные средства распределенной автоматизации характеризуются продольным (последовательным) включением в сеть, что, в случае их отказа или ложного срабатывания, приведет к перерыву в электроснабжении потребителей.

Литература

1. **Качанов А.Н., Чернышов В.А.** Прогнозирование вероятности возникновения однофазных замыканий на землю в распределительных сетях 10 кВ с учетом влияния погодных-климатических факторов // Промышленная энергетика. 2020. № 10. С. 10—17.
2. **Рыжкова Е.Н., Младзиевский Е.П., Цырук С.А.** Методика определения показателей эффективности сетей 6—35 кВ в зависимости от состояния нейтрали // Промышленная энергетика. 2021. № 1. С. 2—12.
3. **Сидоров С.В., Сушков В.В., Сухачев И.С.** Особенности моделирования определения мест повреждения воздушных линий электропередачи напряжением 6(10) кВ // Промышленная энергетика. 2020. № 3. С. 33—40.
4. **Латыпов И.С., Сушков В.В., Хмара Г.А.** Разработка обобщенного подхода к выбору энергоэффективной формы витого неизолированного провода воздушной линии электропередачи класса напряжения 6—35 кВ // Промышленная энергетика. 2020. № 1. С. 2—11.
5. **Спеваков П.И.** К проектированию сетей зануления в силовых установках // Электричество. 1939. № 8. С. 69.
6. **Лансберг А.А.** Обзор технических характеристик устройств, предназначенных для секционирования и резервирования линий электропередачи 10 кВ / В сб.: Ресурсосберегающие технологии в агропромышленном комплексе России: Материалы Междунар. науч. конфер. Красноярск, 2020. С. 316—320.
7. **Долецкая Л.И., Кавченков В.П., Солопов Р.В.** Оценка эффективности методов повышения надежности распределительных электрических сетей // Интернет-журнал «Науковедение». Т. 7. № 6. Ноябрь—декабрь, 2015. DOI: 10.15862/98TVN615.
8. **Определение** токов коротких замыканий в сельской электрической сети 10 кВ, секционируемой реклоузерами для осуществления дистанционного контроля их срабатывания / А.В. Виноградов, А.И. Капитонов, А.А. Лансберг и др. // Вестник аграрной науки Дона. 2021. № 1(53). С. 34—43.
9. **Гафарова А.А.** Анализ применения реклоузера Таврида и выключателя нагрузки AUGUSTE в распределительных сетях // Вестник наук. 2020. № 4 (25). Т. 3. С. 88—91.
10. **Encoreengineering.** ТрансЭнергоСнаб. Разъединитель с моторным приводом и индикаторами короткого замыкания 6—24 кВ (РМИК). [Электронный ресурс]. URL: <https://transenergосnab.ru/oborudovanie/rmik.htm> (дата обращения: 19.08.2022 г.).
11. **Папков Б.В., Осокин В.Л.** Вероятностные и статистические методы оценки надежности элементов и систем электроэнергетики: теория, примеры, задачи: учеб. пособие. Старый Оскол: ТНТ, 2017. 424 с.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДЛЯ ВЫБОРА РЕЖИМА НЕЙТРАЛИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА

Однофазные замыкания на землю являются наиболее частым видом аварий на предприятиях. Емкостные токи замыкания на землю и сопутствующие им неблагоприятные явления могут нанести значительный ущерб оборудованию завода, нарушить технологический процесс производства. В связи с этим возникает потребность защиты от однофазных замыканий, которая обеспечивается за счет корректного выбора режима нейтрали.

Несмотря на относительную простоту расчетов, необходимых для выбора режима нейтрали, проведение их вручную может вызывать трудности и ошибки, связанные с человеческим фактором, что может повлечь неверный выбор оборудования. В данной статье предложен алгоритм, который в дальнейшем может быть использован для разработки компьютерной программы, способной автоматизировать выбор режима нейтрали.

Пример условной электрической сети, состоящей из источника, выключателей, отходящих линий электропередачи и двигателей представлен на рис. 1. Алгоритм выбора режима нейтрали представленной сети изображен на рис. 2.

Пользователю нужно ввести в программу данные по электрической сети: номинальное напряжение, марки и длины кабелей. Для заданных пользователем марок кабелей программа по базе данных подбирает им соответствующие емкости нулевой последовательности, которые используются в расчете емкостного тока. Программа также позволяет учесть имеющиеся в сети мощные электродвигатели как дополнительные емкости по приведенным ниже формулам: (1) для неявнополюсных СД и АД с короткозамкнутым ротором и (2) — для

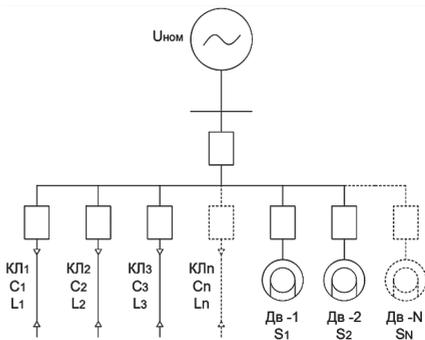


Рис. 1. Пример электрической сети

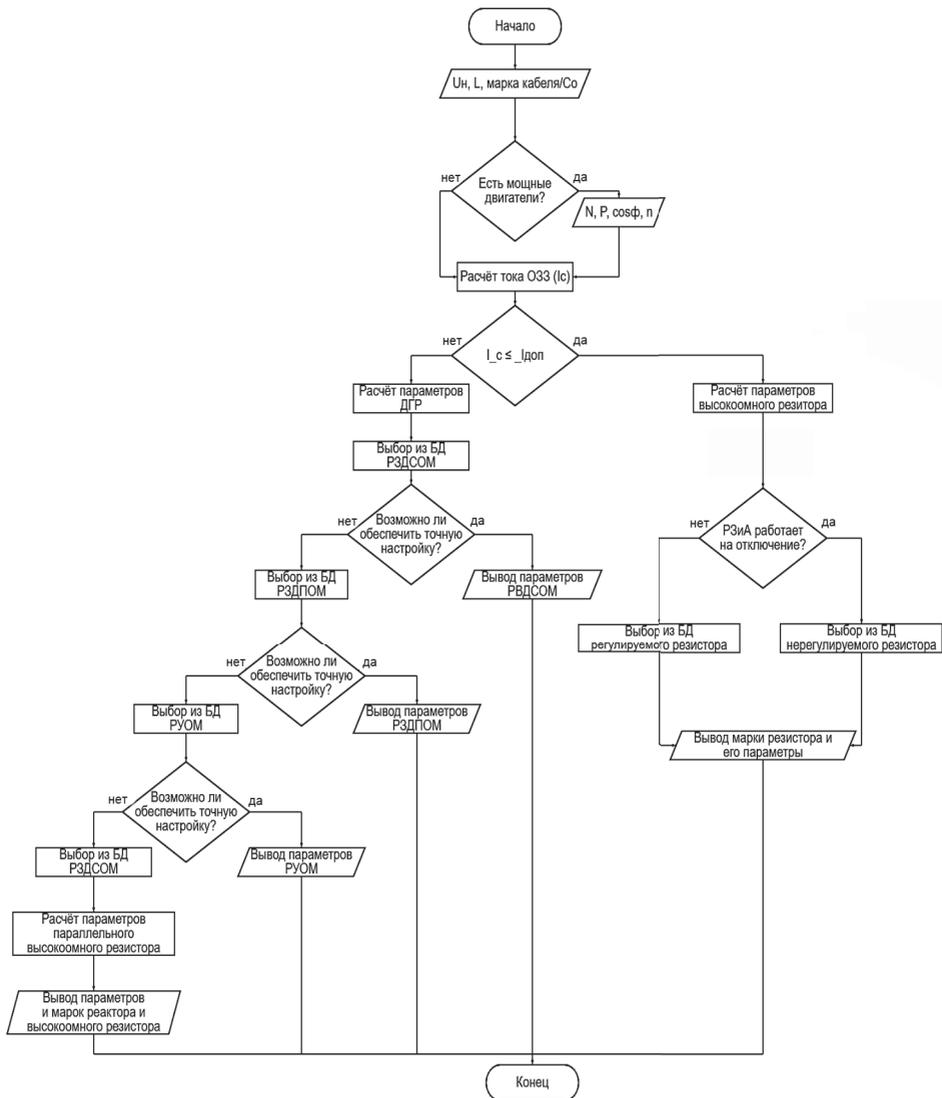


Рис. 2. Алгоритм выбора режима нейтрали

остальных типов электродвигателей [1]; их параметры и количество также задает пользователь:

$$C_D = \frac{0,0187 S_{\text{НОМ}} 10^{-6}}{1,2 \sqrt{U_{\text{НОМ}} (1 + 0,08 U_{\text{НОМ}})}} N, \quad (1)$$

$$C'_D = \frac{40 \sqrt[4]{S_{\text{НОМ}}^3} 10^{-9}}{3 (U_{\text{НОМ}} + 3,6) \sqrt[3]{n_{\text{НОМ}}}} N, \quad (2)$$

где $S_{\text{НОМ}}$ — номинальная полная мощность электродвигателя, МВА; $U_{\text{НОМ}}$ — линейное номинальное напряжение сети, кВ; $n_{\text{НОМ}}$ — номинальная частота вращения ротора, об/мин; N — количество двигателей одного вида с одинаковыми параметрами, шт.

Далее в программе проводится расчет емкостного тока однофазного замыкания на землю (I_C , А):

$$I_C = \sqrt{3} U_{\text{НОМ}} \omega (C_{\Sigma Л} + C_{\Sigma Д}) 10^{-6}, \quad (3)$$

где ω — угловая частота сети, рад/с; $C_{\Sigma Л}$ — суммарная емкость линий электропередач, мкФ; $C_{\Sigma Д}$ — суммарная емкость всех мощных двигателей, мкФ.

Полученный результат сравнивается с допустимыми в ПУЭ токами для заданного напряжения [2]:

30 А при напряжении 3—6 кВ;

20 А при 10 кВ;

15 А при 20 кВ;

10 А при напряжении 35 кВ.

Если емкостной ток не превышает допустимый, то предлагается выбор резистивного режима нейтрали (рис. 3). Расчет сопротивления высокоомного резистора (R_N , Ом) проводится по формуле [3]

$$R_N = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} I_C}. \quad (4)$$

Если релейная защита, реагирующая на токи ОЗЗ, работает на сигнал, в ходе поисковых работ поврежденного участка линии возможно сильное изменение емкостных проводимостей сети. В этом случае алгоритмом заложен выбор регулируемого резистора, который в автоматическом режиме подстраивается под параметры сети. В случае работы релейной защиты на отключение поврежденного участка линии достаточно использовать более дешевый нерегулируемый резистор.

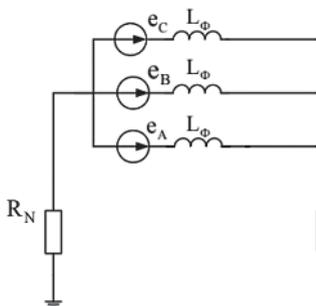


Рис. 3. Резистивный режим нейтрали

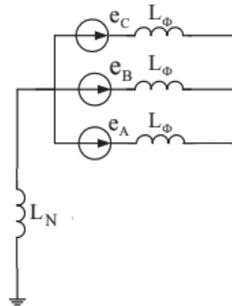


Рис. 4. Компенсированный режим нейтрали

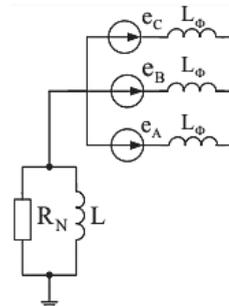


Рис. 5. Комбинированный режим нейтрали

В случае превышения емкостным током допустимого значения необходима его компенсация для исключения возникновения дуговых замыканий и неблагоприятных явлений. Для этого применяются дугогасящие реакторы — ДГР (рис. 4). Выбор ДГР проводится по условию реактивной мощности

$$Q_k \geq 1,25 I_C \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}}. \quad (5)$$

Изначально программа выбирает ДГР с переключаемыми отпайками типа РЗДСОМ, который является наиболее экономичным с точки зрения капиталовложений, но имеет ступенчатое регулирование, и проверяет возможность его настройки на резонанс в пределах 5 % [4] по формуле

$$\frac{I_{\min} + \Delta I n - I_C}{I_C} 100 \leq 5 \%, \quad (6)$$

где I_{\min} — минимальный ток регулирования реактора; ΔI — значение тока шага регулирования; n — шаг регулирования.

Если это условие не соблюдается, рассматривается реактор плунжерного типа РЗДПОМ — более дорогой, но имеющий плавную регулировку. Реактор также проверяется на возможность точной настройки на компенсацию емкостного тока по условию

$$0,15(I_{\max} - I_{\min}) \leq I_C \leq 0,75(I_{\max} - I_{\min}), \quad (7)$$

где I_{\max} — максимальный ток регулирования реактора; I_{\min} — минимальный ток регулирования реактора.

Если программа не находит подходящий реактор, то в последнюю очередь среди ДГР рассматривается реактор с подмагничиванием типа

РУОМ — самый дорогой тип из рассматриваемых. Программа проводит ту же проверку, что и для РЗДПОМ, и при невыполнении условий применяется комбинированный режим нейтрали.

Комбинированный режим нейтрали (рис. 5) позволяет обеспечить точную настройку на компенсацию емкостных токов ОЗЗ и уменьшить ущерб от неблагоприятных факторов, но сильно увеличивает затраты. Параметры регулируемого высоковольтного резистора, устанавливаемого в параллель реактору, подбирается из условия

$$R_N = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot 0,3I_C}. \quad (8)$$

Результатом работы программы является вывод маркировки, параметров заземляющего оборудования и ссылки на сайт производителя или поставщика.

Литература

1. **СТО ДИВГ-058—2017.** Расчет токов коротких замыканий и замыканий на землю в распределительных сетях. Методические указания. Санкт-Петербург, 2017.
2. **Правила устройства электроустановок.** 7-е издание. ЗАО «Энергосервис».
3. **Рыжкова Е.Н., Востросаблина В.А.** О некоторых аспектах применения резистивного заземления нейтрали // Промышленная энергетика. 2016. № 10. С. 54—61.
4. **Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В.** Режимы заземления нейтрали в электрических системах. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 118с.

*М.Д. Харабурова, KharaburovaMD@mpei.ru,
Е.Н. Рыжкова, RyzhkovaYN@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва*

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ СЕТЕЙ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Известно, что при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) велика вероятность появления дуговых замыканий, которые обладают прерывистым характером из-за неустойчивого горения дуги. Имеет место возникновение дуговых перенапряжений до 3,5—4 раз от номинального фазного напряжения, что влечет за собой возрастание токов замыкания, выделяемого

количества теплоты, негативного влияния на электрооборудование. Также под действием восстанавливающего напряжения на дуге промежутке в момент перехода тока через нулевое значение осуществляются повторные зажигания, усложняя процесс гашения дуги.

Создано множество технических решений для ограничения дуговых перенапряжений в сетях с изолированным режимом нейтрали, например применение дополнительного защитного активного сопротивления [1]. Однако данное техническое решение имеет ряд недостатков при условии использования в сетях с компенсацией емкостных токов, несмотря на то, что компенсация емкостного тока замыкания на землю в сетях среднего напряжения позволяет уменьшить ток замыкания на землю, снизить скорость восстановления напряжения на поврежденной фазе после гашения дуги и свести к минимуму вероятность перенапряжений при повторных зажиганиях дуги, а также создать условия для ее самопогасания.

Кроме того, применение нерегулируемого резистора неизменной величины может оказаться малоэффективным методом для подавления дуговых перенапряжений по причине непредсказуемости величины расстройки в аварийном режиме работы сети.

Такая ситуация имеет место в сетях с компенсацией емкостного тока на подстанциях, где защита от замыканий на землю работает исключительно на сигнал, или из-за неселективности защит при изменении конфигурации сети и разных режимов замыканий на землю (металлические, устойчивые, через перемежающуюся дугу). В первых двух случаях наложение на место возникновения ОЗЗ большой величины активного тока приведет к дополнительным повреждениям, ухудшению условий самопогасания дуги и возможному переходу однофазного замыкания в многофазное. Существует также проблема с недостаточной энергоемкостью резисторов, неспособностью в течение достаточно длительного времени рассеивать энергию без повреждения самой структуры материала резистора [2].

В условиях использования режима заземления нейтрали через дугогасящий реактор получается достичь уменьшения тока, протекающего через место замыкания, до минимальных значений, обеспечивающих самопогасание электрической дуги, а также снижения уровня перенапряжений на неповрежденных фазах до безопасных значений для изоляции используемого электрооборудования.

В нормальном режиме работы сети ток через реактор отсутствует, так как напряжение в нейтральной точке равно нулю. Однако при возникновении однофазного замыкания на землю через реактор начинает протекать ток компенсации вследствие изменения напряжения в нейтральной точке.

Стоит отметить, что на практике не всегда удается достичь точной резонансной настройки дугогасящих аппаратов. Это связано с тем, что емкость сети — непостоянная величина, которая может изменяться из-за включения и отключения отдельных участков сети в процессе проведения плановых и аварийных ремонтов, а также подключения новых линий. Следовательно, необходимо регулировать индуктивность реактора для осуществления компенсации емкостного тока. Однако в условиях изменения емкости сети и отсутствия системы плавной автоматической настройки компенсации резонанс емкостных токов линий и индукционного тока реактора не может быть оперативно обеспечен в каждый момент времени. Вдобавок установка плунжерных реакторов не допускается на тупиковых подстанциях по причине зарождения феррорезонансных перенапряжений в момент отключения даже одной линии из-за возникновения неполнофазного режима компенсации.

Кроме того, для недопущения значительных смещений нейтрали и снижения качества электрической энергии резонансная настройка требует почти идеальной симметрии сети. Так, в сетях с компенсацией емкостного тока степень несимметрии фазных напряжений не должна превышать 0,75 % фазного напряжения, а напряжение смещения нейтрали — 15 % фазного напряжения.

С целью исключения указанных выше недостатков можно предложить следующие варианты повышения уровня надежности и получения оптимального воздействия защитного резистора при возникновении перенапряжений в процессе ОЗВ в сетях с компенсированной нейтралью.

1. Устройство ограничения дуговых перенапряжений в сетях с компенсацией емкостных токов замыкания на землю (рис. 1). Данное устройство адаптируется в режиме реального времени под эксплуатационные изменения в сети, исключает вероятность зарождения перенапряжений, осложнения условий самопогасания дуги и позволяет избежать чрезмерных разрушений в месте повреждения [3].

В нормальном режиме данное устройство находится в состоянии покоя, ток нулевой последовательности не протекает через ДГР 4, поскольку напряжение отсутствует на нейтрали нейтралеобразующего устройства 2 и выходе трансформатора напряжения 8.

При возникновении перемежающегося дугового замыкания ток ДГР поступает на вход 1 функционального блока всережимного измерителя настройки компенсации сети 5, вход 2 блока определения емкостного тока 6 и вход 1 блока выбора режима замыкания 7. С выходов трансформатора напряжения сигналы фазных напряжений U_{Φ} и напряжения на нейтрали $3U_0$ поступают на вход 2 блока 5 и вход 2 блока 7. Измерителем настрой-

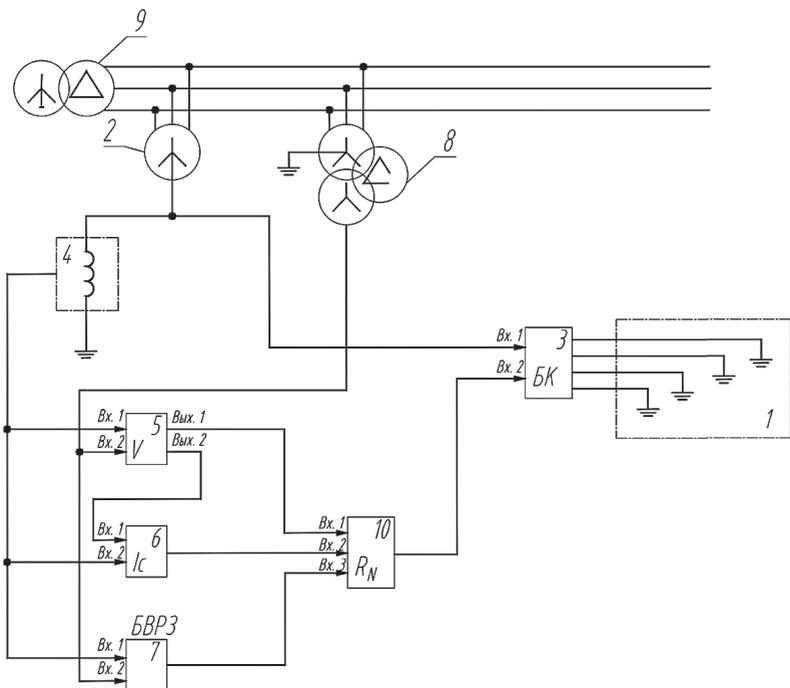


Рис. 1. Структурная схема устройства ограничения дуговых перенапряжений в сетях с компенсацией емкостных токов замыкания на землю: 1 — заземляющий резистор; 2 — нейтрализующее устройство; 3 — блок коммутаторов; 4 — токовая обмотка дугогасящего реактора; 5 — блок всережимного измерителя настройки компенсации сети; 6 — блок определения емкостного тока; 7 — блок выбора режима замыкания; 8 — измерительный трансформатор напряжения; 9 — силовой трансформатор; 10 — блок вычисления значения величины защитного резистора

ки компенсации сети 5 определяется величина расстройки компенсации V , сигнал с выхода 1 подается на вход 1 блока вычисления значения величины защитного резистора 10, а сигнал с выхода 2 — на вход 1 блока определения емкостного тока 6.

По известным значениям расстройки компенсации V и тока ДГР I_L определяется значение емкостного тока замыкания I_C . С выхода блока 6 сигнал поступает на вход 2 блока вычисления значения величины защитного резистора 10. При эксплуатационных изменениях емкости сети в режиме замыкания соответственно изменяется величина этого сопротивления.

Блоком выбора режима замыкания 7 идентифицируется режим перемежающегося горения дуги, характерными особенностями которого являются

ся высокие значения производных фазных напряжений и напряжения на нейтрали. Сигнал с выхода блока 7 поступает на вход 3 блока вычисления значения величины защитного резистора 10.

Сигнал с выхода элемента вычисления значения величины защитного резистора 10 поступает на вход 2 пакета коммутаторов 3. С помощью пакета коммутаторов достигается необходимая величина заземляющего резистора 1 посредством подключения нужного количества электродов. Благодаря этому решению избыточный заряд стекает с нейтрали через резистор, что приводит к ограничению дуговых перенапряжений.

Действие автоматики устройства отключается при установившемся горении дуги, так как в этом режиме нет условий для возникновения максимальных перенапряжений, а с наложением дополнительного активного тока увеличится сила разрушения изоляции оборудования.

Установившийся режим определяется блоком выбора режима замыкания 7, сигнал на выходе которого отсутствует из-за низкого значения производной напряжения на нейтрали.

2. Устройство защиты от дуговых перенапряжений при однофазном замыкании на землю (рис. 2). Все элементы устройства выполнены комплектно, соединены сборочными операциями на предприятии-изготовителе и представляют собой единую конструкцию, которую устанавливают внутри трансформаторной подстанции [4].

При перемежающемся дуговым замыкании ток дугогасящего реактора 4 поступает на первый вход блока 5, где определяется величина оптимального значения сопротивления защитного резистора 1 с использованием информации о величине сопротивления (или тока) дугогасящего реактора 4. С выходов трансформатора напряжения 6 сигналы фазных напряжений U_{ϕ} и напряжения на нейтрали $3U_0$ поступают на вход блока 8 выбора поврежденной фазы.

Функциональным блоком 8 выбора поврежденной фазы идентифицируется режим перемежающегося горения дуги на поврежденной фазе, характерными особенностями которого являются высокие значения производных фазных напряжений и напряжения на нейтрали. Сигнал с выхода функционального элемента 8 поступает на вход функционального элемента 9 определения начальной скорости восстановления напряжения на поврежденной фазе, где вычисляется значение расстройки компенсации.

Сигнал с выхода блока 5 вычисления значения величины защитного резистора поступает на второй вход пакета коммутаторов 3, обеспечивая необходимую величину сопротивления заземляющего резистора R_N посредством подключения нужного количества электродов заземляющего резистора 1. Это обеспечивает быстродействующее ограничение дуговых

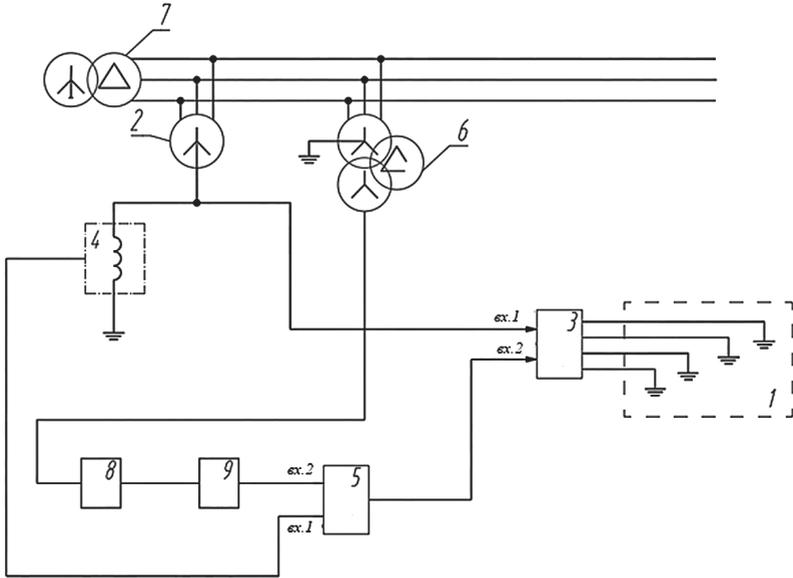


Рис. 2. Структурная схема устройства защиты от дуговых перенапряжений при однофазном замыкании на землю: 1 — заземляющий резистор; 2 — нейтралеобразующее устройство; 3 — блок коммутаторов; 4 — токовая обмотка дугогасящего реактора; 5 — блок вычисления значения величины защитного резистора; 6 — измерительный трансформатор напряжения; 7 — силовой трансформатор; 8 — блок выбора поврежденной фазы; 9 — блок определения начальной скорости восстановления напряжения на поврежденной фазе

перенапряжений за счет управления величиной резистора I , которое осуществляется в режиме перемежающегося горения дуги путем вычисления расстройки компенсации с использованием измерения начальной скорости нарастания напряжения на поврежденной фазе.

В режиме нормальной работы сети и установившегося горения дуги автоматика данного устройства блокируется аналогично устройству ограничения дуговых перенапряжений в сетях с компенсацией емкостных токов замыкания на землю.

Такое техническое решение позволяет быстро определить расстройку и подключить защитный резистор внутри каждого цикла работы, что дает возможность оптимально управлять активным сопротивлением как для исходной схемы сети, так и для аварийных или поисковых переключений.

Использование предлагаемых устройств позволяет обеспечить высокую надежность работы устройств защиты в сетях с компенсированной

нейтралью, свести к минимуму возникновение перенапряжений, а также их негативных последствий в режиме перемежающегося горения дуги.

Литература

1. **Нормирование** амплитуды высших гармоник при определении фидера с однофазным замыканием на землю / А.И. Федотов, Л.В. Ахметвалеева, Р.Ш. Басыров и др. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 58—68.
2. **Дмитриев С.Н., Нестеров С.В., Целебровский Ю.В.** Электрические сети малых городов. Обеспечение надежности и безопасности электроснабжения // Новости ЭлектроТехники. 2010. № 6 (66).
3. **Патент** на изобретение 2779147 Российская Федерация: МПК H02N 9/08 (2006.01) / Устройство защиты от дуговых перенапряжений при однофазных замыканиях на землю / Е.Н. Рыжкова; В.Е. Васин; М.Д. Харабурова; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». № 2022114842; приоритет 01.06.2022.
4. **Патент** на изобретение 2779881 Российская Федерация: МПК H02N 9/08 (2006.01) / Устройство ограничения дуговых перенапряжений в сетях с компенсацией емкостных токов замыкания на землю / В.Е. Васин, Е.Н. Рыжкова, М.Д. Харабурова, Н.Ю. Панферова; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». № 2022111892; приоритет 29.04.2022.

Г.В. Ваганов, vaganov@list.ru, КГЭУ, г. Казань
Л.И. Абдуллин, abdullinli@gridcom-rt.ru,
И.Г. Нуртдинов, nurtdinovig@gridcom-rt.ru,
АО Сетевая компания, г. Казань

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ 6—10 кВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Развитие интеллектуальных особенностей коммутационных аппаратов и устройств детектирования аварийных ситуаций в распределительных электрических сетях (РЭС) обуславливает изменение подходов к их автоматизации. С увеличением количества интеллектуальных коммутационных аппаратов растет и количество внедренных систем автоматического восстановления электроснабжения (САВС) в сетевых компаниях, что позволяет решать проблемы эффективного определения аварийных участков сетей 6—20 кВ и восстановления электроснабжения потребителей [1].

САВС предназначена для автоматизации диспетчерского управления распределительными сетями 6—20 кВ в нормальных и аварийных режимах, при междуфазных коротких замыканиях и однофазных замыканиях на землю. Система определяет поврежденный участок РЭС, изолирует его и восстанавливает электроснабжение потребителей в течение 20—90 с.

Основными функциями САВС являются:

- отображение на схеме сети показаний индикаторов коротких замыканий, предполагаемой области повреждения оборудования и аварийного погашения потребителей;

- автоматическая локализация аварийного участка и восстановление питания погашенных при аварии потребителей с использованием телеуправления и показаний ИКЗ;

- анализ возможных вариантов восстановления питания погашенных потребителей при аварии областей схемы, помощь диспетчеру в выборе наилучшего варианта и оптимальной последовательности переключений для восстановления питания;

- формирование оптимальных последовательностей переключений для запланированного вывода оборудования в ремонт и восстановления нормальной схемы;

- возможность работы в режиме поддержки принятия решений диспетчера.

Различают автоматический режим работы САВС и автоматизированный. В автоматическом режиме работы система сама принимает решения по локализации аварийного участка сети и восстановления питания погашенных при аварии потребителей. О проведенных переключениях делается запись в журнал событий, по которому диспетчер может проанализировать работу САВС. При автоматизированном режиме работы САВС предоставляет диспетчеру последовательность необходимых переключений для локализации аварийного участка сети и восстановления питания погашенных потребителей.

По типу управления объектами распределительной сети САВС разделяют на централизованные и распределенные. Централизованные САВС представляют собой системы, где алгоритмы по выявлению междуфазных замыканий, однофазных замыканий на землю, обрывов и локализации аварийного участка сети с последующим восстановлением питания потребителей реализованы на взаиморезервируемых серверах. Вся телеметрическая информация от интеллектуальных коммутационных аппаратов, индикаторов коротких замыканий и устройств релейной защиты поступает на единый для всех полевых устройств сервер. Для корректной работы централизованной САВС необходимо наличие достоверной телеметрии с

коммутационных аппаратов, индикаторов коротких замыканий, возможность телеуправления коммутационными аппаратами. Централизованная САВС в работе также может учитывать пропускную способность по току элементов схемы, достоверность и непротиворечивость состояний индикаторов коротких замыканий. Распределенные САВС представляют собой системы, где обработка алгоритмов реализована на контроллерах нижнего уровня.

Еще один тип автоматизации распределительных сетей, применяемых сетевыми компаниями — локальные системы управления коммутационными аппаратами, где решения по локализации аварийных участков принимаются самими коммутационными аппаратами на основе уставок релейных защит. Данный тип автоматизации распределительных сетей имеет свои плюсы, в связи с тем, что при автоматизации воздушных линий распределительной сети 6—10 кВ используются GSM-каналы связи, которые не везде обеспечивают качественную и надежную связь. При аварии могут возникать прерывания связи с коммутационными аппаратами — тем самым будет отсутствовать возможность дистанционного управления и локализации аварийного участка. А в случае с локальной автоматизацией нет необходимости управлять дистанционно коммутационными аппаратами. Соответственно повышается надежность и снижается время локализации аварийного участка сети.

Таким образом, применение САВС является одним из технических решений повышения эффективности функционирования РЭС и позволяет снизить эксплуатационные затраты.

Литература

1. **Многопараметрический** электротехнический комплекс онлайн-мониторинга однофазных замыканий на землю фидеров древовидной структуры систем электроснабжения с изолированной нейтралью напряжением 6—35 кВ / А.И. Федотов, Р.Э. Абдуллазянов, Г.В. Вагапов, А.Ф. Абдуллазянов // Промышленная энергетика. 2022. № 8. С. 2—11.
2. **Автоматизация** распределительной сети с целью повышения надежности электроснабжения потребителей / К.В. Петров, А.И. Попов, И.А. Горячевский и др. // 92-е заседание семинара «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики». Казань, 2020.
3. **Повышение** эффективности эксплуатации электрических сетей / В.А. Черников, М.В. Чурсина, А.Е. Микляев, Н.В. Прибылова / Сб.: Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф. мол. учен. и спец. Воронеж: Воронежский ГАУ, 2018. С. 313—317.

*И.А. Липушкин, lipuzhin@nntu.ru,
Н.А. Сеницын, siniczin.nikolaj2014@yandex.ru,
НГТУ им. П.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород*

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ НИЗКОГО И СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Происходящие повсеместно процессы децентрализации электроснабжения требуют гибкости и эффективности. Удовлетворить эти требования в сетях среднего и низкого напряжения способна распределенная генерация (РГ).

В России распределенная энергетика имеет потенциал роста, существенно превышающий среднемировые показатели. Огромные размеры страны при низкой плотности населения приводят к недопустимым в современных условиях затратам на транспорт электроэнергии и тепла в централизованных системах. В то же время широкая доступность газа и дизельного топлива на большей части территории страны облегчает построение локальных генерирующих мощностей.

При нехватке централизованных мощностей режим параллельной работы источников РГ с сетью является эффективным с экономической и технологической точек зрения [1]. Однако остаются нерешенными вопросы обеспечения надежности электроснабжения потребителей.

Одним из показателей надежной работы системы электроснабжения является устойчивость напряжения — способность поддерживать значения напряжения на всех подстанциях системы вблизи номинальных после возникновения возмущения в системе (например, изменения нагрузки) [2]. Нарушение устойчивости напряжения приводит к прогрессирующему и неконтролируемому снижению напряжения и последующему отключению нагрузок.

Основной причиной, вызывающей нарушение устойчивости напряжения, является неспособность энергосистемы оперативно удовлетворить спрос на реактивную мощность. Передача реактивной мощности по сети приводит к снижению и/или перепадам напряжения. Вследствие этого наблюдается нехватка мощности, потребляемой нагрузками, и увеличение нагрузки на сеть, что вызывает увеличенное потребление реактивной мощности и приводит к дальнейшему снижению напряжения. Следствием падения напряжения является отключение потребителей или аномально низкие величины напряжения на отдельных участках энергосистемы [3].

Поддержание требуемых уровней напряжения при различной нагрузке в сетях с РГ обеспечивается:

— изменением возбуждения генераторов или использованием полупроводниковых преобразователей (например, инверторов), через которые источники РГ подключаются в сеть;

— регулированием коэффициентов трансформации трансформаторов и использованием вольтодобавочных трансформаторов;

— применением устройств гибких систем передачи переменного тока (FACTS);

— внедрением мультиагентных систем, использующих контроль напряжения в различных районах сети.

При нарушении устойчивости напряжения и выходе напряжения за допустимые пределы может возникнуть аварийная ситуация, например лавина напряжения — процесс нарушения устойчивости района энергосистемы в связи с прогрессирующим снижением напряжения (обычно из-за дефицита реактивной мощности). В результате аварийного уменьшения пропускной способности сети или из-за отключения части питающих линий электропередачи на приемной стороне оставшихся в работе питающих линий напряжение может снизиться до значений, недостаточных для обеспечения технологических процессов производства (рис. 1).

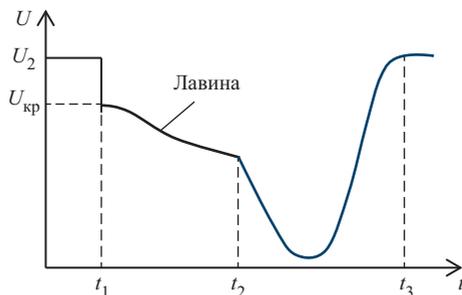


Рис. 1. Лавина напряжения: U_2 — номинальное напряжение; $U_{кр}$ — критическое напряжение; t_1 — момент снижения напряжения до $U_{кр}$; $t_1 \dots t_2$ — процесс развития лавины (несколько секунд); t_3 — момент времени, когда напряжение возвращается к номинальному

Для исследования устойчивости напряжения могут применяться коэффициенты устойчивости напряжения (*voltage stability index, VSI*) [4]. Коэффициенты позволяют оценить, насколько система близка к лавине напряжения, и вовремя принять необходимые меры.

В таблице 1 приведены наиболее распространенные виды коэффициентов устойчивости [5]. Коэффициенты на основе матрицы Якоби позво-

ляют определить предел максимальной нагрузки и запас устойчивости, но их расчет слишком трудоемок. Поэтому широкое применение получили коэффициенты на основе системных переменных, которые используют напряжение шины или поток мощности по линиям, требуют меньше вычислений и, следовательно, подходят для контроля устойчивости напряжения в режиме реального времени. Их недостатком является то, что они не могут точно описать состояние напряжения в данный момент, а лишь показывают самые слабые линии и узлы [6].

Т а б л и ц а 1

Коэффициенты устойчивости

Тип (группа)	Коэффициент	Характеристика
Матрицы Якоби	Тестовая функция (<i>Test function</i>)	Вычисления для всей сети. Трудно использовать для контроля
	Второго порядка (<i>Second order</i>)	
	Наклонный вектор (<i>Tangent vector</i>)	
	U/U_0	
Системных переменных. Устойчивость узлов	<i>L</i> -коэффициент (<i>L-index</i>)	Легко вычисляются. Дают лучшие результаты в сетях с радиальной структурой
	Посадки напряжения (<i>Voltage Collapse Index</i>)	
	Устойчивости (<i>StabilityIndex</i>)	
Системных переменных. Устойчивость линий	Устойчивости линии L_{mn}	Легко вычисляются. Хорошо подходят для контроля. Определяют самую слабую линию в сети
	Напряжения линии (<i>Line Voltage Stability</i>)	
	Устойчивость быстрого напряжения (<i>Fast Voltage Stability</i>)	
	Определения точки посадки напряжения (<i>Voltage Collapse Point Indicators</i>)	
	<i>L</i> -коэффициент (<i>L-index</i>)	
	Устойчивости линии LQP	
Локального измерения	Устойчивости узла нагрузки (<i>Voltage Stability Load Bus Index</i>)	Могут использоваться для контроля
	Критерия <i>S</i> -различия (<i>S-Difference Criterion</i>)	
	Чувствительность (<i>Sensitivities</i>)	
Наблюдения	Сумм абсолютных значений (<i>Sum of absolut evalve</i>)	Измерение и обработка
	Определения точки посадки напряжения (<i>Voltage Collapse Point Indicators</i>)	
	Запаса (<i>Margin VSI</i>)	

Рассмотрим коэффициенты, определяющие устойчивость линий электропередачи, более подробно. Большинство из них основано на определении параметров режима работы сети при передаче мощности по линии между двумя подстанциями (узлами). На рисунке 2 приведен рассматриваемый участок электрической сети.

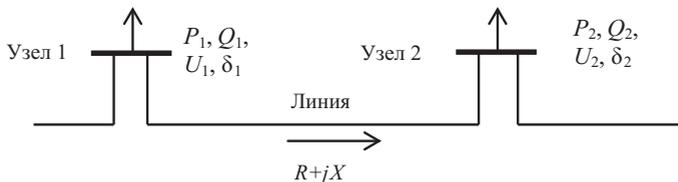


Рис. 2. Участок электрической сети с двумя нагрузочными узлами: P_1, Q_1, U_1, Δ_1 и P_2, Q_2, U_2, Δ_2 — действующие значения активной, реактивной мощности и напряжения, фазовый угол вектора напряжения в начале и в конце линии соответственно; R, X — активное и реактивное сопротивление линии

1. Коэффициент L_{mn} основан на прохождении реактивной мощности через линию. Определяет самую слабую линию в системе, чтобы можно было среагировать на изменение напряжения и, следовательно, предотвратить полное отключение системы [7]:

$$L_{mn} = \frac{4XQ_2}{[U_1 \sin(\varphi - (\delta_1 - \delta_2))]^2}, \quad (1)$$

где φ — угол между активным и реактивным сопротивлениями линии.

Если коэффициент $L_{mn} < 1$, система устойчива.

2. Коэффициент LQP зависит от изменения активной, реактивной мощности и напряжения на линии. Определяет самую слабую линию в системе [7]:

$$LQP = 4 \left(\frac{X}{U_1} \right) \left(\frac{X}{U_1^2} P_1^2 + Q_2 \right). \quad (2)$$

Если $LQP > 1$, происходит резкое снижение напряжения, приводящее к аварии в системе.

3. Коэффициент $FVSI$ — коэффициент устойчивости быстрого напряжения — был предложен I. Musirin [7]. Он основан на изменении реактивной мощности в линии:

$$FVSI = \frac{4Z^2 Q_2}{U_1 X}. \quad (3)$$

Если $FVSI$ близок к единице, линия близка к пределу устойчивости. Чтобы система была устойчива, $FVSI$ всех линий должен быть < 1 .

4. Коэффициент L зависит от изменения напряжения на линии и фазового угла вектора напряжения [8]:

$$L = \frac{4[U_1 U_2 \cos(\delta_1 - \delta_2) - U_2^2 \cos^2(\delta_1 - \delta_2)]}{U_1^2} \quad (4)$$

Значение коэффициента L изменяется в пределах от 0 до 1. Значение, близкое к нулю, указывает, что система устойчива по напряжению, а близкое к единице — указывает на состояние, близкое к критическому. Если $L = 1$, то система уже находится в аварийном состоянии.

Данные коэффициенты помогают быстро определить слабую линию в системе и найти предельные параметры нагрузки без неблагоприятных последствий для потребителей электроэнергии. Они используются для прогнозирования критического снижения напряжения и анализа непредвиденных обстоятельств, вызванных отключением линии в энергосистеме. Также они могут быть полезны при выборе расположения и мощности нагрузки и генерации в узлах энергосистемы.

Значения коэффициентов могут различаться, потому что они оценивают состояние линии, основываясь на различных параметрах.

В данной работе был выполнен расчет коэффициентов устойчивости линий на примере европейской низковольтной коммерческой тестовой схемы, которая представлена на рис. 3 [9].

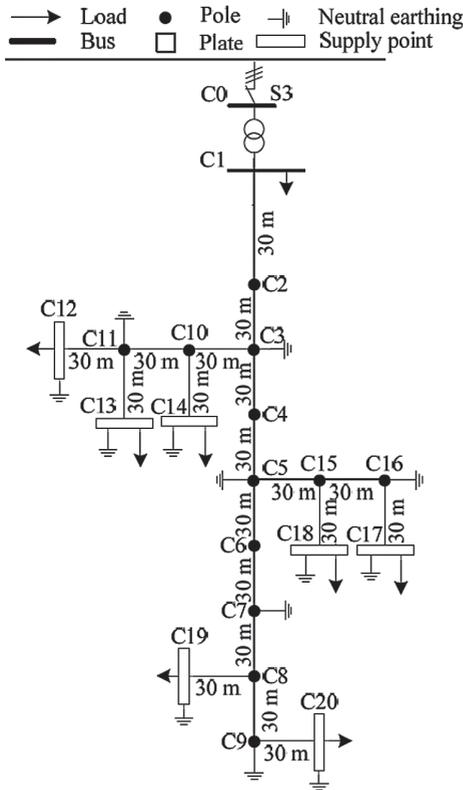


Рис. 3. Модель европейской низковольтной коммерческой сети

Параметры нагрузки для номинального и аварийного режимов приведены в табл. 2. Остальные параметры системы приведены в [8].

Разработана PSCAD-модель европейской низковольтной коммерческой сети для нахождения данных, необходимых для расчета коэффициента устойчивости. Программа выдает необходимые данные о параметрах линий системы. Эти данные экспортируются в таблицу Excel, в которой рассчитываются значения коэффициента устойчивости для каждой линии и определяются наиболее загруженные линии.

Т а б л и ц а 2

Значения нагрузки

Узел	Номинальный режим		Аварийный режим	
	P , МВт	Q , Мвар	P , МВт	Q , Мвар
C1	0,12	0,04	0,12	0,04
C12	0,02	0,007	0,12	0,04
C13	0,02	0,007	1	0,1
C14	0,025	0,008	0,12	0,04
C17	0,025	0,008	0,12	0,04
C18	0,008	0,0027	0,12	0,04
C19	0,016	0,005	0,016	0,005
C20	0,008	0,0027	0,008	0,0027

Результаты расчетов коэффициентов устойчивости линий для номинальных и аварийных режимов работы сети приведены на рис. 4—7.

Из рисунков 4—7 видно, что в номинальном режиме значения коэффициентов не выходят за пределы норм для всех линий, а в аварийном режиме:

- значения коэффициента L_{mn} превышают допустимые значения для линии 9 и находятся на грани устойчивости линий 1, 2, 10;
- коэффициент LQP превышает допустимые значения для линии 12;
- коэффициент $FVSI$ превышает допустимые значения для линий 1, 2, 9—12, 14, 16, 17 и находятся на грани устойчивости линий 3, 4, 13, 15;
- коэффициент L превышает допустимые значения для линии 12, что указывает на возникновение аварийного режима.

Также можно отметить, что по коэффициентам L_{mn} и $FVSI$ одинаково выявляется наиболее нагруженная линия 9 для номинального и аварийного режимов. Выбор самой слабой линии по коэффициентам LQP и L не совпадает, что связано с особенностью расчета коэффициентов, так как расчеты L_{mn} и $FVSI$ в большей степени учитывают распределение мощности, LQP и L — изменение параметров напряжения и нагрузки.

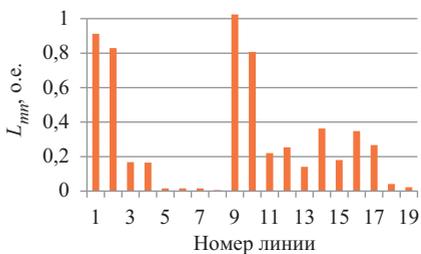
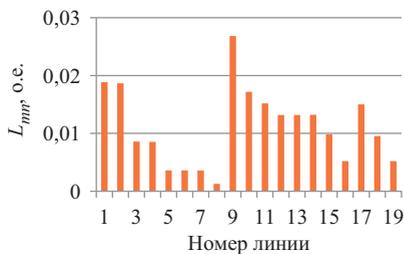


Рис. 4. Результаты расчетов коэффициента L_{mpr} :
a — номинальный режим; *б* — аварийный режим

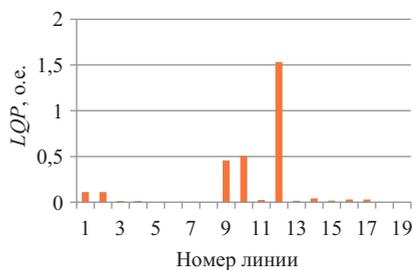
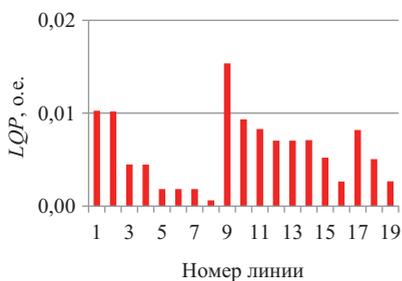


Рис. 5. Результаты расчетов LQP -коэффициента:
a — номинальный режим; *б* — аварийный режим

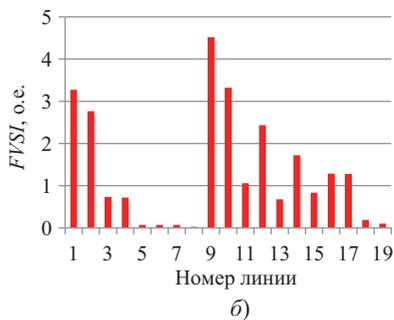
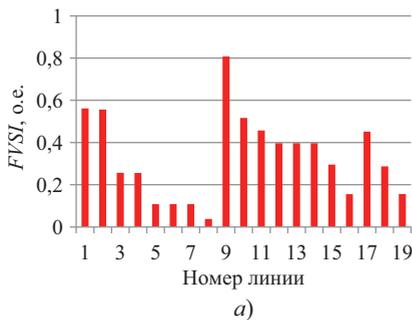


Рис. 6. Результаты расчетов $FVSI$:
a — номинальный режим; *б* — аварийный режим

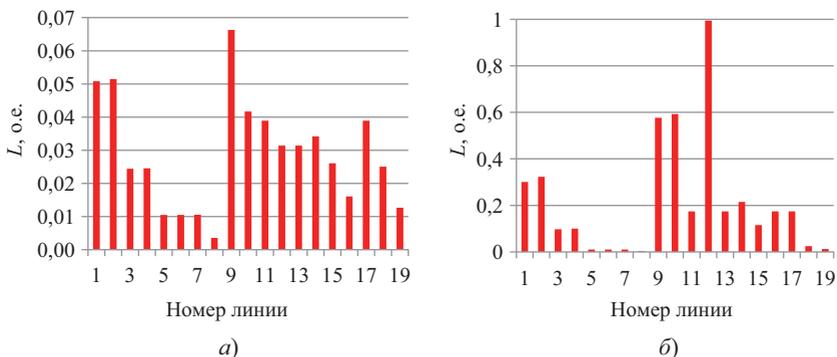


Рис. 7. Результаты расчетов коэффициента L :
a — номинальный режим; *б* — аварийный режим

Значения разных коэффициентов устойчивости не совпадают, так как каждый коэффициент включает в себя различные параметры линии и рассчитывается по своей формуле.

Выводы. Анализируя полученные результаты, можно найти закономерности в изменениях параметров линий с увеличением нагрузки на систему. Появляется возможность уже на этапе проектирования системы определить, как линии реагируют на различные режимы и неисправности в системе, сравнивая эффективность размещения источников РГ, нагрузок или устройств FACTS в различных узлах сети.

Результаты сравнения коэффициентов устойчивости линий показали, что рассчитанные значения отличаются, однако все коэффициенты позволяют определить факт нарушения устойчивости. В дальнейших работах планируется включить в схему распределительной сети источники РГ и определить, какой коэффициент устойчивости напряжения является оптимальным.

Литература

1. **Распределенная** энергетика в России: потенциал развития / А. Хохлов, Ю. Мельников, Ф. Веселов и др. Энергетический центр Московской школы управления «Сколково», 2018. 87 с.
2. **Definition** and classification of power system stability — Revisited & extended / N. Hatziaargyriou et al. // IEEE Transactions on Power Systems. 2021. V. 36. No 4. P. 3271—3281.
3. **Agatep A.** Voltage stability analysis using simulated synchrophasor measurements, Master of Science thesis, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, CA, USA, 2013.

4. **Musa H., Adamu S.S.** Enhanced PSO based multi-objective distributed generation placement and sizing for power loss reduction and voltage stability index improvement // 2013 IEEE Energytech. 2013. P. 1—6.
5. **A contemporary** novel classification of voltage stability indices / H. Zaheb, M.S.S. Danish, T. Senjyu et al. // Applied Sciences. 2020. V. 10. No 5. 1639.
6. **Липужин И.А.** Применение коэффициентов устойчивости напряжения (VSI) // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: Материалы VI национальной научно-практической конференции. В 2 т. Казань: КГЭУ, 2020. С. 283—285.
7. **An assessment** of voltage stability based on line voltage stability indices and its enhancement using TCSC / M. Mathew, S. Ghosh, D. Suresh Babu, A.A. Ansari // IJSR Journal of Electrical and Electronics Engineering. 2015. V. 10. Is. 6. Ver. I. P. 81—88.
8. **Yadav S.K., Soni A.** Voltage stability estimation of electric power system using L-index // International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering. 2016. V. 4. special is. 4. P. 30—33.
9. **Cigré Task Force C6.04.** Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources; Cigré Brochure 575; Cigré: Paris, France, 2014.

*А.П. Соколов, sasha777sokolov@list.ru,
А.Э. Морщакин, smorshchakin@mail.ru,
А.Р. Курбанов, Kubireducel@mail.ru,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск*

ВЛИЯНИЕ ЗАКОНА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА СТАТИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ВЫХОДЕ НА РАЗДЕЛЬНУЮ РАБОТУ

Внедрение объектов распределенной генерации является одной из основных тенденций современной промышленной энергетики. Это связано, с одной стороны, с необходимостью повышения надежности электроснабжения ответственных заводских потребителей, с другой стороны, такой подход позволяет снизить затраты на потребляемую электроэнергию и повысить конкурентоспособность продукции. Особенно эффективным является использование вторичных энергоресурсов, например попутных газов технологического цикла, таких как доменный и коксовый. В связи с этим промышленные предприятия занимаются реконструкцией имеющихся электростанций и осваивают новые объекты распределенной генерации.

На этапе реконструкции имеющихся ТЭЦ, как правило, увеличивается установленная мощность синхронных генераторов и их переводят в схему блок генератор—трансформатор. Однако при наличии на электростанции поперечных связей по электричеству на генераторном напряжении и соответствующего распределения нагрузок, такой подход приведет к изменению потокораспределения и увеличит сложность ведения режимов. Особенно тяжелым может быть выход электростанции на раздельную работу, поскольку точки действия делительной автоматики могут быть не скорректированы, работа дифференциальной защиты шин в случае короткого замыкания может привести к отделению несбалансированного узла.

Таким образом, возникает задача тщательного планирования режимов отделения электростанции с нагрузкой от энергосистемы, которые часто называют островными. Основной задачей при этом является поддержание постоянства напряжения и частоты в выделившемся узле. Поддержание данных параметров обусловлено, с одной стороны, балансом активных и реактивных мощностей, с другой стороны уставками напряжения и частоты регуляторов скорости. В свою очередь величина уставок обусловлена законами регулирования скорости и возбуждения в нормальном режиме параллельной работы при отсутствии группового регулирования.

Противоречие заключается в том, что требования к законам регулирования напряжения и скорости в нормальном и островном режимах могут принципиально отличаться. Зачастую при параллельной работе генераторы могут выдавать постоянные значения активной и реактивной мощностей. При относительно невысокой установленной мощности машины и связи с мощной энергосистемой это является обоснованным. Однако при выходе на раздельную работу возникает небаланс мощностей, и изложенный подход недопустим. Другой особенностью режимов выхода на раздельную работу является наличие таких объектов распределенной генерации, как газопоршневые, газотурбинные и парогазовые установки, имеющие малую инерцию и отключающиеся при небольших просадках напряжения. Коррекция уставок систем возбуждения также представляет интерес, поскольку при работе в параллель может изменяться уровень напряжения со стороны питающей энергосистемы, и возникает необходимость их корректировки, поскольку относительно невысокая мощность генераторов не позволяет поддерживать на шинах заданный уровень напряжения. Поэтому исследование подобных режимов является актуальным.

Исследованию режимов систем возбуждения посвящено большое число отечественных и зарубежных трудов. Так, в трудах [1—3] приведены методики настройки автоматических регуляторов возбуждения, в том числе в условиях объектов распределенной генерации. Труды зарубежных

ученых [4—9] посвящены вопросам повышения статической и динамической устойчивостей синхронных генераторов с учетом влияния систем регулирования возбуждения PSS; работы [10—14] посвящены вопросам повышения эффективности работы регуляторов возбуждения за счет демпфирования колебаний ротора в электромеханических переходных процессах; работы [15—17] посвящены регулированию возбуждения источников распределенной генерации с различными первичными двигателями; в работах [18—22] показаны особенности управления системами возбуждения у синхронных генераторов системных электростанций и способы улучшения их эксплуатационных характеристик; работы [23—24] посвящены вопросам моделирования режимов систем электростанций и их автоматического управления; а [25—31] — вопросам анализа и расчета режимов заводских электростанций при выходе на раздельную работу.

Исследования проводили на примере заводской ТЭЦ, имеющей в своем составе распределительное устройство собственных нужд (рис. 1): два генератора собственных нужд в нормальном режиме работают отдельно, выход на раздельную работу происходит по отдельности; мощности генераторов рассчитаны на половину потребителей каждый; приведены средние значения нагрузок. Непотребленная электроэнергия выдается в энергосистему через трансформаторы связи по 20 МВА.

В качестве примера на рис. 2 показан график изменения вырабатываемых активной (верхний график) и реактивной (нижний график) мощностей во времени на действующем объекте за год.

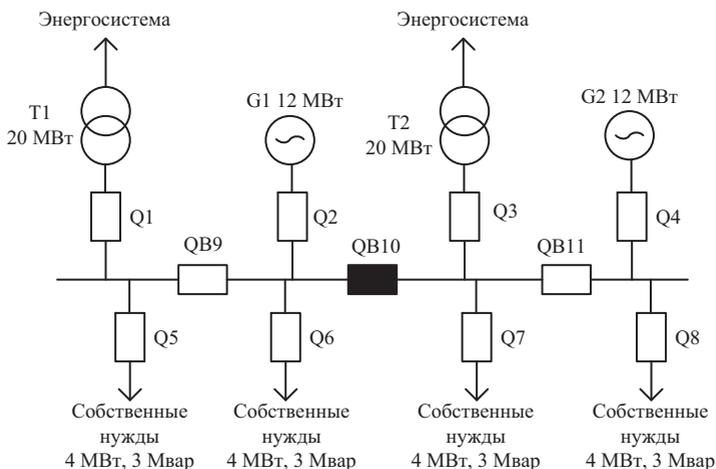


Рис. 1. Исследуемая схема электроснабжения

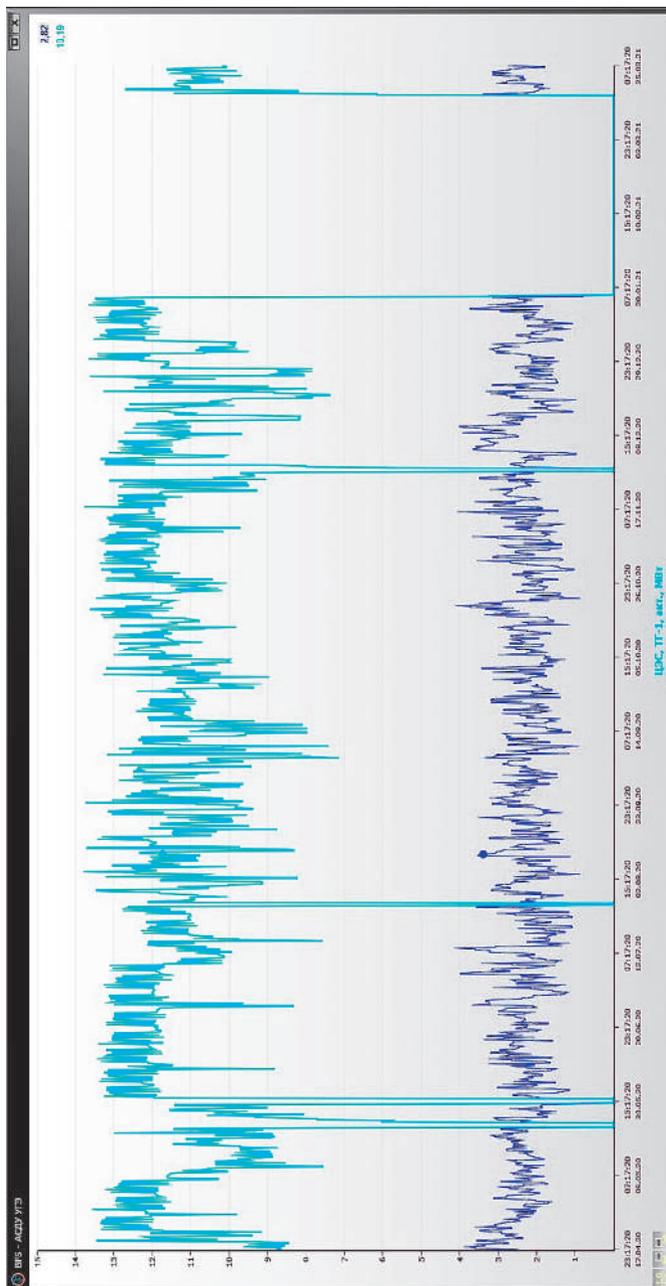


Рис. 2. Изменение активных и реактивных мощностей ТТ-1

Как видим, мощности изменяются в широких пределах, что в совокупности с изменяющимся напряжением со стороны энергосистемы усложняет действие АРВ.

Расчеты вели с помощью программного комплекса «КАТРАН». При параллельной работе с энергосистемой потокораспределение в сети при наибольших мощностях имело вид, приведенный в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Потокораспределение при нормальном режиме работы

№ присоединения	P , МВт	Q , Мвар
Т1 10/3	5,5	-3,5
ТГ1	12,5	2,5
ТГ2	11	3
Нагрузка собственных нужд	18	9
Суммарная вырабатываемая мощность в узле	23,5	5,5

После выхода на раздельную работу получаем небаланс мощностей:

$$\Delta P = 23,5 - 18 = 5,5 \text{ МВт}; \Delta Q = 5,5 - 9 = -3,5 \text{ Мвар.}$$

Очевидно, что в рассматриваемом узле на момент выхода имеется избыток активной мощности и дефицит реактивной. Для ликвидации небаланса в соответствии со своими статическими характеристиками должны отработать системы регулирования турбин и возбуждения. Расчеты по турбогенераторам сведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Определение запаса статической устойчивости

№ турбогенератора	P , МВт	Q , Мвар, по нагрузочной диаграмме	Q , Мвар, по нагрузочной диаграмме с поправкой на нагрев обмоток (10 %)	$P_{\text{эл. магн макс}}$	$k_{\text{зап}}$, %	$k_{\text{зап}}$, %, в случае несрабатывания регулятора на одной из машин
ТГ1	10	9	8,1	14,4	44	17,5
ТГ2	8,8	9	8,1	14,4	63	20
Суммарная мощность	18,8	18	16,2			

Зная новую выработку активной мощности, мы можем определить возможную выработку генераторами реактивной мощности с целью ликвидации ее дефицита в узле с учетом нагрузочной диаграммы мощностей.

При расчете учитывали несовершенство систем охлаждения обмотки возбуждения, а также возможность отказа одного из регуляторов. В исходном режиме было принято, что поддерживается номинальное напряжение. Очевидно, что при заданной нагрузке, если все генераторы работают, небаланс мощностей будет успешно ликвидирован.

В случае если снижение напряжения в нормальном режиме параллельной работы с энергосистемой составит 10 %, с целью поддержания номинального напряжения уставки необходимо увеличить. Выход на раздельную работу может произойти с повышением напряжения, так как узел избыточный. В противном случае, если при параллельной работе напряжение от мощной энергосистемы было повышено, выход на раздельную работу при коррекции уставок может привести к снижению статической устойчивости. Поэтому при раздельной работе может потребоваться коррекция напряжения уставок вплоть до необходимости группового регулирования.

Таким образом, существующие системы регулирования возбуждения заводских генераторов при выходе на островные режимы работы могут требовать соответствующей коррекции уставок регуляторов возбуждения, причем предпочтительный закон АРВ при раздельной работе может отличаться от принятого закона при параллельной вплоть до группового регулирования.

Литература

1. **Темгеньевская Т.В.** Методы настройки автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* 2017. № 3. С. 84—94. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.3(55).
2. **Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен В.Х.** Координация настроек автоматических регуляторов паротурбинной установки распределенной генерации // *Вестник Иркутского государственного технического университета. Энергетика.* 2020. № 24. С. 112—122. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-112-122>.
3. **Поляхов Н.Д., Ха Ань Туан.** Адаптивное управление синхронным генератором на основе безынерционного параметрического алгоритма // *Электричество.* 2014. № 12. С. 47—54.
4. **Attikas R., Tammoja H.** Excitation System Models of Generators of Balti and Eesti Power Plants // *Estonian Academy Publishers.* 2007. No 2. P. 285—295.
5. **Choucha A., Chaib L., Arif S.** Robust control design of PSS for dynamic stability enhancement of power system // *J. Electrical Systems.* 2017. 13-2. P. 376—386.
6. **Xiufeng Shi, Shiguang Mu.** Research on Measures to Improve Stability of the Power System // *Applied Mechanics and Materials.* 2015. V. 742. P. 648—652.
7. **Robust** Tuning of Modern Power System Stabilizers Using Bacterial Foraging Algorithm / B. Sumanbabu, S. Mishra, B.K. Panigrahi, G.K. Venayagamoorthy // *EEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2007), 2007.* P. 2317—2324.

8. **Jeevanandham A., Thanushkodi K.G.** Robust Design of Decentralized Power System Stabilizers using Meta-heuristic Optimization Techniques for Multimachine Systems // Serbian journal of electrical engineering. 2009. No 1. P. 89—103.
9. **Николаев А.А., Даниленко А.С., Ложкин И.А.** Исследование различных типов стабилизаторов PSS, используемых в системах автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2018. Т. 5. № 1. С. 3—10. DOI: 10.24892/RIJEE/20180101
10. **Зеленохат О.Н.** Разработка алгоритмов управления возбуждением синхронных генераторов для демпфирования качаний их роторов после больших возмущений в электроэнергетической системе: дис. ... канд. техн. наук. 05.14.02. Москва, 2007.
11. **Гуриков О.В.** Методика выбора параметров настройки системных стабилизаторов микропроцессорных автоматических регуляторов возбуждения, работающих в энергообъединениях сложной структуры: дис. ... канд. техн. наук. 05.09.03. Санкт-Петербург, 2020.
12. **Гашимов А.М., Рахманов Н.Р., Зейналов А.Д.** Демпфирование электромеханических колебаний в многомашинной энергосистеме с разнотипными регуляторами возбуждения // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2011. № 1. С. 30—39.
13. **Канафеев Р.И., Жирнов А.Д., Климова Т.Г.** Оптимальная настройка автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов // Проблемы энергетики. 2016. № 11. С. 77—83.
14. **Канафеев Р.И., Жирнов А.Д., Климова Т.Г.** Анализ результатов оптимальной настройки автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов в программно-аппаратном комплексе RTDS // ЭнергоStyle. 2016.
15. **Оценка** эффективности использования распределенной генерации в сетях Республики Ирак методом имитационного моделирования / В.И. Пантелеев, М.А. Авербух, Е.В. Жилин, М.В. Абдулвахаб // Промышленная энергетика. 2020. № 5. С. 50—57.
16. **Илюшин П.В., Куликов А.Л.** Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией: монография. Н.Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. 364 с.
17. **Илюшин П.В.** Совершенствование противоаварийного и режимного управления энергорайонов с распределенной генерацией: дис. ... д-ра. техн. наук. 05.14.02. Санкт-Петербург, 2019.
18. **Коган Ф.Л.** Особенности сильного регулирования возбуждения синхронных генераторов в сложной энергосистеме // Электрические станции. 2019. № 7. С. 27—35.
19. **Коган Ф.Л.** Повышение эффективности стабилизации режима при возмущениях в энергосистеме // Электричество. 2020. № 5. С. 4—11.
20. **Паздерин А.В., Солодянкин С.А.** Оценка эффективности применения устройств ГСППТ для повышения уровня динамической устойчивости газотурбинной электростанции // Промышленная энергетика. 2020. № 5. С. 12—17.

21. **Калентионок Е.В., Филипчик Ю.Д.** Управление реактивной мощностью генераторов электростанций для повышения устойчивости электроэнергетических систем // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2009. № 6. С. 23—30.
22. **Юрганов А.А., Кожевников В.А.** Регулирование возбуждения синхронных генераторов. СПб.: Наука, 1996. 138 с.
23. **Гусев А.С.** Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем: дис. ... канд. техн. наук. 05.14.02. Томск, 2008.
24. **Моделирование** электротехнических комплексов металлургических предприятий / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, А.А. Мурзинов // Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2012. 239 с.
25. **Средства** и перспективы управления реактивной мощностью крупного металлургического предприятия / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, А.Ю. Коваленко, Е.А. Кузнецов // Электротехника. 2008. № 5. С. 25—32.
26. **Sokolov A.P., Gazizova O.V.** Improving the Accuracy Mathematical Modeling of Transients Emergency Mode Industrial Facilities Distributed Generation. // 2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation, RPA 2018. P. 1—15. doi: 10.1109/RPA.2018.8537190.
27. **Gazizova O.V., Kondrashova Y.N., Sokolov A.P.** Analysis of Short Circuit Transients with Separate Operation of Iron and Steel Industry Power Plant with Account of Dynamic Characteristics of Industrial Load // Proceedings — 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019. P. 7—12.
28. **Kondrashova Y.N., Gazizova O.V., Malapheev A.V.** Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability // Proceedia Engineering. 2015. V. 128. P. 759—763.
29. **Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Y.N.** Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015.
30. **Газизова О.В., Кондрашова Ю.Н., Малафеев А.В.** Повышение эффективности управления режимами электростанций промышленного энергоузла за счет прогнозирования статической и динамической устойчивости при изменении конфигурации сети // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 3 (32). С. 27—38.
31. **Sokolov A.P., Gazizova O.V., Kondrashova Y.N.** Study of the Transients with the Loss of Field of the Synchronous Generator in the Industrial Electric Power Station // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019, 2019. P. 012033. doi:10.1088/1757-899X/666/1/012033.

*Е.Н. Соснина, sosnyna@yandex.ru,
Е.В. Крюков, kryukov@nntu.ru,
Д.А. Гусев, goosev00@mail.ru,
НГТУ им. П.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород*

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР ПОТОКА МОЩНОСТИ ДЛЯ АКТИВНО-АДАПТИВНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Обеспечение качества электроэнергии [1] и снижение электрических потерь — важнейшие задачи энергетики как для потребителей, так и для поставщиков электроэнергии (ЭЭ), вариантом решения которых является технология *Smart Grid*, реализующая концепцию полностью интегрированной, саморегулирующейся и самовосстанавливающейся электроэнергетической системы [2]. *Smart Grid* — интеллектуальная электрическая сеть, в которой существует связь между всеми участниками энергетического рынка, направленная на предоставление энергетических услуг, снижение затрат и повышение эффективности, а также на интеграцию распределенных источников энергии, в том числе возобновляемых.

Мировой тенденцией становится переход от централизованной к децентрализованной энергетике [3, 4]. Развитие распределенной генерации также является одной из ключевых задач энергетической стратегии России до 2035 г. [5]. Расширение использования распределенной генерации способствует повышению энергетической безопасности страны, позволяет снизить потери ЭЭ при передаче и повысить надежность электроснабжения потребителей.

Построению децентрализованного типа энергосистемы способствует концепция *MicroSmartgrid (Microgrid)* — локальная интеллектуальная сеть [6]. В отличие от технологии *SmartGrid Microgrid* может представлять собой небольшую сеть, обслуживающую определенную территорию и не подсоединенную к другим сетям. Такая система включает собственные источники генерации и в кризисные ситуации способна взять на себя задачу удовлетворения спроса потребителей. *Microgrid*, как правило, работает при подключении к централизованной сети, но в любой момент может отключиться и работать только за счет собственной генерации. Однако локальная изолированная сеть имеет ряд недостатков (например, слабая прогнозируемость объема выработанной энергии).

Для эффективного использования технологии *Microgrid* предложена концепция энергетического интернета (*TheInternetofEnergy*) [7]. Исследованиями и разработками в направлении создания интернета энергии занимаются ученые всего мира. Так, в Китае ежегодно проводится научная кон-

ференция *IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration*, в рамках которой ученые разных стран представляют свои работы, посвященные слиянию энергетических систем с информационными технологиями и искусственным интеллектом [8]. Рассматриваются вопросы оптимального управления энергопотреблением, проблемы стабильности надежной системы *The Internet of Energy*, разработки технических средств и многие другие. Реализация концепции интернета энергии способствует развитию электроэнергетики и ее переходу на новый технологический уровень [9]. Данная технология направлена на преобразование пассивных электрических сетей в активно-адаптивные, в которых взаимодействие источников, накопителей и потребителей ЭЭ реализуется на основе «горизонтальных» связей и многосторонних сервисов [10, 11].

В отличие от интеллектуальных электрических сетей, направленных на цифровизацию существующей электроэнергетической системы, энергетический интернет является решением проблем по принципу традиционного интернета путем интеграции двунаправленных потоков информации и ЭЭ. Данная концепция позволяет обеспечить обмен ЭЭ между возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), накопителями, активными потребителями и традиционными источниками ЭЭ (ТЭЦ, ГЭС, АЭС и др.), сохраняя преимущества как централизованных (высокая надежность, бесперебойность, поддержание показателей качества (ПКЭ)), так и децентрализованных систем электроснабжения (СЭС) (аккумуляция излишков ЭЭ, самостоятельное регулирование количества ЭЭ). Построение электрических сетей по принципу интернета энергии позволит расширить взаимодействие производителей и потребителей ЭЭ за счет обеспечения свободных перетоков мощности в распределительных электрических сетях среднего напряжения, превратить их в «умные сети» с необходимыми каналами связи и возможностью к саморегулированию.

Для построения и надежной работы энергосистемы по принципу интернета энергии необходимы устройства активно-адаптивного управления потоками мощности, которые являются аналогами интернет-маршрутизаторов и позволяют пользователям взаимодействовать в рамках объединенных групп участников энергетического рынка.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева ведет исследования в данной области. Для решения проблемы управления потоками мощности как по направлению, так и по ее значению, разработан регулятор потоков мощности (РПМ), выполненный на основе тиристорных ключей и вольтодобавочного трансформатора [12]. Разрабатываемая система управления позволяет реализовать интеллектуальный регулятор потоков мощности (ИРПМ).

Структура и модель ИРПМ для распределительных сетей напряжением 6, 10 и 20 кВ. Силовая часть разработанного ИРПМ состоит из тиристорного коммутатора, параллельного (шунтового) и серийного трансформаторов [13]. Первичная обмотка параллельного трансформатора выполняется по схеме «треугольник», за счет чего организуется трехфазная система напряжений, сдвинутых по отношению к фазным напряжениям источника на 90° .

Вторичная обмотка параллельного трансформатора может быть выполнена в виде изолированных фаз с блоком отпаек, центр которого заземлен. Фазы вторичной обмотки параллельного трансформатора через выход переключателя блока отпаек соединяются с первичной обмоткой последовательного трансформатора, которая обычно выполняется по схеме «звезда» с заземленной нейтралью. Вторичная обмотка последовательного трансформатора выполняется в виде изолированных фаз, которые включаются последовательно в рассечку соответствующих по фазе проводов линии и добавляют к вектору напряжения источника сдвинутую по фазе на 90° компоненту. Следовательно, общее напряжение на входе линии становится равным сумме вектора напряжения источника питания и вектора квадратурной составляющей, вносимой РПМ, т.е. изменяет свою фазу. В зависимости от положения переключателя блока отпаек можно изменять амплитуду и полярность вектора квадратурной составляющей и таким образом регулировать угол сдвига между векторами напряжения на входе и выходе линии в функции режима работы линии.

Основным недостатком такого исполнения силовой схемы ИРПМ является вдвое завышенная расчетная мощность трансформаторного оборудования, поскольку энергия передается последовательно через два трансформатора. Отмеченный недостаток устраняется в техническом решении, основанном на применении одного вольтдобавочного трансформатора (ВДТ). Силовая схема предлагаемого варианта ИРПМ для распределительных сетей напряжением 6, 10 и 20 кВ приведена на рис. 1.

Первичные обмотки ВДТ, соединенные в «треугольник», подключены к входным клеммам ИРПМ. На базе вторичных обмоток реализуются модули поперечного и продольного регулирования, включенные последовательно друг другу между входным и выходным клеммами каждой фазы ИРПМ.

Модули поперечного регулирования всех фаз выполняют на тиристорных коммутаторах ТК1—ТК4 по схеме тиристорного регулятора с реверсом вторичной обмотки ВДТ. В зависимости от состояния тиристорных коммутаторов имеется три режима работы модулей: 1) без регулирования; 2) режим опережения; 3) режим запаздывания. При включенных коммутаторах ТК3—ТК4 и выключенных ТК1—ТК2 вторичные обмотки ВДТ ис-

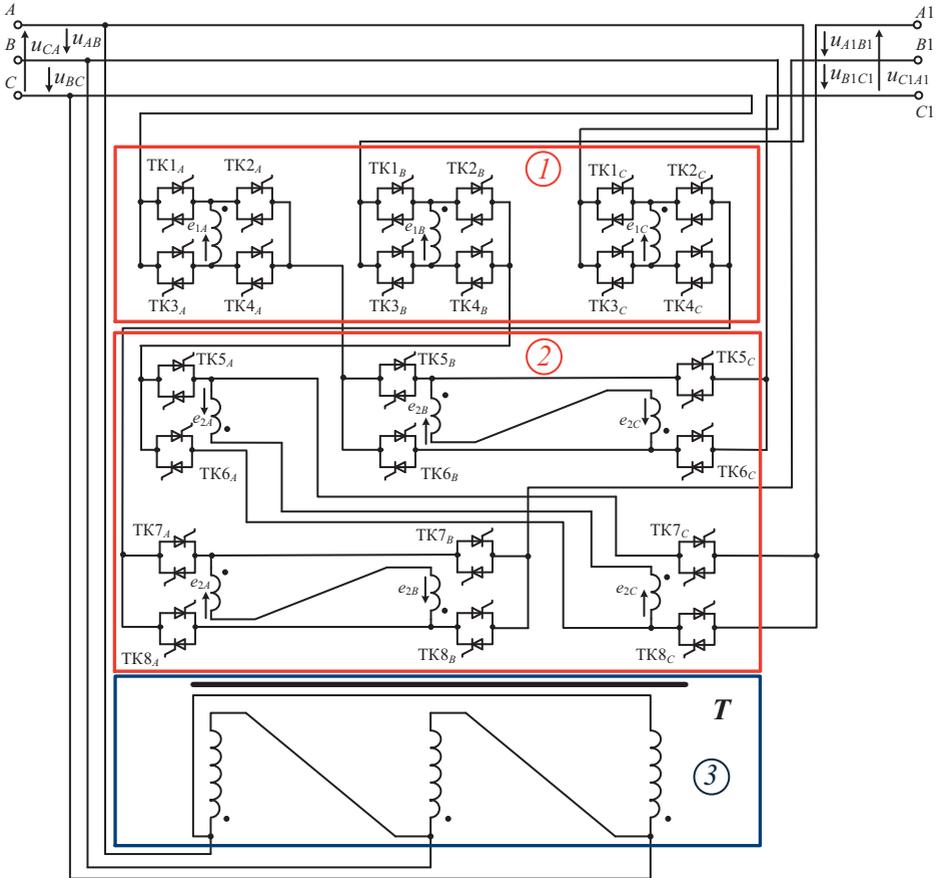


Рис. 1. Регулятор потоков мощности: 1 — модуль поперечного регулирования; 2 — модуль продольного регулирования; 3 — вольтодобавочный трансформатор

ключаются из цепи протекания тока линии, и выходные напряжения равны входным напряжениям:

$$u_{A1B1} = u_{AB}; u_{B1C1} = u_{BC}; u_{C1A1} = u_{CA}.$$

При включенных коммутаторах ТК3 и ТК2 в каждую линию вводятся ЭДС ступени поперечного регулирования (e_1). Следует отметить, что для поперечного регулирования напряжения фазы *A* применяют ЭДС фазы *B* (e_{1B}), находящуюся в противофазе с линейным напряжением. Аналогично для поперечного регулирования напряжений фаз *B* и *C* используют ЭДС

фаз C и A соответственно. Указанные ЭДС находятся в противофазе с входными линейными напряжениями:

$$e_{1A} = -u_{AB}; e_{1B} = -u_{BC}; e_{1C} = -u_{CA}.$$

Анализ работы ИРПМ при поперечном регулировании. При анализе рассматривается включение коммутаторов ТК3 и ТК2. Направление тока (в фазе C) при включенных коммутаторах ТК3 и ТК2 показано на рис. 2. Для фаз A и B направление тока аналогично.

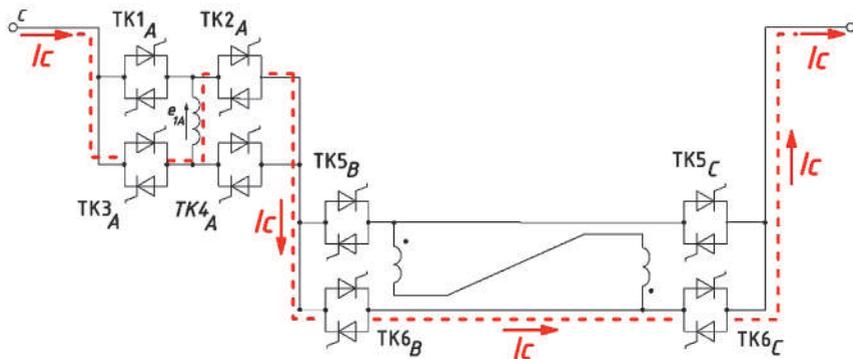


Рис. 2. Направление тока (в фазе C) при включенных коммутаторах ТК3 и ТК2

Векторная диаграмма входных и выходных линейных напряжений для рассматриваемого режима приведена на рис. 3. При включенных коммутаторах ТК3 и ТК2 в линию каждой фазы вводят значения ЭДС ступени поперечного регулирования (e_1).

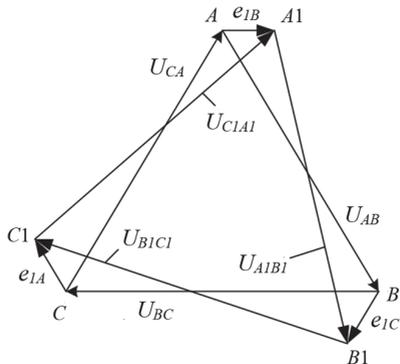


Рис. 3. Векторная диаграмма ИРПМ при поперечном регулировании

Из представленной на рис. 3 диаграммы следует, что введение в линию каждой фазы ЭДС поперечного регулирования e_1 позволяет получить на выходе ИРПМ линейные напряжения, отстающие по фазе относительно входных напряжений на угол α . Разность векторов линейных входных и выходных напряжений можно представить так:

$$\overrightarrow{U_{AB}} - \overrightarrow{U_{A1B1}} = \overrightarrow{e_{1B}} - \overrightarrow{e_{1C}} ;$$

$$\overrightarrow{U_{BC}} - \overrightarrow{U_{B1C1}} = \overrightarrow{e_{1C}} - \overrightarrow{e_{1A}} ;$$

$$\overrightarrow{U_{CA}} - \overrightarrow{U_{C1A1}} = \overrightarrow{e_{1A}} - \overrightarrow{e_{1B}} .$$

Можно показать, что линейные выходные напряжения опережают входные напряжения РПМ на угол α при включенных коммутаторах ТК1, ТК4. При поперечном регулировании увеличиваются линейные напряжения на выходе ИРПМ.

Стабилизация линейных напряжений по значению выполняется модулями продольного регулирования.

Анализ работы РПМ при продольном регулировании. Модули продольного регулирования выполнены на тиристорных коммутаторах ТК5—ТК8 и вторичных обмотках ВДТ, рассчитанных на напряжение $u_2 = e_2$. ЭДС вторичных обмоток находятся в противофазе с входными линейными напряжениями:

$$e_{2A} = -u_{AB}; e_{2B} = -u_{BC}; e_{2C} = -u_{CA}.$$

Тиристорные коммутаторы модулей всех фаз соединены по мостовой схеме. В диагональ каждого моста включены встречно-последовательно соединенные обмотки двух соседних фаз ВДТ. Такое соединение вторичных обмоток позволяет получить систему напряжений, сдвинутых по фазе относительно линейных напряжений на 90° . В зависимости от состояния тиристорных коммутаторов модули продольного регулирования также имеют три режима: 1) без регулирования; 2) режим повышения выходного напряжения; 3) режим понижения выходного напряжения.

При включенных коммутаторах ТК6_A, ТК8_C, ТК6_B, ТК6_C, ТК8_A, ТК8_B вторичные обмотки ВДТ с напряжением $u_2 = e_2$ исключаются из цепи тока линии, и выходные напряжения равны входным напряжениям:

$$u_{A1B1} = u_{AB}; u_{B1C1} = u_{BC}; u_{C1A1} = u_{CA}.$$

При включенных коммутаторах ТК6_A—ТК7_C в линию фазы *A* вводится разность ЭДС ступеней продольного регулирования ($e_{2C} - e_{2A}$). При включенных коммутаторах ТК8_A—ТК7_B и ТК6_B—ТК5_C в линии фаз *B* и *C* вводятся разности ЭДС ($e_{2A} - e_{2B}$) и ($e_{2B} - e_{2C}$).

Направление тока (в фазе C) при включенных коммутаторах ТК6_B и ТК5_C показано на рис. 4. Для фаз A и B направление тока аналогично.

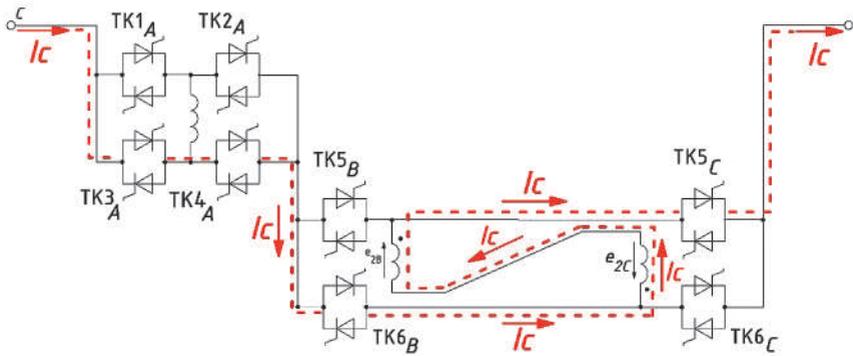


Рис. 4. Направление тока (в фазе C) при включенных коммутаторах ТК6_B и ТК5_C

Векторная диаграмма напряжений рассматриваемого режима приведена на рис. 5 (слева). Из диаграммы следует, что при описанной комбинации включенных коммутаторов выходные напряжения снижаются по сравнению с входными. Разность векторов линейных входных и выходных напряжений можно представить в виде

$$\vec{U}_{AB} - \vec{U}_{A1B1} = (\vec{e}_{2C} - \vec{e}_{2A}) + \vec{e}_{2B};$$

$$\vec{U}_{BC} - \vec{U}_{B1C1} = (\vec{e}_{2A} - \vec{e}_{2B}) + \vec{e}_{2C};$$

$$\vec{U}_{CA} - \vec{U}_{C1A1} = (\vec{e}_{2B} - \vec{e}_{2C}) + \vec{e}_{2A}.$$

При включенных коммутаторах ТК5_A, ТК8_C, ТК5_B, ТК6_C, ТК7_A, ТК8_B выходные напряжения увеличиваются по отношению к входным напряжениям. Векторная диаграмма напряжений РПМ в указанном режиме показана на рис. 5 (справа).

Разность векторов линейных выходных и входных напряжений можно представить:

$$\vec{U}_{A1B1} - \vec{U}_{AB} = (\vec{e}_{2C} - \vec{e}_{2A}) + \vec{e}_{2B};$$

$$\vec{U}_{B1C1} - \vec{U}_{BC} = (\vec{e}_{2A} - \vec{e}_{2B}) + \vec{e}_{2C};$$

$$\vec{U}_{C1A1} - \vec{U}_{CA} = (\vec{e}_{2B} - \vec{e}_{2C}) + \vec{e}_{2A}.$$

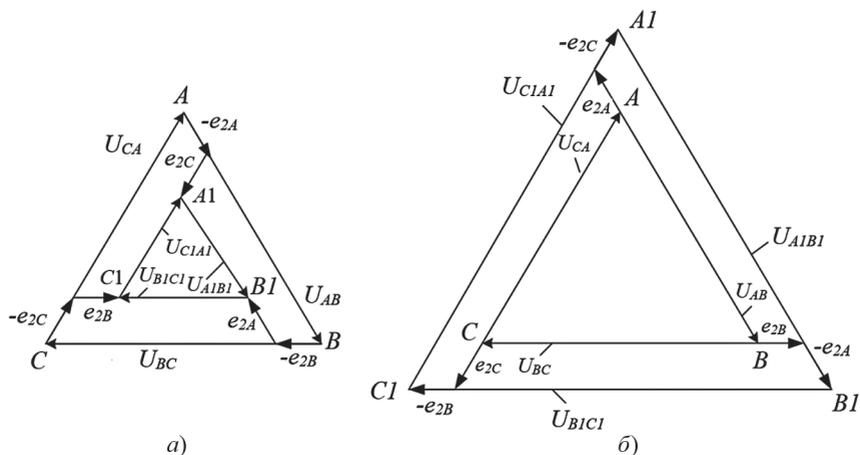


Рис. 5. Векторная диаграмма РПМ при продольном регулировании

Совместное использование модулей продольного и поперечного регулирования позволяет регулировать фазу и значение выходного напряжения ИРПМ. Это дает возможность изменять направление и величину потоков активной и реактивной мощности.

При реализации системы управления целесообразно использовать импульсно-фазовое регулирование между соседними уровнями синусоидальных напряжений обоих модулей. Применение данного способа также позволит переводить ИРПМ в непроводящее состояние и выполнять изменения в конфигурации распределительной сети.

Выводы. Построение электроэнергетических систем по принципу энергетического интернета требует реализации гибкого потокораспределения в сетях с многоконтурной конфигурацией и несколькими источниками питания. Разработанное устройство ИРПМ можно применять как в электрических сетях будущего, работающих по принципу энергетического интернета, так и в существующих электрических сетях среднего напряжения для повышения качества электрической энергии потребителей.

Предложена оптимизация существующей силовой схемы ИРПМ, заключающейся в снижении массогабаритных показателей устройства и потерь ЭЭ в его элементах путем исключения из схемы последовательного (серийного) трансформатора. Дальнейшие исследования направлены на обеспечение надежности и безопасности работы предложенной конфигурации ИРПМ.

Исследование выполнено за счет гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований молодых российских ученых — кандидатов наук МК-270.2022.4 (соглашение № 075-15-2022-734 от 12 мая 2022 г.) и гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00541).

Литература

1. **ГОСТ 32144—2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.
2. **Бухгольц Б.М., Стычински З.А.** Smart Grids — основы и технологии энергосистем будущего. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. 461 с.
3. **Little A.D.** Disruption is now. Report, 05.2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.adlittle.com/en/insights/report/disruption-now> (дата обращения: 04.10.2022).
4. **Смирнов М.** Новая энергетика: возможности и перспективы // Энергетическая политика, 2022]. [Электронный ресурс]. URL: <https://energypolicy.ru/novaya-energetika-vozmozhnosti-i-perspektivy/energetika/2022/16/30/?ysclid=196pou0zsr865558833> (дата обращения 04.10.2022).
5. **Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года.** [Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 года].
6. **Шестернева А.М., Титаренко О.Н., Малюк Е.Г.** Энергосберегающие решения в распределительных электрических сетях с применением интеллектуальных сетей SmartGrid // Энергетические установки и технологии. 2020. [Электронный ресурс]. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44615009_31237618.pdf (дата обращения 04.10.2022).
7. **Caο J., Yang M.** Energy Internet — Towards Smart Grid 2 // 2013 Fourth International Conference on Networking and Distributed Computing (ICNDC), 2013, DOI:10.1109/ICNDC.2013.10.
8. **IEEE 5th Conference** on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2021, DOI: 10.1109/EI252483.2021.9713535.
9. **Hua H., Cao J.** Towards intelligent energy control and optimization in energy Internet: A review // 2019 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI), May 27—31, 2019, Nanjing, China. 2019. P. 573—578. DOI: 10.1109/ICEI.2019.00107.
10. **Наумов В.А., Матисон В.А.** От автоматизированной электроэнергетики к интернету энергии // Энергия единой сети, 2019. № 2 (44). С. 36—44.
11. **Sakib N., Hossain E., Ahamed S.I.** A qualitative study on the United States internet of energy: A step towards computational sustainability // IEEE Access, 2020. No 8. P. 69003—69037. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2986317.
12. **Патент** на полезную модель RU 180964 U1, МПК H03H 7/18 (2006.01). Универсальное фазопоротное устройство для сетей среднего и высокого

напряжения / Е.Н. Соснина, А.А. Асабин, А.А. Кралин, Е.В. Крюков // Заявл. № 2017141949 от 01.12.2017; опубл. 02.07.2018. Бюл. № 19.

13. **Исследование** установившихся режимов работы распределительной электрической сети с тиристорным регулятором напряжения / Е.Н. Соснина, А.А. Кралин, А.А. Асабин, Е.В. Крюков // Промышленная энергетика. 2021. № 12. С. 2—15.

*Р.М. Петрова, 1998renata@mail.ru,
Е.И. Грачева, grachieva.i@bk.ru, КГЭУ, г. Казань*

НАДЕЖНОСТЬ И ПЕРЕГРУЗОЧНАЯ СПОСОБНОСТЬ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Надежность трансформаторов определяется показателями безотказности, долговечности и ремонтпригодности. Интенсивность отказов и время безотказной работы до первого повреждения зависят от качества изготовления и условий эксплуатации. В ряде источников показано, что в пределах наработок до 5 лет интенсивность отказов снижается, а после 8 лет имеет место резкое увеличение вероятности отказов в связи с износом изоляции и элементов, обеспечивающих механическую прочность обмоток.

Прямые поражения воздушных линий, питающих трансформаторы, молниями и индуктированные перенапряжения дают 30—50 % повреждений продольной и главной изоляции трансформаторов. Многократные воздействия волн перенапряжения приводят к накапливающимся разрушениям изоляции в дефектном месте и последующему их пробую. Снижение числа повреждений при грозовых перенапряжениях достигается установкой вентильных разрядников на стороне ВН и НН трансформаторов.

Токи короткого замыкания непосредственно приводят к выходу из строя 15—25 % трансформаторов из-за механического повреждения обмоток и деталей их крепления.

К ускоренному старению изоляции может приводить также длительная эксплуатация при температуре выше 75 °С трансформаторного масла с кислотным числом более 0,4 мг КОН на 1 г, когда на поверхности обмоток и магнитопровода образуется шлам.

Нарушения контактов вводов ВН и НН, выводов переключателей ответвлений и их контактов дают около 15 % повреждений. Они связаны с несовершенством конструкции соединений и ошибками ремонтного и эксплуатационного персонала.

Масло в трансформаторах должно удовлетворять следующим нормам: кислотное число — не более 0,40 мг КОН; реакция водной вытяжки — нейтральная; отсутствие механических примесей; снижение температуры вспышки — не более 5 °С от первоначальной; электрическая прочность для трансформаторов до 15 кВ — не ниже 20 кВ и от 15 до 35 кВ — не ниже 25 кВ.

Интенсивное образование шлама начинается при кислотном числе выше 0,4 мг КОН и температуре выше 75 °С. Если трансформаторы загружены не полностью и температура масла ниже 70 °С, то шламообразование наблюдается лишь местами и в незначительных количествах даже при кислотном числе масла 0,4...0,5 мг КОН.

Допустимые температуры обмоток и масла трансформаторов. Температура нагрева ν какой-либо части трансформатора зависит не только от возникающих в этой части потерь, но и от температуры охлаждающей среды $\nu_{o.c}$ — воздуха. Разность $\nu - \nu_{o.c} = \theta$ составляет превышение температуры данной части трансформатора относительно температуры охлаждающей среды.

Исходными данными, принимаемыми при расчетах номинальных режимов трансформаторов, являются значения температур, приведенные в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Допустимые превышения температуры (перегревы)

Превышение, °С	Обозначение	Значение
Средней по сопротивлению температуры обмотки сверх температуры масла	$\theta_{об.ср.м}$	21
Средней по сопротивлению температуры обмотки сверх температуры воздуха	$\theta_{об.ср}$	65
Средней по объему температуры масла над температурой охлаждающего воздуха	$\theta_{м.ср}$	44
Температуры масла в верхних слоях сверх температуры охлаждающего воздуха	$\theta_{м.мах}$	55
Температуры наиболее нагретой точки обмотки над средней по сопротивлению температурой обмотки	$\theta_{об.мах} - \theta_{об.ср.}$	13
Температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой охлаждающего воздуха	$\theta_{об.мах}$	78

Номинальная температура наиболее нагретой точки обмотки $\nu_{об.мах} = 98$ °С. Номинальная температура средней по сопротивлению температуры обмотки $\nu_{об.ср} = 85$ °С.

В закрытых трансформаторных подстанциях с естественной приточной вентиляцией эквивалентная температура воздуха на 8 °С выше, чем наружного.

Если нагрузка трансформатора отлична от номинальной, то установившиеся (конечные) перегревы θ_k обмоток и масла оцениваются по зависимостям, приведенным на рис. 1 (I — средний перегрев обмотки сверх температуры масла; 2 — средний перегрев масла сверх температуры охлаждающего воздуха; 3 — перегрев масла сверх температуры охлаждающего воздуха; 4 — перегрев наиболее нагретой точки сверх температуры охлаждающего воздуха).

В таблице 2 приведены формулы аппроксимации установившихся перегревов от коэффициента загрузки трансформатора, полученные из рис. 1.

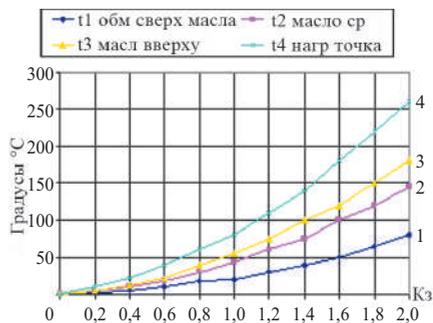


Рис. 1. Зависимость установившихся перегревов θ_k , °С, от загрузки трансформаторов

Т а б л и ц а 2

Зависимости установившихся перегревов от коэффициента загрузки трансформатора

Превышение	Формула для аппроксимации
Средней по сопротивлению температуры обмотки сверх температуры масла	$18,36(K_3)^2 + 2,2 K_3 + 1,2$
Средней по объему температуры масла над температурой охлаждающего воздуха	$29,46(K_3)^2 + 14 K_3 - 0,19$
Температуры масла в верхних слоях сверх температуры охлаждающего воздуха	$34,6(K_3)^2 + 21,6 K_3 - 1,1$
Температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой охлаждающего воздуха	$48,6(K_3)^2 + 33 K_3 - 0,98$

Оценка влияния температуры охлаждающей среды на номинальную мощность трансформатора. При нагрузке трансформатора происходит нагрев его металлических частей (стали сердечника, меди обмотки и т.д.) и изоляции обмоток. Металлические части трансформатора без всяких остаточных деформаций довольно продолжительное время выдер-

живают сравнительно высокие температуры нагрева. Изоляция обмоток при нагреве постоянно изнашивается или, как говорят, стареет. Старение изоляции характеризуется уменьшением ее эластичности и механической прочности. Сильно состарившаяся изоляция становится настолько хрупкой, что под влиянием вибрации и электродинамических усилий, имеющих место при работе трансформатора, может растрескиваться и ломаться.

Из всех частей трансформатора, перечисленных в табл. 1, наибольшее значение имеет обмотка, поскольку ее тепловой режим связан с процессом теплового износа изоляции и тем самым определяет срок службы трансформатора. Работа изоляции и происходящие процессы старения зависят от температуры наиболее нагретой зоны обмотки $\nu_{об.маx}$. Количество выделяющегося в обмотке тепла и средний перегрев обмотки $\nu_{об.ср}$ остается постоянным, но температура обмотки изменяется в соответствии с изменением температуры воздуха.

Если трансформатор установить в климатическом поясе с максимальными температурами, большими, чем $+35^\circ\text{C}$, то ежегодный износ изоляции будет больше, а срок службы изоляции меньше 17...20 лет. В то же время указанный износ изоляции и срок службы можно сохранить и при установке трансформатора в климатическом поясе с повышенной температурой, но при условии, что трансформатор будет нагружен на меньшую мощность, чем допустимую при $+35^\circ\text{C}$.

Следовательно, номинальная мощность трансформатора не является величиной постоянной, а зависит от наивысшей температуры воздуха района, где он устанавливается. Значение номинальной мощности трансформатора при температуре воздуха, отличной от $+35^\circ\text{C}$, $S_{ном \nu}$ определяют пересчетом мощности $S_{ном}$, указанной в паспорте:

$$S_{ном \nu} = S_{ном} \left(1 - 2 \frac{\nu_{о.с \max} - 35}{100} \right). \quad (1)$$

При $\nu_{о.с \max} = 55^\circ\text{C}$ $S_{ном \nu} = 0,6 S_{ном}$.

Зависимости нагревов от меняющейся нагрузки трансформаторов.

Расчеты нагревов обмоток и масла трансформаторов при меняющихся во времени нагрузках основаны на следующей зависимости:

$$\theta_k(t) = \theta_0 e^{-\frac{t}{T_0}} + \theta_k \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right), \quad (2)$$

где $\theta_k(t)$ — перегрев части трансформатора в момент t ; θ_0 — то же, в момент времени $t = 0$; θ_k — конечный перегрев, который установится за $3T_0$, если нагрузка останется неизменной.

Время достижения установившихся перегревов трансформатора определяется теплоемкостью всех входящих в него масс, условиями охлаждения, и характеризуется постоянной времени нагрева T_0 (табл. 3). Постоянная времени нагрева трансформатора мощностью 20 МВА $T_0 = 2,5$ ч. Конечный перегрев наступает, если соответствующая нагрузка существует период, больший $3T_0$, т.е. при длительности $t > 3 \cdot 2,5 = 7,5$ ч. При длительности существования какого-либо значения нагрузки $t = 1$ ч, при $T_0 = 2,5$ ч, $\theta_0 = 30$ °С, перегрев в конце часа меньше установившегося и определяется в соответствии с формулами из табл. 2.

Таблица 3

Постоянная времени нагрева трансформаторов в зависимости от мощности и системы охлаждения

Мощность трансформатора, МВА	Тип охлаждения	Постоянная времени нагрева T_0 , ч
До 0,63	М	2,5
1—6,3	М	3,5
10—32	Д	2,5
40—63	Д	3,5
100—125	ДЦ	2,5
125 и выше	ДЦ	3,5

Температура нагрева обмотки при реальных суточных графиках нагрузки трансформатора 33/11 кВ. В таблице 4 приведено сравнение максимальных фактических перегревов при загрузке трансформаторов 33/11 кВ полной мощностью.

Таблица 4

Сравнение максимальных фактических перегревов при загрузке трансформаторов 33/11 кВ полной мощностью с допустимыми перегревами

Превышение	Обозначение	Мах θ , °С	Доп. θ , °С
Средней по сопротивлению температуры обмотки сверх температуры масла	$\theta_{об.ср.м}$	32	21
Средней по объему температуры масла над температурой охлаждающего воздуха	$\theta_{м.ср}$	38	44
Температуры масла в верхних слоях сверх температуры охлаждающего воздуха	$\theta_{м.мах}$	42	55
Температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой охлаждающего воздуха	$\theta_{об.мах}$	51	78

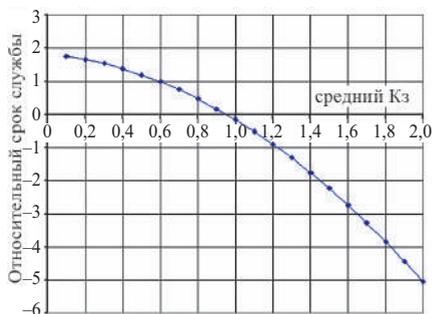


Рис. 2. Зависимость относительного срока службы трансформаторов 33/11 кВ от коэффициента загрузки

зависимость относительного срока службы трансформатора от K_3 (рис. 2).

Из таблицы 4 видно, что максимальные фактические перегревы не превосходят допустимых значений для масла и наиболее нагретой части обмотки, но значительно больше для среднего перегрева обмотки сверх температуры масла. В таблице 5 показан срок службы трансформатора при различных коэффициентах загрузки. Для трансформаторов различной мощности данные можно вывести с помощью интерполяции значений. На основе данных построена

Таблица 5

Срок службы трансформаторов при различных коэффициентах загрузки

Характеристика нагрузки	Коэффициент загрузки трансформатора		Температура нагрева обмотки		Относительный срок службы
	максимальный	средний	максимальная $\nu_{об. max}$	средняя $\nu_{об. ср}$	
Полная мощность	1,2	0,8	102	92	0,34
Компенсация реактивной мощности	1,05	0,72	98	90	0,54
Компенсация реактивной мощности и ограничения потребителей	0,72	0,53	87	86	1,05

Закключение. Трансформаторы проектируются на режим длительно неизменной во времени нагрузки, которая называется номинальной и указывается заводом-изготовителем для отсчета от нее отклонений при эксплуатации и испытаниях. Превышение номинального значения является перегрузкой. Для трансформаторов, включая комплектующие изделия, допускаются аварийные и систематические перегрузки в зависимости от графиков нагрузки и температуры охлаждающей среды.

Значение систематических перегрузок определяется двумя условиями:

- 1) тепловой износ изоляции при меняющейся нагрузке должен быть таким же, как и при длительной неизменной температуре обмотки в наиболее нагретой точке 98 °С;

2) наибольшая температура масла в верхних слоях и наиболее нагретой точке обмотки в течение переходного суточного процесса нагрева не выше 95 и 140 °С соответственно.

ГОСТ нормирует температурные условия, при которых трансформатор может работать непрерывно в течение всего срока службы: температура окружающей среды равна 20 °С; превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки над средней температурой обмотки равна 13 °С.

Кратковременные перегрузки по критерию температуры являются аварийными. Они определяются из следующих условий: перед перегрузкой трансформатор находился в номинальном режиме; перегрузка снимается, когда температура наиболее нагретой точки достигает 140 °С.

Температура в 140 °С значительно превышает номинальную, но кратковременно может быть допущена. Превышение этой температуры нежелательно ввиду ее близости к температуре воспламенения паров масла.

Допускаемые систематические перегрузки трансформаторов определяются в зависимости от характеристик графика нагрузки и эквивалентных годовых температур окружающей среды. Также учитывается длительность систематической перегрузки: 1, 2, 4, 6 ч. Коэффициент систематической перегрузки $k_{с.п}$ изменяется в пределах 1,1—1,5.

Аварийные перегрузки допускаются в исключительных случаях, например при выходе из строя одного из работающих трансформаторов. Согласно ГОСТ, трансформаторы для КТП должны допускать аварийные перегрузки на 30 % сверх номинального тока не более чем 3 часа в сутки, если длительная предварительная нагрузка составляла не более 70 % номинального тока трансформатора.

Литература

1. **Electric drive control systems with neural network technologies** / A. Sinyukov, T. Sinyukova, E. Gracheva et al. // 2022 4th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), 2022, pp. 238—243, doi: 10.1109/GPECOM55404.2022.9815752.
2. **Gracheva E., Gorlov A., Alimova A.** Features of Structure of Electric Supply Systems of Industrial Enterprises // 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 2020, pp. 910—913, doi: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280798.
3. **Gracheva E., Gorlov A., Alimova A.** Research Resistance Contact Connections of the Low Voltage Switching Equipment and the Network Equivalent Resistance // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2020, pp. 232—237, doi: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208208.
4. **Gracheva E.I., Naumov O.V., Gorlov A.N.** Simulation of Laws Change in Technical Characteristics of Circuit Breakers of Various Manufacturers // 2021

- International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), 2021, pp. 404—406, doi: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657222.
5. **Petrov T.I., Safin A.R.** Theoretical aspects of optimization synchronous machine rotors // E3S Web of Conferences. 2020. 178. 01049. 10.1051/e3sconf/202017801049.
 6. **Petrov T.I., Kornilov V.Yu., Safin A.R.** Changing the design of a synchronous motor after testing // E3S Web of Conferences. 2020. 220. 01030. 10.1051/e3sconf/202022001030.
 7. **Petrov T.I., Kornilov V.Yu., Safin A.R.** The use of a digital controller in the loading system of the test bench to improve the accuracy of simulating the modes of oil pumping units // E3S Web of Conferences. 2020. 220. 01072. 10.1051/e3sconf/202022001072.

*А.Р. Петров, petroval13@mail.ru,
Е.И. Грачева, grachieva.i@bk.ru, КГЭУ, г. Казань*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ НА ПРИМЕРЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

В современных условиях для работы электротехнических комплексов требуется, с одной стороны, увеличение производства электроэнергии и, с другой стороны, ужесточение контроля за эффективностью использования электроэнергии [1]. Потери электроэнергии при рассмотрении процессов производства и потребления являются составной частью общего расхода электроэнергии. Поэтому исследование и анализ потерь мощности и электроэнергии в элементах внутрицехового электроснабжения имеют те же технико-экономические принципы, что и анализ полезно потребленной электроэнергии.

Величина потерь мощности и электроэнергии значительно влияет на эффективность эксплуатации электрических сетей. Стоимость потерь является составной частью как общей расчетной стоимости (приведенных затрат), так и составной частью себестоимости (годовых эксплуатационных расходов) процессов передачи и распределения электроэнергии. При этом доля потерь в общей стоимости процесса передачи электроэнергии имеет значительную величину (35—45 %), поэтому для энергоэффективной эксплуатации систем внутризаводского электроснабжения требуется поддерживать рациональное соотношение между стоимостью потерь и стоимостью общего расхода электроэнергии.

В настоящее время изменяются требования к учету потерь мощности и электроэнергии во внутрицеховых системах электроснабжения. Это об-

условлено сложностью определения параметрических и режимных данных таких систем. Достоверность информации об элементах электрооборудования значительно повышает энергоэффективность эксплуатации систем электроснабжения [6].

Материалы и методы. В промышленных электротехнических комплексах существуют две тенденции: с одной стороны, увеличение расхода электроэнергии, а с другой — его уменьшения. Например, применение автоматизации производственных процессов или замена в технологических циклах пара на электроэнергию способствуют росту электропотребления. А применение «умных сетей», «интеллектуальных счетчиков», энергосберегающих технологий способствует уменьшению расхода электроэнергии. При этом актуальным становится применение новых подходов к поиску резервов экономии электроэнергии на основе повышения достоверности информации о потерях мощности и электроэнергии в элементах систем внутрицехового электроснабжения.

К структуре и оборудованию внутрицехового электроснабжения предъявляются требования как энергоэффективности, так и максимальной экономичности. Большое значение приобретает разработка алгоритмов оценки технических параметров низковольтного электрооборудования. Везде, где это возможно, следует применять методы прямого поиска оптимума. В основу решения поставленных задач должны быть положены аналитические зависимости между приведенными затратами на электроснабжение и передаваемой мощностью. Для рационального регулирования режимов необходимо повышение точности прогнозирования электропотребления с выявлением основных факторов, определяющих величину расхода электроэнергии с учетом потерь во всех элементах системы электроснабжения.

Топология внутрицеховых низковольтных сетей промышленного электроснабжения характеризуется существенными протяженностью и разветвленностью, значительным количеством коммутационной аппаратуры низкого напряжения [2]. Поэтому для анализа потерь мощности и электроэнергии необходимы данные о величине потерь в контактных соединениях низковольтных электрических аппаратов.

Основными факторами, определяющими величину потерь мощности в низковольтных коммутационных аппаратах, можно считать следующие:

- величина номинального тока электрического аппарата, A ;
- формы и размеры контактов, определяемые номинальным током, структурой контактных групп, ресурсом аппарата и числом циклов включения-отключения;
- материал контактных деталей;
- сечения токопроводящих частей аппарата.

Рассмотрим автоматические выключатели (АВ) в литом корпусе, пользующиеся наибольшей популярностью на отечественном рынке электрооборудования. Это коммутационные аппараты, предназначенные для проведения тока в нормальном режиме, защиты оборудования и силовой цепи при возникновении перегрузки или короткого замыкания [3].

В таблице 1 для примера представлены основные технические каталожные данные АВ, выпускаемых Курским электроаппаратным заводом, Schneider Electric, Legrand, ABB. Анализ показал, что основные технические параметры исследуемых АВ имеют близкие значения, однако следует отметить, что выключатели серии ВА57-31 имеют наименьшее значение потерь мощности на полюс — 7,5 Вт.

Таблица 1

Основные технические каталожные данные АВ

Тип и завод-изготовитель	Значение потерь активной мощности на полюс, Вт	Коммутационная износостойкость, циклов	Механическая износостойкость, циклов	Габаритные размеры (Ш×В×Г), мм	$I_{\text{НОМ}}$, А	$U_{\text{НОМ}}$, В
Российские						
ВА57-31 (Курский электроаппаратный завод)	7,5	10 000	16 000	75×125×117	100	690 АС
Зарубежные						
NSX100 TM-D (Schneider Electric)	8,8	10 000	50 000	140×160×86	100	690 АС
DPX ³ 160 с термомангнитным расцепителем (Legrand)	7,8	8000	25 000	81×115×100	100	690 АС
Tmax XT1 TMD (ABB)	10	8000	25 000	76,2×130×70	100	690 АС

В зависимости от номинального тока аппарата его потери мощности будут различными. По каталожным данным построим зависимости потерь мощности от номинального тока I (рис. 1) для автоматических выключателей (ВА57-31, NSX100 TM-D, DPX³ 160, Tmax XT1 TMD).

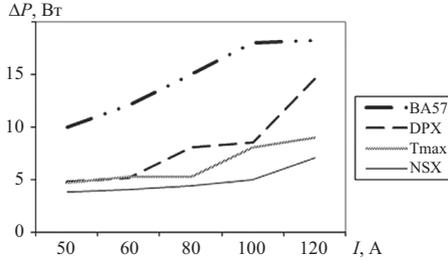


Рис. 1. Графики зависимостей потерь активной мощности в функции номинального тока АВ

Аппроксимируем полученные графические зависимости величины потерь мощности в функции номинального тока [4].

$$F_{1BA}(I) = -1,95 + 0,28I - 7,4 \cdot 10^{-4} I^2; \quad (1)$$

$$F_{2BA}(I) = 20,26 - 37,95e^{-0,025I}; \quad (2)$$

$$F_{3BA}(I) = -4,12 + 143,98e^{-0,1I} - 8,4 \cdot 10^{-4} I^2 + 0,31I, \quad (3)$$

где $F_{1BA}(I)$, $F_{2BA}(I)$, $F_{3BA}(I)$ — различные функциональные зависимости значений потерь активной мощности в автомате ВА-57 от величины номинального тока; I — величина номинального тока ВА-57.

Аналогично получим аппроксимирующие функции для других автоматических выключателей и сведем их в табл. 2. Графические зависимости для различных АВ показаны на рис. 2—5.

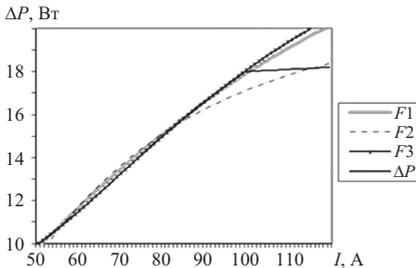


Рис. 2. Графические функциональные аппроксимирующие характеристики $\Delta P = F(I_{ном})$ для ВА57-31

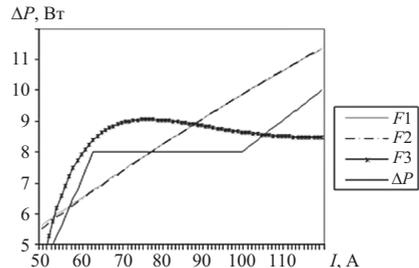


Рис. 3. Графические функциональные аппроксимирующие характеристики $\Delta P = F(I_{ном})$ для NSX100

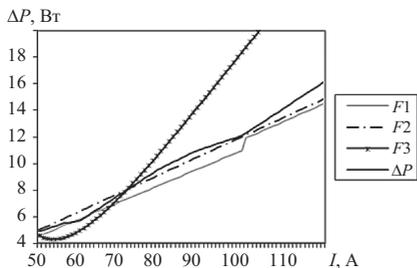


Рис. 4. Графические функциональные аппроксимирующие характеристики $\Delta P = F(I_{\text{ном}})$ для DPX3 160

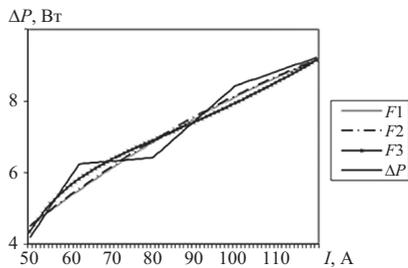


Рис. 5. Графические функциональные аппроксимирующие характеристики для $\Delta P = F(I_{\text{ном}})$ Tmax XT1

Определим среднеквадратическое отклонение полученных функций от паспортных данных по выражению

$$S = \sqrt{\sum (F(I_i) - \Delta P_i)^2}. \quad (14)$$

Результаты также сведем в табл. 2 для выбора наилучшей аппроксимирующей функции. Таким образом, определены зависимости изменения потерь мощности на полюс от номинального тока — это аппроксимирующие функции, имеющие наименьшее среднеквадратическое отклонение [5]. На рисунке 6 приведены графики изменения потерь мощности для автоматических выключателей с нагрузкой по току $0,5I_{\text{ном}}$.

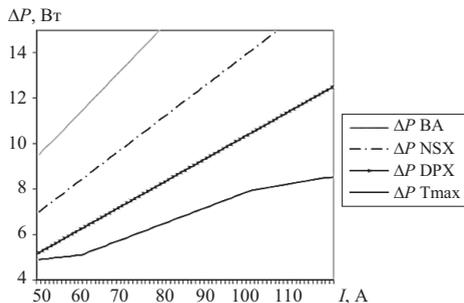


Рис. 6. Графические функциональные характеристики $\Delta P = F(I_{\text{ном}})$ для автоматов серии BA57-31, NSX100 TM-D, DPX3 160, Tmax XT1 TMD

Аппроксимирующие функции

Вид функции аппроксимации	S
BA57-31	
$F_{1BA}(I) = -1,95 + 0,28I - 7,4 \cdot 10^{-4} I^2$	0,38
$F_{2BA}(I) = 20,26 - 37,95e^{-0,025I}$	0,14
$F_{3BA}(I) = -4,12 + 143,98e^{-0,1I} - 8,4 \cdot 10^{-4} I^2 + 0,31I$	1,15
NSX100 TM-D	
$F_{1NSX}(I) = 0,78 + 0,11I - 1,23 \cdot 10^{-4} I^2$	2,65
$F_{2NSX}(I) = 29,42 - 29,18e^{-4,001 \cdot 10^{(-3)}I}$	0,37
$F_{3NSX}(I) = 17 - 1067e^{-0,1I} + 5,97 \cdot 10^{-4} I^2 + 0,14I$	2,63
DPX ³ 160	
$F_{1DPX}(I) = 7,46 - 0,13I + 0,15 \cdot 10^{-4} I^2$	1,46
$F_{2DPX}(I) = 2,23 \cdot 10^6 - 2,23 \cdot 10^6 e^{-6,298 \cdot 10^{(-8)}I}$	1,16
$F_{3DPX}(I) = 20,37 - 516,21e^{-0,1I} + 0,28 \cdot 10^{-4} I^2 + 0,39I$	7,76
Tmax XT1 TMD	
$F_{1Tmax}(I) = -0,55 + 0,12I - 2,95 \cdot 10^{-4} I^2$	0,81
$F_{2Tmax}(I) = 13,97 - 15,34e^{-9,692 \cdot 10^{(-3)}I}$	0,69
$F_{3Tmax}(I) = 5,48 - 241,05e^{-0,1I} + 2,94 \cdot 10^{-4} I^2 + 4,65 \cdot 10^{-3} I$	0,80

Заключение. В представленной статье проведено исследование зависимостей величины потерь активной мощности в автоматических выключателях от основных параметров оборудования. Сравнительный анализ технических характеристик автоматов BA57-31, NSX100 TM-D, DPX³ 160, Tmax XT1 TMD показал, что их основные параметры имеют близкие значения, однако имеются различия в величинах потерь активной мощности на полюс аппарата.

Для исследуемых автоматических выключателей производителей низковольтной аппаратуры — Курского электроаппаратного завода, Schneider

Electric, Legrand и ABB в соответствии с паспортными данными разработаны функциональные зависимости активных потерь от номинального тока $\Delta P = F(I_{\text{ном}})$. Подобраны аппроксимирующие функции данных характеристик и вычислена величина среднеквадратических отклонений полученных функций от паспортной величины активных потерь. Смоделированы зависимости изменения потерь мощности в автоматических выключателях от номинального тока — это аппроксимирующие функции, имеющие наименьшее среднеквадратическое отклонение. Проведенные исследования показали, что с учетом потерь активной мощности наиболее энергоэффективными являются аппараты серии ВА57-31.

Литература

1. **Власюк И.В., Парамонов С.Ю., Белов С.И.** Повышение эксплуатационной надежности автоматических выключателей в сетях напряжением 0,4 кВ, используемых в агропромышленном комплексе // Международный технико-экономический журнал. 2018. № 1. С. 51—58.
2. **Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М.** Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутризаводского электроснабжения // Проблемы энергетики. 2020. № 2. С. 65—74.
3. **Алгоритмы** и вероятностные модели параметров функционирования внутризаводского электроснабжения / Е.И. Грачева, О.В. Наумов, А.Н. Горлов, З.М. Шакурова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 1. С. 93—104. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-93-104.
4. **Грачева Е.И., Наумов О.В.** Потери электроэнергии и эффективность функционирования оборудования цеховых сетей: монография. М.: РУСАЙНС, 2017. 168 с.
5. **Зорин В.В., Буйный Р.А., Перепеченый В.А.** Модели и методы расчета и оценки потерь мощности и электрической энергии в распределительных сетях 0,38 кВ // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2015. № 5 (136). С. 19—27.
6. **Хорольский В.Я., Таранов М.А.** Надежность электроснабжения. Ростов-на-Дону: Терра Принт, 2017.

МЕТРИКА И УЛЬТРАМЕТРИКА ПРОСТРАНСТВА СОПРОТИВЛЕНИЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Профессор Кудрин Б.И. в устных выступлениях, научных статьях и монографиях неоднократно утверждал, что в системе электроснабжения промышленного предприятия (электрическом техноценозе) не выполняется закон Ома. При этом, кроме общенаучных положений, опирающихся на третью научную картину мира, количественные выкладки на эту тему найти в его работах достаточно сложно [1]. Попытаемся отыскать такие основания, которые позволяют сделать вышеприведенное утверждение профессора Б.И. Кудрина очевидным.

На рисунке 1 приведена структура иерархической многоуровневой системы электроснабжения промышленного предприятия 1УР—5УР и ее модель в виде 2-адического числа. В общем случае система электроснабжения промышленного предприятия может иметь шесть уровней 1УР—6УР. К ним относят: уровень приемников низкого напряжения (1УР), уровень цеховых распределительных щитов и распределительных пунктов, щитов управления и силовых шкафов (2УР), уровень распределительных устройств трансформаторных подстанций (3УР), уровень высоковольтных распределительных устройств, шины распределительных подстанций (4УР), уровень шин главных понизительных подстанций (5УР), уровень границы раздела промышленного предприятия и энергоснабжающей организации (6УР). В этой системе на различных уровнях могут быть использованы стандартные номинальные напряжения трехфазного тока частотой 50 Гц, измеряемые в кВ: 0,22; 0,38; 0,66; 6; 10; 20; 35; 110; 220.

Передачу электрической энергии к электрическим приемникам осуществляют при помощи кабелей, проводов, и шнуров. Медные и алюминиевые жилы, предназначенные для кабелей и проводов неподвижной прокладки, подразделяют на классы I—III, а для кабелей проводов и шнуров подвижной прокладки — классы IV—VI. В качестве примера приведем сведения, характеризующие токопроводящие медные жилы кабелей, проводов и шнуров: номинальные сечения, измеряемые в мм² и электрические сопротивления 1 км круглых медных луженых одножильных жил соответствующего сечения кабелей класса II, проводов и шнуров при температуре 20 °С, Ом, указанные в скобках: 0,75 (24,7); 1 (21,2); 1,5 (13,6); 2,5 (7,6); 4 (7,41); 6 (3,05); 10 (1,81); 16 (1,14); 25 (0,719); 35 (0,519);

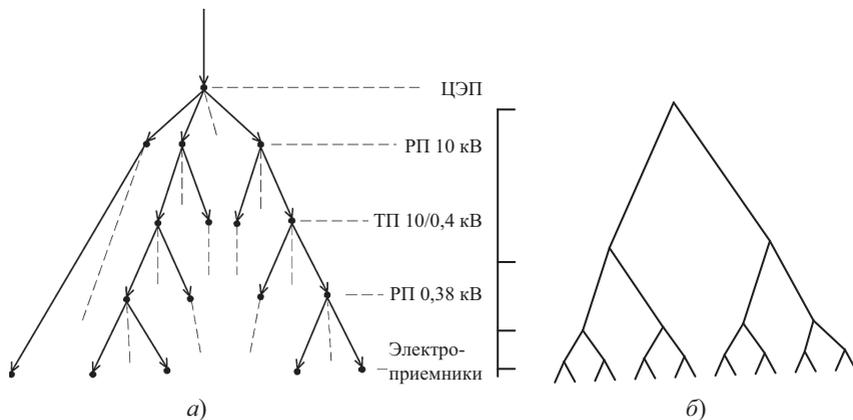


Рис. 1. Структура иерархической системы промышленного предприятия 1УР—5УР, ее модель в виде 2-адического числа: *а* — дерево-схема системы электроснабжения промышленного предприятия; *б* — схема целого 2-адического числа

50 (0,383); 70 (0,265); 95 (0,191); 120 (0,154); 150 (0,23); 185 (0,098); 240 (0,0747) [2].

Построим ранжированные графики стандартных напряжений и сопротивлений для стандартных сечений 6, 10, 16, 25, 35, 50, 70 мм² (рис. 2). Видно, что они имеют степенной вид.

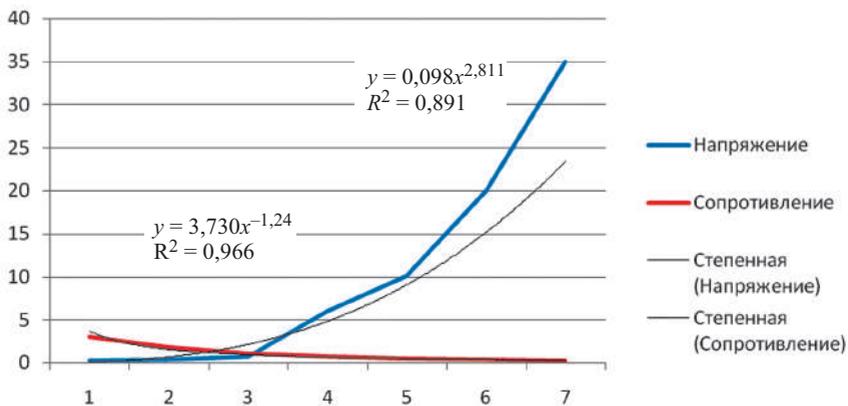


Рис. 2. Ранжированные графики напряжений (в диапазоне 0,22...35 кВ) и сопротивлений (в диапазоне сопротивлений 3,05... 1,14 Ом для сечений 6...70 мм²), их аппроксимации и выражения трендов

На основе графиков запишем выражения для тока:

$$I = U^n \rho^{-s} \rightarrow I^n = U \rho^{-\frac{s}{n}}. \quad (1)$$

Здесь принято, что сопротивления в системе электроснабжения соединены последовательно. Если считать, что сопротивление является расстоянием между любыми двумя точками пространства x, y , между которыми определено напряжение (разность потенциалов), то оно должно удовлетворять условиям функции-метрики $\rho(x, y)$: 1) положительности; 2) симметрии; 3) треугольника.

При $s = n = 1$ для этой формулы:

- 1) $\rho(x, y) = 0$ тогда и только тогда, когда $x = y$;
- 2) $\rho(x, y) = \rho(y, x)$;
- 3) $\rho(x, y) = \rho(x, z) + \rho(z, y)$.

Из этих условий следует, что закон Ома выполняется на обычном метрическом пространстве.

При $sn^{-1} \rightarrow \max$ первые два условия метрики остаются прежними, а третье условие трансформируется в условие усиленного треугольника, а именно: его получают в виде $\rho(x, y) \leq \max(\rho(x, z), \rho(z, y))$. Доказательство этого положения приведено в [3]. Усиленный треугольник является треугольником равнобедренным, основание которого не превосходит его стороны. Метрическое пространство, отвечающее условию усиленного треугольника, называют ультраметрическим пространством.

Очевидно, что закон Ома в традиционной форме не выполняется на ультраметрическом пространстве или, несколько иначе, закон Ома не выполняется на метрическом пространстве, если напряжение и сопротивление имеют степенное распределение.

Свойства ультраметрического пространства не отвечают традиционной интуиции. Эти свойства могут быть интерпретированы при помощи геометрических шаров. В ультраметрическом пространстве любая точка шара является его центром. Если два шара имеют общую точку, то один шар находится в другом. Шары, не имеющие общих точек, не пересекаются. Шар может иметь бесконечное число радиусов. Шар ультраметрического пространства одновременно является открытым и замкнутым; при взгляде изнутри он открыт, при взгляде снаружи — замкнут.

Ультраметрическое пространство — это пространство иерархической структуры. Оно не является архимедовым, т.е. в нем не выполняется ак-

сиома Архимеда. Это значит, что в нем есть расстояния, которые невозможно измерить при помощи других расстояний. Практическое значение свойства неархимедовости минимально, однако неархимедов анализ имеет большое значение. Его приложения имеют место в тех отраслях знаний и практики, которые могут быть структурированы иерархически и описаны p -адическими числами. Такие свойства имеют ценозы, обладающие свойствами фрактальности и негауссовости [4]. Основная характеристика фракталов есть самоподобие, негауссовость тесно связана с безграничной делимостью пространства.

Выделение метрики и ультраметрики позволяет рассчитывать количество электропотребления крупного цеха через его составляющие с учетом степенной структуры этого потребления [5]. Совместное рассмотрение метрики и ультраметрики базируется на природной двойственности явлений нашего мира, воплощенной в числовой асимметрии [6].

Литература

1. **Кудрин Б.И.** Математика ценозов: видовое, ранговидовое, ранговое по параметру гиперболические H -распределения и законы Лотки, Ципфа, Парето, Мандельброта / В кн.: Б.И. Кудрин: Философские основания технетики. Вып. 19. «Ценологические исследования». М.: Центр системных исследований, 2002. С. 357—412.
2. **Белоруссов Н.И., Саакян А.Е., Яковлева А.И.** Электрические кабели, провода и шнуры; под общ. ред. Н.И. Белоруссова. — 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1979. 416 с.
3. **Гвишиани А.Д., Гурвич В.А.** Метрические и ультраметрические пространства сопротивлений // УМН. 1987. Т. 42. Вып. 6 (258). С. 187—188.
4. **Хорьков С.А., Маврикиди Ф.И.** Ценозы, системы и их модели: монография. Ижевск: Издательский центр «Удмуртский университет», 2021. 92 с.
5. **Хорьков С.А.** Проблема расчета электропотребления многономенклатурного цеха промышленного предприятия, модели и методики для ее решения: монография. Ижевск: Изд-во ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2019. 128 с.
6. **Маврикиди Ф. И.** Числовая асимметрия в прикладной математике. Фракталы, p -адические числа, апории Зенона, сложные системы. М.: Дельфис, 2015. 416 с.

*В.В. Черепанов, cherepanov@vyatsu.ru,
А.К. Торопова, usr22264@vyatsu.ru,
ВятГУ, г. Киров*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ГЛАВНОГО ПРИВОДА ЛУЩИЛЬНОГО СТАНКА

Главные приводы механизмов фанерного производства работают в повторно-кратковременном режиме. Выбор мощности двигателей осуществляется на основании детерминированных нагрузочных диаграмм, которые рассчитываются аналитически для характерных циклов работы. Электрические нагрузки, найденные с помощью этих диаграмм, используются для выбора оборудования электрических сетей, питающих производство.

Вместе с тем главные приводы механизмов испытывают воздействия случайных факторов, к ним относятся: вкрапления сучков, случайные изменения скорости подачи заготовок, изменения плотности древесины и др. Влияние случайных факторов на нагрузку электродвигателей может быть существенным. Поэтому расчетные нагрузочные диаграммы должны быть уточнены статистическими данными, а в расчетах рекомендуется использовать вместо детерминированных диаграмм статистические нагрузочные диаграммы [1].

Анализ литературы показал, что статистические нагрузочные диаграммы электроприводов фанерного производства мало изучены [2]. В связи с этим нами выполнены исследования статистических нагрузочных диаграмм главного привода лущильного станка. При этом исследовался и вопрос электромагнитной совместимости станка с питающей его электрической сетью.

Экспериментальная часть. Исследование электрических нагрузок проводилось на действующем фанерном предприятии Кировской области. Объектом экспериментального исследования выступал наиболее распространенный четырехфутовый лущильный станок. Данный агрегат позволяет получить лущильный шпон — тонкую поперечную стружку из заранее обработанных и подготовленных бревен — чураков [3]. Главный привод станка — это двигатель постоянного тока номинальной мощностью 154 кВт, работающий совместно с преобразователем.

Измерение электрических параметров осуществлялось анализатором PQM-701 фирмы Sonel, который способен проводить прямые измерения показателей качества электрической энергии в сетях с номинальными частотами 50/60 Гц в соответствии с действующим ГОСТ 32144—2013 [4]. Прибор, используемый в ходе исследования, поверен согласно ГОСТ и прошел сертификацию [5].

Последовательность проведения исследования.

Этап 1. Изучение лущильного станка и технической документации.

Данная стадия исследования предполагает получение необходимой первоначальной информации о роли объекта исследования в технологическом процессе, особенностях конструкции, эксплуатации и режимов работы. Проводится анализ исходных данных, осуществляется подготовка к экспериментальной части.

Этап 2. Экспериментальное исследование электрической нагрузки лущильного станка с помощью анализатора, статистическая обработка результатов измерений. Исследования проводились с шагом квантования тока 200 мкс и 10 минут.

Этап 3. Оценка полученных результатов и формулирование выводов.

Результаты исследований, их обсуждение. В электрической сети при пуске электродвигателей и их работе возможно возникновение кратковременных пиковых токов различной продолжительности. Под пиковым током понимают максимальный кратковременный ток электросети продолжительностью от долей секунды до нескольких секунд. Значение пикового тока необходимо знать, чтобы проверить электрическую сеть по условию самозапуска электродвигателей, выбрать аппараты защиты и другое оборудование, а также выполнить расчеты колебаний напряжения сети.

В таблице 1 представлены статистические характеристики тока первой гармоники, полученные на интервале осреднения 200 мкс, благодаря которым можно определить величину пикового тока.

Т а б л и ц а 1

Статистические характеристики тока первой гармоники

Параметр	Модуль тока	Активная составляющая тока	Реактивная составляющая тока
Математическое ожидание, А	102,1	58,5	76,4
Среднеквадратичное отклонение, А	36,1	36,5	33,8
Коэффициент асимметрии	0,3	0,1	1,3
Коэффициент эксцесса	2,6	2,1	4,8
Максимальное значение тока, А	207,6	166,6	206,0
Средняя длительность цикла, с	300		
Средняя длительность рабочего режима, с	294		
Средняя длительность холостого хода, с	6		

В ходе экспериментального исследования обнаружено, что лущильный станок отличается резкопеременным стохастическим характером изменения электрической нагрузки (рис. 1). В среднем за цикл насчитывается 147 пиков нагрузки. Установлено, что число пиков в минуту составляет в среднем 30. Максимальное и минимальное значения импульса тока — 207 А и 40 А соответственно. Таким образом, данный электроприемник способен привести к колебаниям напряжения, которые могут негативно воздействовать на другие электроустановки и на систему электроснабжения предприятия в целом.

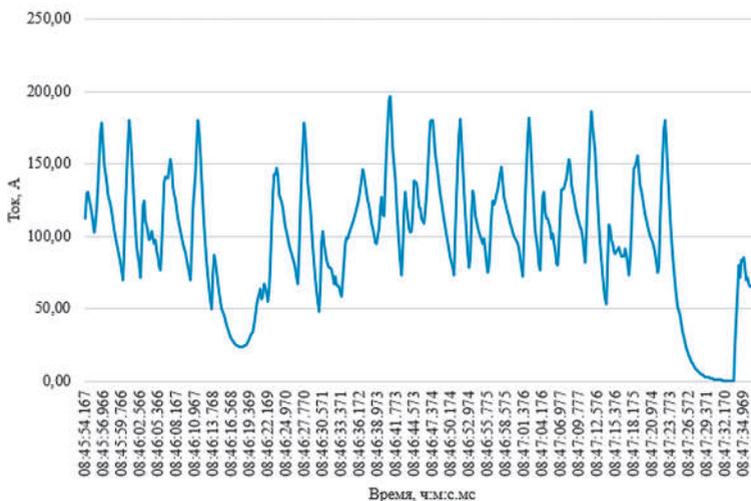


Рис. 1. Изменение электрической нагрузки

При изучении спектрального состава токов (рис. 2) было обнаружено, что лущильный станок является источником токов высших гармоник. На рисунке 2 представлен спектр токов от 1 до 25 гармоники.

Установлено, что для четных гармоник:

- максимальное значение изменяется от 0,6 до 5,6 А;
- минимальное значение — от 0,01 до 0,22 А;
- математическое ожидание — от 0,2 до 1,6 А;
- среднеквадратичное отклонение — от 0,1 до 0,8 А.

Для гармоник, кратных трем:

- максимальное значение — от 0,5 до 3,1 А;
- минимальное значение — от 0,02 до 0,28 А;
- математическое ожидание — от 0,2 до 1 А;
- среднеквадратичное отклонение — от 0,1 до 0,3 А.

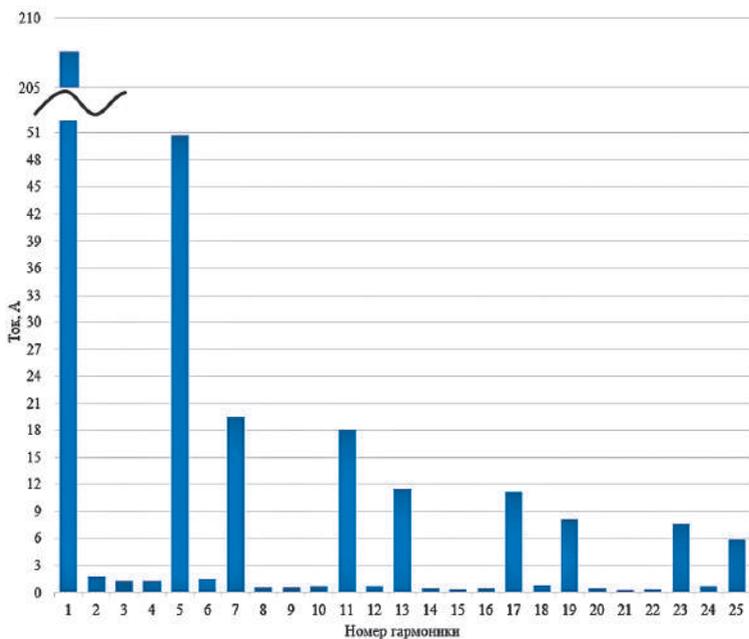


Рис. 2. Спектральный состав токов лущильного станка

Для канонических гармоник значения параметров представлены в табл. 2.

Таблица 2

Канонические гармоники

Номер гармоники	Максимальное значение тока, А	Минимальное значение тока, А	Математическое ожидание, А	Среднеквадратичное отклонение, А
1	207,6	20,9	102,1	36,1
5	50,7	6,0	28,0	7,6
7	19,6	1,4	9,1	3,5
11	18,1	1,3	8,9	3,1
13	11,8	0,6	5,2	2,2
17	11,2	0,9	5,3	2,0
19	8,2	0,4	3,5	1,6
23	7,8	0,6	3,5	1,5
25	6,0	0,2	2,6	1,2

Необходимо отметить, что отечественный стандарт ГОСТ 32144—2013 не нормирует высшие гармонические составляющие токов, являющиеся первопричиной возникновения высших гармонических составляющих напряжения, а нелинейные искажения тока в системах электроснабжения рассматриваются через гармонические составляющие напряжения [6].

При проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий для выбора кабелей, трансформаторов и другого оборудования необходимо знать параметры нагрузки на интервале осреднения 30 мин. В таблице 3 приведены значения параметров для модуля тока, активной и реактивной мощностей на 30-минутном интервале осреднения.

Т а б л и ц а 3

Параметры нагрузки на 30-минутном интервале осреднения

Параметр	Модуль тока, А	Активная мощность, кВт	Реактивная мощность, квар
Математическое ожидание	210,1	56,0	46,7
Среднеквадратичное отклонение	16,3	4,3	3,6
Максимальное значение тока	223,0	57,1	49,3
Минимальное значение	108,2	28,1	23,7

Выводы.

1. Установлено, что главный привод лущильного станка работает в повторно-кратковременном режиме, нагрузка двигателя изменяется случайным образом и имеет резкопеременный характер. Рабочий цикл чередуется с циклом холостого хода, двигатель главного привода постоянно нагружен и в течение цикла не отключается.

2. Получены параметры статистической нагрузочной диаграммы, которые рекомендуется использовать при выборе мощности электродвигателя.

3. Получены сведения по размахам изменения электрической нагрузки двигателя, которые будут полезны при расчете колебаний напряжения и оценке дозы фликера.

4. Определен спектральный состав сетевого тока электропривода. Результаты измерений свидетельствуют о необходимости расчета несинусоидального режима сети, питающей лущильное производство. Результаты измерений могут быть использованы при разработке методики расчета коэффициента несинусоидальности напряжения сети.

Литература

1. **Гайдукевич В.И., Титов В.С.** Случайные нагрузки силовых электроприводов. М.: Энергоатомиздат, 1983. 161 с.
2. **Калинина Е.А.** Разработка методики расчета колебаний напряжения в системах электроснабжения деревообрабатывающих производств: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. Киров, 2017. 166 с.
3. **Глебов И.Т.** Оборудование для производства и обработки фанеры: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2013. 287 с.
4. **ГОСТ 32144—2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 15 с.
5. **ГОСТ Р 8.656—2009.** Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений показателей качества электрической энергии. Методика поверки. М.: Стандартинформ, 2019. 19 с.
6. **Ершов М.С., Чернев М.Ю.** Анализ электромагнитной совместимости при принятии решения о подключении частотно-регулируемых электроприводов // Фёдоровские чтения — 2019: XLIX международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2019.

*А.В. Галимова, FedorovaAV@mpei.ru,
А.А. Белогловский, BeloglovskyAA@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва*

ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАТОДОНАПРАВЛЕННЫХ СТРИМЕРОВ С ЭЛЕКТРОННЫМИ ЛАВИНАМИ (ОБЗОР)

Стример — это нетермоионизованный плазменный канал с избыточным зарядом в его головной части (головке), удлиняющийся за счет ударной ионизации газа электронами вблизи головки [1]. Головки стримеров являются источниками сильного электрического поля (ЭП), в котором образуются химически активные частицы (радикалы), участвующие затем в электрохимических реакциях в воздушной среде. Это позволяет применить стримерный разряд в промышленных (например, электросинтез озона [2]) и природоохранных (конверсия примесей в отходящих газах различных производств [1]) высоковольтных электротехнологиях в качестве источника радикалов. По той же причине этот вид разряда также используется в медицине для инактивации микроорганизмов под действием радикалов или ультрафиолетового излучения разряда [3].

В воздухе при нормальных атмосферных условиях (НАУ) стример представляет собой тонкий плазменный канал радиусом $0,01 \div 0,10$ см,

который распространяется в межэлектродном пространстве со скоростью $10^7 \div 10^8$ см/с и при этом удлиняется с начального значения, близкого к $0,03 \div 0,05$ см, до нескольких единиц или десятков сантиметров [1]. При НАУ одиночные стримеры формируются в коротких промежутках длиной менее 1 см, а в более длинных промежутках происходит их ветвление [4].

Интенсивность наработки радикалов в плазме разряда определяется напряженностью ЭП в головках стримеров и плотностью заполнения разрядного промежутка стримерами и их ветвями. Необходимостью определения этих параметров обусловлена значимость задачи математического моделирования формирования, развития и ветвления стримеров в воздушной среде. Интенсивнее ветвятся катодонаправленные (положительные) стримеры, чьи головки распространяются в направлении от анода к катоду. Поэтому ниже рассмотрен вопрос о ветвлении и особенностях распространения таких стримеров. Краткий обзор посвященных этой проблеме публикаций один из авторов с коллегой представили в статье [5]. Здесь же предложен обновленный обзор, учитывающий информацию, появившуюся в литературе в последние годы.

Выделены три группы гипотез, объясняющих ветвление.

Гипотезы, относящиеся к первой группе, основаны на том известном факте, что катодонаправленный стример распространяется в заполненном воздухом разрядном промежутке благодаря появлению и развитию перед его головкой электронных лавин, чье появление инициируют начальные электроны [1]. Ветвление объясняется тем, что возникновение лавин перед положительной головкой по тем или иным причинам носит дискретный характер. Эти лавины развиваются в сильном ЭП головки и канала стримера, благодаря этому инициируя формирование его ветвей [6].

Дискретный характер возникновения лавин связывают с неравномерностью распределения концентрации начальных электронов перед стримерной головкой:

- из-за случайности направлений испускания разрядом в воздухе фотонов ионизирующего ультрафиолетового (УФ) излучения;
- из-за стохастических локальных колебаний давления газа у головки;
- из-за локальных усилений ЭП вокруг частиц аэрозоля в воздухе.

Во второй группе гипотез ветвление объясняется спонтанным развитием электростатической неустойчивости в головке стримера. Возникновение такого феномена обосновывают результатами некоторых детальнейших расчетов катодонаправленных стримеров [7], которые показали возможность уплощения их головок в процессе продвижения в глубь промежутка. Это, в свою очередь, ведет к смещению максимума напряженности ЭП с оси стримера к краю его головки и, следовательно, интенсификации иони-

зационных процессов именно у края головки, а не в ее средней части. Этот комплекс процессов и ведет к ветвлению.

В работах третьей группы ветвление связывается с волнами вторичной ионизации, распространяющимися в канале стримера. Здесь предполагают, что в процессе его развития вблизи анода, с которого он стартует, в разрядной плазме накапливается достаточное количество свободных электронов, ионов, возбужденных частиц и радикалов, чтобы произошло уменьшение начальной напряженности поля [8]. Когда она падает ниже имеющегося здесь уровня напряженности ЭП, в прианодной части стримерного канала формируется вторичная волна ионизации, затем распространяющаяся по всему каналу, причем она движется быстрее первичной головки. Когда вторичная волна догоняет последнюю, их взаимодействие может привести к ветвлению стримера.

Авторы доклада полагают, что все три перечисленные выше группы гипотез, объясняющих ветвление катодонаправленных стримеров в воздухе, при определенных условиях могут реализоваться, и в этом смысле имеют право на существование. Но наиболее реалистичной нам представляется первая из них, что обосновано рядом соображений.

Результаты экспериментальных исследований стримеров в воздухе и других смесях $N_2:O_2$ свидетельствуют, что при фиксированных температуре и давлении по мере снижения содержания кислорода O_2 в его смеси с азотом N_2 уменьшается диаметр стримерных каналов и возрастает интенсивность их ветвления [9]. Это естественно, поскольку именно присутствие O_2 обеспечивает возможность фотоионизации газа УФ излучением разряда, а она, в свою очередь, служит источником начальных электронов, позволяющих катодонаправленному стримеру продвигаться в глубь разрядного промежутка [10].

При малой концентрации O_2 фотоионизация обеспечивает генерацию отдельных начальных электронов, инициирующих ветвление. При концентрации O_2 , характерной для атмосферного воздуха (около 21 %), благодаря фотоионизации образуется множество начальных электронов, распределенных вокруг стримерной головки. Интенсивность испускаемого ею УФ излучения уменьшается по мере удаления от нее в среднем по экспоненциальному закону [11], и потому большинство начальных электронов появляется вблизи головки и канала, обеспечивая их расширение. Лишь малая их часть, что появляется вблизи границы зоны ионизации головки, инициирует формирование крупных электронных лавин, и потому дает начало ветвям стримера. Поскольку направления вылета фотонов, породивших их в результате фотоионизации, случайны, то и распределение упомянутых лавин вокруг головки имеет случайный и неравномерный характер.

В экспериментах по изучению трехмерной структуры стримерного разряда в воздухе наблюдалось ветвление положительных стримеров на две или три ветви [12]. Кроме того, хорошо известно, что стримеры распространяются не строго вдоль силовых линий ЭП, но лишь в среднем придерживаясь заданного ими направления и отклоняясь от него в ту или другую сторону. Эти особенности развития стримерного разряда в воздушной среде были изучены в вычислительных экспериментах в рамках допущения, что их причиной являются стохастический характер фотоионизации газа излучением разряда и вызванная этим неравномерность распределения начальных электронов [13, 14].

В статье [13] приведены результаты вычислительного эксперимента по изучению катодонаправленного стримера, развивающегося в заполненном воздухом разрядном промежутке с однородным ЭП с напряженностью 15 кВ/см. Вычисления были выполнены в рамках трехмерной дрейфодиффузионной математической модели разряда и классической модели фотоионизации в воздухе по Железняку [10] с ее стохастическим расширением. Оказалось, что полученные в результате моделирования случайные флуктуации направления и скорости распространения стримерной головки, напряженности поля в ней, концентрации электронов в стримере, хорошо соответствуют данным, известным из других работ.

В статье [14] представлены результаты аналогичных вычислительных экспериментов для разрядного промежутка с резко неоднородным ЭП. Получена структура ветвления, близкая к той, что известна из физических экспериментов, включая разделение стримеров на две или три ветви.

Таким образом, подтверждается, что по меньшей мере одной из причин ветвления катодонаправленных стримеров в воздухе и стохастических отклонений направлений их распространения могут быть вызванные неравномерностью фотоионизации газа излучением разряда случайные колебания концентрации начальных электронов и развитие инициируемых ими дискретных электронных лавин перед стримерными головками.

Литература

1. **Электрофизические** основы техники высоких напряжений: учеб. / И.М. Бортник, А.А. Белогловский, И.П. Верещагин и др.; под ред. И.П. Верещагина. — 3-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство МЭИ, 2018.
2. **Высоковольтные** электротехнологии / О.А. Аношин, А.А. Белогловский, И.П. Верещагин и др.; под ред. И.П. Верещагина. М.: Издательство МЭИ, 2000.
3. **Василяк Л.М.** Физические методы дезинфекции (обзор) // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 1. С. 5—17.

4. **Positive** and negative streamers in ambient air: measuring diameter, velocity and dissipated energy / T.M.P. Briels, J. Kos, G.J.J. Winands, E.M. et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008. V. 41. 234004.
5. **Белогловский А.А., Рушальщикова А.В.** Изучение ветвления катодо-направленного стримера в воздухе посредством трехмерной математической модели // *Электричество*. 2016. № 7. С. 16—23.
6. **Badaloni S., Gallimberti I.** Montecarlo simulation of streamer branching // 11th International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Prague, 1973.
7. **The multiscale** nature of streamers / U. Ebert, C. Montijn, T.M.P. Briels et al. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2006. V. 15. S118—S129.
8. **Соколова М.В., Темников А.Г.** Физические предпосылки модели ветвления положительного стримера в воздухе // *Вестник МЭИ*. 1998. № 4. С. 34—40.
9. **Probing** photo-ionization: experiments on positive streamers in pure gases and mixtures / S. Nijdam, F.M.J.H. van de Wetering, R. Blane et al // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2010. V. 43. 145204.
10. **Железняк М.Б., Мнацаканян А.Х., Сизых С.В.** Фотоионизация смесей азота и кислорода излучением газового разряда // *ТВТ*. 1982. Т. 20. № 3. С.423—428.
11. **Сергеев Ю.Г.** Учет фотоионизации при математическом моделировании газового разряда. М.: Издательство МЭИ, 1996.
12. **Streamers** in air splitting into three branches / L.C.J. Heijmans, S. Nijdam, E.M. van Veldhuizen, U. Ebert // *A Letters Journal Exploring the Frontiers of Physics*. 2013. V. 103. 25002.
13. **Bagheri B., Teunissen J.** The effect of the stochasticity of photoionization on 3D streamer simulations // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2019. V. 28. 045013.
14. **Marskar R.** 3D fluid modeling of positive streamer discharges in air with stochastic photoionization // *Plasma Sources Science and Technol.* 2020. arXiv: 2001.02072v2 [physics.plasm-ph] 9 Apr 2020.

*А.В. Галимова, FedorovaAV@mpei.ru,
 А.А. Белогловский, BeloglovskyAA@mpei.ru,
 С.В. Белоусов, BelousovSV@mpei.ru,
 И.О. Савельев, SavelyevIO@mpei.ru,
 НИУ «МЭИ», Москва*

ИЗУЧЕНИЕ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАВИН И КАТОДОНАПРАВЛЕННЫХ СТРИМЕРОВ (ОБЗОР)

Стример — это нетермоионизованный плазменный канал с избыточным зарядом в его головной части (головке), удлиняющийся за счет ударной ионизации газа электронами в ее окрестностях [1]. Распространение катодонаправленного (положительного) стримера в первую очередь опре-

деляется внешним электрическим полем (ЭП), полем объемного заряда его головки и канала, фотоионизацией окружающего газа, исходящим из них ультрафиолетовым излучением.

Теоретическое изучение стримерного разряда — сложная задача. Даже в рамках его простейшей дрейфово-диффузионной модели [1] развитие стримеров описывает нелинейная система дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП), включающая уравнения неразрывности потока заряженных частиц с самосогласованным ЭП и нелокальным источником фотоионизации. Аналитические исследования ограничены изучением одномерной плоской волны ионизации [2, 3], что далеко от реального стримера, чей канал имеет радиус 0,01—0,1 см. Усложняет картину необходимость учета трехмерной структуры разряда [4, 5] с одновременным развитием множества стримеров и их ветвлением [4, 6, 7]. Поэтому математическое моделирование и вычислительный эксперимент стали основными инструментами теоретических исследований стримеров.

Распространение стримеров обеспечивает дрейф заряженных частиц (свободных электронов, положительных и отрицательных ионов) в ЭП, их рождение и гибель в процессах ударной ионизации, фотоионизации газа излучением разряда, прилипания и отлипания электронов, ион-ионной и ион-электронной рекомбинации [1]. Для их описания применяют семейство дрейфово-диффузионных математических моделей [1], где распределения потенциала ЭП φ , вектора его напряженности \mathbf{E} и концентраций N_i заряженных частиц описывают системой ДУЧП:

$$\partial N_i / \partial t + \operatorname{div}[N_i \mathbf{v}_i - D_i \operatorname{grad}(N_i)] = S_i, \quad (1)$$

$$\Delta \varphi = -(N_+ - N_e - N_-)e / \varepsilon_0, \quad (2)$$

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad}(\varphi), \quad (3)$$

где (1) — уравнение неразрывности потока заряженных частиц; (2) — уравнение Пуассона; (3) — уравнение связи между φ и \mathbf{E} . В простейшем случае их записывают для электронов ($i = 'e'$), положительных ($i = '+'$) и отрицательных ($i = '-'$) ионов. Тогда в модель входят три уравнения неразрывности (1) для частиц видов $i = 'e', '+'$ и $'-'$. В них S_i — наработка частиц i -го сорта в единице объема в единицу времени за счет названных процессов; D_i — коэффициенты диффузии частиц; N_e, N_+ и N_- — концентрации электронов, положительных и отрицательных ионов соответственно; $\mathbf{v}_e, \mathbf{v}_+$ и \mathbf{v}_- — векторы их скоростей дрейфа в ЭП, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — элементарный заряд; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная.

Распределения N_i , \mathbf{E} и φ в общем случае являются функциями трех декартовых пространственных координат x , y , z и времени t . Уравнения (1) и (2) дополняют начальными и граничными условиями для значений N_i , отражающими физические представления об условиях развития разряда, заложенных в модель, и граничными условиями для потенциалов электродов.

Из-за сложности задачи исторически первой в 1960-х годах была реализована квазидвумерная (1,5D) модель стримера [8]. В ней было сделано допущение, что величины N_e , N_+ , N_- и \mathbf{E} в стримере изменяются только в направлении его распространения, оставаясь постоянными в поперечном сечении. Радиус стримера не меняется на всем его протяжении и задается исходя из имеющихся экспериментальных данных. Эти предположения позволили вычислять распределения скоростей векторов \mathbf{v}_e , \mathbf{v}_+ , \mathbf{v}_- и напряженности \mathbf{E} не во всем разрядном промежутке, но лишь вдоль оси стримера. Это сделало 1,5D модель менее требовательной к ресурсам (быстродействию и памяти) реализующего компьютера, и потому на ее основе были построены, например, вычислительные алгоритмы для расчета длинных (до 10—20 см) катодонаправленных стримеров [9, 10]. На базе 1,5D моделей впервые изучено параллельное развитие катодонаправленных стримеров; выявлено различие параметров стримеров (максимальной напряженности ЭП в стримерных головках и скорости их движения), распространяющихся в коллективе и в одиночку [10, 11].

Очевидным недостатком 1,5D моделей является неизменность радиуса стримера и необходимость задания его значения, являющегося параметром модели. Это сужает область применения 1,5D моделей условиями, для которых имеются соответствующие достоверные данные. Поэтому сегодня 1,5D модели, видимо, устарели, хотя в некоторых случаях их по-прежнему можно применять в исследованиях длинных стримеров.

Чтобы решить отмеченные проблемы 1,5D моделей, были предложены двумерные (2D) модели стримеров. Первые из них, известные авторам доклада, были построены во второй половине 1980-х годов и представлены в статьях [12, 13]. В них предполагается, что стример распространяется строго вдоль аксиальной оси системы электродов с вращательной симметрией (например, «стержень—плоскость» или «игла—плоскость»). Поэтому делается допущение о том, что распределения N_e , N_+ , N_- и \mathbf{E} зависят только от значений аксиальной и радиальной координат аксиальной системы, в которой записываются ДУЧП (1)—(3). От ее третьей координаты (угла вращения) в 2D моделях параметры стримера не зависят. Такой подход освобождает модель от предположения о неизменности радиуса стри-

мера, который определяется в ее собственных рамках в ходе выполнения вычислительного эксперимента.

С применением 2D моделей были получены данные о параметрах катодонаправленных стримеров. Вычислительные эксперименты по изучению их распространения вплоть до остановки [14] позволили изучить структуру распределения объемного заряда в головках и каналах. В частности, оказалось, что по мере торможения стримерных головок перед их остановкой в слабом ЭП, значения их радиусов уменьшаются и стримеры утончаются. Были получены зависимости радиусов головок и скорости их распространения от давления воздуха. Показано хорошее соответствие результатов расчетов и экспериментальных исследований [15]. Оно подтвердило достоверность результатов 2D моделирования. При помощи 2D моделей в рамках аксиальной симметрии задачи удалось исследовать начальный этап ветвления стримеров и подтвердить принципиальную возможность его инициации по двум причинам: благодаря появлению и развитию начальной неоднородности в распределении электронов перед стримерной головкой [16], а также возникновению и развитию в ней электростатической неустойчивости [17].

Невзирая на большой объем данных о развитии стримеров в воздухе, полученных посредством 2D моделей, их возможности ограничены. Это связано с отмеченной выше трехмерной (3D) структурой стримерного разряда. С другой стороны, интенсивное развитие компьютерной техники и информационных технологий в последние 15—20 лет позволило приступить на практике к 3D моделированию стримеров.

В 3D модели предполагается, что функции N_e , N_+ , N_- и E зависят от всех трех координат декартовой или аксиальной системы, в которой записываются ДУЧП (1)—(3). Первая известная авторам 3D модель катодонаправленного стримера [18] была построена в конце прошлого века. Однако (из-за недостаточной проработки в то время физических моделей ветвления и параллельного распространения стримеров) с ее помощью не удалось получить достоверные значимые результаты.

Примерно 10—15 лет назад удалось создать более совершенные 3D модели катодонаправленных стримеров в воздухе и перейти к изучению в вычислительных экспериментах их ветвления и параллельного развития. В работе [19], например, показана возможность образования стримерной ветви благодаря появлению и развитию малой неоднородности в начальном распределении электронов в пространстве (исследования проводили для воздушного промежутка с однородным ЭП). Она возникала благодаря фотоионизации воздуха, локальным колебаниям давления в малых областях промежутка и т.п. В [20] показана подобная возможность благодаря

неравномерному отлипанию электронов в сильном резко неоднородном поле вблизи иглы в системе «игла—плоскость». Статья [21] иллюстрирует такую возможность благодаря случайным флуктуациям фотоионизации излучением разряда (здесь исследования были проведены в системе «стержень—плоскость»). Наконец, в [22] рассмотрено параллельное распространение стримеров в воздухе, показана возможность слияния стримерных головок, развивающихся вблизи друг друга, благодаря фотоионизации газа между ними.

На кафедре техники и электрофизики высоких напряжений также была разработана 3D модель электронных лавин [23] и катодонаправленных стримеров [24], с ее помощью выполнены вычислительные эксперименты по их изучению в заполненном воздухе при нормальных атмосферных условиях (НАУ) разрядном промежутке с однородным ЭП.

Удалось выяснить [23, 25], что однолавино-стримерный переход в середине промежутка [1] начинается с формирования отрицательной стримерной головки. К моменту начала формирования плазменного канала критическое число электронов в лавине достигает примерно $5 \cdot 10^7$ и слабо зависит от напряженности ЭП в промежутке [26]. После этого начинается накопление объемного заряда и усиление ЭП в положительной головке, и при этом между головками напряженность поля снижается. Если воспользоваться критерием лавинно-стримерного перехода, предлагаемого в [1] и заключающегося в снижении минимальной напряженности ЭП в лавине до значения, при котором равны интенсивности ударной ионизации и прилипания свободных электронов (при НАУ в воздухе $24,5$ кВ/см), то критическое число электронов при этом близко к $5 \cdot 10^8$.

Моделировалось ветвление катодонаправленных стримеров в допущении, что его вызывает развитие двух электронных лавин в ЭП головки и канала [27]. Показано, что этот механизм может реализоваться, если к моменту встречи стримерной головки с лавиной последняя имеет параметры, близкие к критическим, а начальное расстояние между лавинами близко или превышает диаметр головки ветвящегося стримера.

Подведем итог сказанному в представленном выше обзоре.

1. Для теоретического исследования катодонаправленных стримеров в воздухе предложено семейство 1,5D, 2D и 3D математических моделей, основанных на дрейфово-диффузионной модели, включающей ДУЧП (1)—(3) и дополняемых начальными и граничными условиями.

2. Вычислительные эксперименты, выполненные с использованием 2D моделей, позволили получить данные о структуре распределения объемного заряда и ЭП в головках стримеров, скорости их движения. Была подтверждена принципиальная возможность ветвления по двум причинам:

благодаря появлению и развитию начальной неоднородности в распределении электронов перед стримерной головкой, а также возникновению и развитию в ней электростатической неустойчивости.

3. Посредством 3D моделирования показана возможность и уточнены условия ветвления катодонаправленных стримеров в воздухе, если его вызывает развитие двух электронных лавин в ЭП головки и канала.

Литература

1. **Электрофизические** основы техники высоких напряжений: учеб. / И.М. Бортник, А.А. Белоголовский, И.П. Верещагин и др.; под ред. И.П. Верещагина. — 3-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство МЭИ, 2018.
2. **Лозанский Э.Л., Фирсов О.Б.** Теория искры. М.: Атомиздат, 1975.
3. **Физические** основы электрического пробоя газов / А.Ф. Дьяков, Ю.К. Бобров, А.В. Сорокин, Ю.В. Юргеленас; под. ред. А.Ф. Дьякова. М.: Издательство МЭИ, 1999.
4. **Creyghton Y.L.M.** Pulsed positive corona discharges (Fundamental study and application to flue gas treatment). Ph. D. Thesis, Eindhoven University of Technology, the Netherlands, 1994.
5. **Reconnection** and merging of positive streamers in air / S. Nijdam, C.G.C. Geurts, E.M. van Veldhuizen, U. Ebert // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. 045201.
6. **Positive** and negative streamers in ambient air: measuring diameter, velocity and dissipated energy / T.M.P. Briels, J. Kos, G.J.J. Winands et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. 234004.
7. **Probing** photo-ionization: experiments on positive streamers in pure gases and mixtures / S. Nijdam, F.M.J.H. van de Wetering, R. Blane et al // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43. 145204.
8. **Davies A.J., Evans C.J.** Field distortion at gaseous discharges between parallel plate electrodes // Proc. IEE. 1967. V. 114. No 10. P. 1547—1550.
9. **Aleksandrov N.L., Bazelyan E.M.** Simulation of long-streamer propagation in air at atmospheric pressure // J. Phys. D: Appl. Phys. 1996. V. 29. P. 740—752.
10. **Пашинин И.В.** Усовершенствование методов расчета поля и движения частиц в задачах импульсной стримерной короны: дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ (ТУ), 2007.
11. **Naidis G.V.** On streamer interaction in a pulsed positive corona discharge // J. Phys. D: Appl. Phys. 1996. V. 29. No 9. P. 779—783.
12. **Dhali S.K., Williams P.F.** Two-dimensional studies of streamers in gases // J. Appl. Phys. 1987. V. 62. P. 4696.
13. **Wu C., Kunhardt E.E.** Formation and propagation of streamers in N₂ and N₂-SF₆ mixtures // Phys. Rev. A. 1988. V. 37. P. 4396.
14. **Pancheshnyi S., Starikovskii A.** Two-dimensional numerical modelling of the cathode-directed streamer development in a long gap at high voltage // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. V. 36. P. 2683—2691.

15. **Pancheshnyi S., Nudnova M., Starikovskii A.** Development of a cathode-directed streamer discharge in air at different pressures: Experiment and comparison with direct numerical simulation // *Phys. Rev. E — Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.* 2005. V. 71. P. 1—12.
16. **Babaeva N.Y., Naidis G.V.** Two-dimensional modelling of positive streamer dynamics in non-uniform electric fields in air // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1996. V. 27. P. 2423—2431.
17. **The multiscale nature of streamers / U. Ebert, C. Montijn, T.M.P. Briels** // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2006. V. 15. S118—S129.
18. **Kulikovskiy A.A.** Three-dimensional simulation of a positive streamer in air near curved anode // *Phys. Lett. A.* 1998. V. 245. P. 445.
19. **Papageorgiou L., Georghiou G.E., Metaxas A.C.** Three-dimensional numerical modeling of gas discharges at atmospheric pressure incorporating photoionization phenomena // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2011. V. 44. 045203.
20. **Pancheshnyi S.** Role of electronegative gas admixtures in streamer start, propagation and branching phenomena // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2005. V. 14. No 4. P. 645—653.
21. **Marskar R.** 3D fluid modeling of positive streamer discharges in air with stochastic photoionization // *Plasma Sources Science and Technol.* 2020. arXiv:2001.02072v2 [physics.plasm-ph] 9 Apr 2020.
22. **Zhu Yu., Zhang X., He J.** Predicting streamer discharge front splitting by ionization seed profiling // *Phys. Plasmas.* 2019. V. 26. 023513.
23. **Белогловский А.А.** Об уточнении критерия однолавино-стримерного перехода в воздухе в сильных однородных электрических полях // *Вестник МЭИ.* 2020. № 6. С. 29—38.
24. **Белогловский А.А., Верещагин И.П.** Трехмерное математическое моделирование стримерного разряда в воздухе с учетом ветвления: экономичный расчет электрического поля // *Электричество.* 2011. № 11. С. 17—24.
25. **Белогловский А.А., Глушкова А.Е., Галимова А.В.** Изучение лавинно-стримерных переходов в воздухе средствами математического моделирования. Часть II: исследование процесса перехода // *Фёдоровские чтения — 2020: L международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2020. С. 263—270.*
26. **Белогловский А.А., Белоусов С.В., Таратонкина К.И.** Изучение лавинно-стримерных переходов в воздухе средствами математического моделирования. Часть I. Оценка критического числа электронов в лавинах // *Фёдоровские чтения — 2020: L международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2020. С. 255—263.*
27. **Белогловский А.А., Рушальщикова А.В.** Изучение ветвления катодонаправленного стримера в воздухе посредством трехмерной математической модели // *Электричество.* 2016. № 7. С. 16—23.

СПЕКТРАЛЬНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ ЧЕТЫРЕХУРОВНЕВОГО АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА

Качественные характеристики силового преобразователя, энергоэффективность устройства и его составных частей, выходные показатели и качество преобразованной электроэнергии в значительной степени обусловлены реализацией конкретного типа широтно-импульсной модуляции (ШИМ). В работах [1—3, 6] проанализированы проблемы применения современных полупроводниковых ключей в высоковольтных схемах, используемых в тяговом приводе электроподвижного состава переменного тока с перспективой повышения максимально допустимых напряжений за счет применения ключей с распределенным электростатическим управлением (КРЭУ), представляющих последовательное соединение нескольких тиристоров с электро-статическим управлением (ТЭУ) в стек с соблюдением каскадного принципа построения, обеспечивающего повышенную эффективность работы в условиях высоких напряжений.

В работе [4] предложена интегрально-амплитудно-импульсная модуляция (ИАИМ) (рис. 1). Принцип ИАИМ основан на управлении амплитудной составляющей сигнала и управлении сигнала при помощи интегрирования:

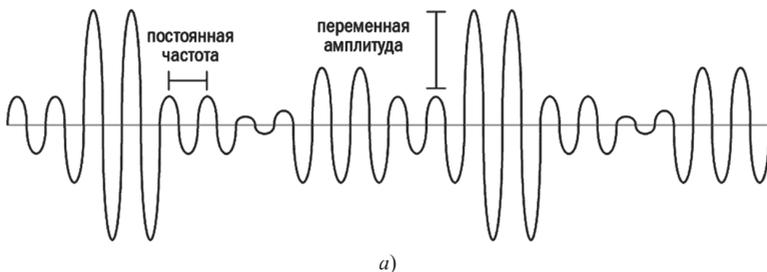
— амплитудная часть модуляции (размах сигнала) осуществляет изменение выходного сигнала, формируя заданный уровень регулируемой величины в текущий момент времени;

— интегральная часть модуляции (скважность сигнала) осуществляет изменение выходного сигнала, формируя необходимую длительность подачи выходного сигнала (частоту), вследствие задания требуемого количества коммутаций (квантований) относительно периода выходного сигнала преобразователя, при текущей частоте выходного сигнала.

В работе [4] представлены основные преимущества ИАИМ в комплексе с четырехуровневым автономным инвертором напряжения (4-У АИН) на силовых элементах КРЭУ (ключ с распределенным электростатическим управлением) [1—3]. Силовой преобразователь разрабатывается автором в рамках диссертационной работы, направленной на повышение энергоэффективности электропоездов серии ЭС1в/и.

По итогам сравнения 4-У АИН с применяемыми АИН на IGBT ключах, в работе [4] выделяются преимущества и недостатки каждой из систем. Стоит отметить, что сравнение силовых преобразователей было выполнено только в области силовых элементов и используемой системы

Амплитудная модуляция (АМ)



Частотная модуляция (FM)

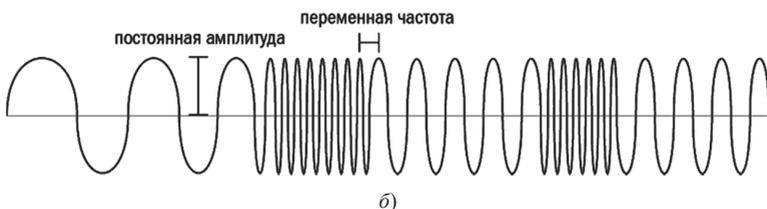


Рис. 1. Принцип формирования интегрально-амплитудной импульсной модуляции (ИАИМ)

модуляции сигнала без принятия во внимание системы управления инвертором, поскольку работа над системой 4-У АИН продолжается.

С учетом факторов (схемы подключения силового преобразователя, частоты переключения ключей, резонансы напряжения/токов, тепловые режимы работы) необходимо отметить сложности в формировании системы управления для любого типа модуляции: обеспечение требований нормативных показателей качества напряжения на входе силового преобразователя; возможности генерирования нескольких последовательностей без использования начальных углов переключений.

Отдельно стоит отметить функцию исключения отдельных гармонических составляющих. Наиболее эффективным способом удаления отдельных гармоник является метод доверительных окрестностей с ломаным шагом, в основе которого лежит **спектральное разложение сигналов с помощью функций Уолша** [5]:

$$\begin{cases} \alpha_{2k-1}^0 = 30^\circ + 120^\circ k / (N+1) - \Delta\alpha \\ \alpha_{2k}^0 = 30^\circ + 120^\circ k / (N+1) - \Delta\alpha, \\ \alpha_N^0 = 90^\circ - \Delta\alpha \end{cases} \quad (1)$$

где N — количество углов переключений; $k = 1, 2, \dots, (N-1)/2$ — порядковый номер угла переключения; $\Delta\alpha = 0 \dots 0,5$ — начальное рассогласование углов переключения для достижения лучших результатов поиска.

Связь между углами переключений и гармоническим спектром сигнала на входе инвертора определяется с помощью системы управлений

$$\begin{cases} U_1 = \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(\alpha_k) = \frac{\pi}{4} M \\ U_N = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(n\alpha_k) = 0, \quad n = 5, 7, 11, \dots \end{cases} \quad (2)$$

где U_1 — уровень основной гармоники; U_n — уровень n -й гармоники; M — индекс модуляции, определяемый в пределах от нуля до максимального значения $\frac{4}{\pi}$.

С учетом (1) и (2) целевая функция записывается в виде

$$E = \left(U_1 - \frac{\pi}{4} M \right)^2 + \dots + U_q^2 \longrightarrow \min. \quad (3)$$

В системе управления инвертором для упрощения выходные сигналы принято представлять в виде сумм ортогональных составляющих с бесчисленным количеством. Поскольку система ортогональных функций выходного сигнала известна, следовательно, разложима и может быть определена набором чисел — спектром сигналов. Применение спектрального разложения сигналов с помощью функций Уолша было выбрано, так как базисная система функций (3) имеет наибольшую возможность интеграции под условия работы тягового подвижного состава и удовлетворяет выполнению вычислений в области практических задач — формирование сигналов управления ИАИМ в тяговом приводе электропоезда.

Преобразование Уолша характеризуется простотой технической реализации в виде корректирующих устройств адаптивной системы управления. Функции принимают только два значения «-1» и «1», в силу чего удается избежать операции умножения при реализации алгоритмов на ЭВМ [5]. Время преобразования Уолша в несколько раз превышает преобразование Фурье для аналогичного массива данных [5]. Поскольку связь между быстрыми базисами и оптимальными функциями позволяет оптимизировать работу системы управления и сократить время отклика адаптивного контура, было принято решение использовать в качестве архитектуры управления 4-У АИН спектральное разложение сигналов с помощью функций Уолша.

Для выполнения математического моделирования процесса управления 4-У АИН была составлена следующая блок-схема алгоритма поиска последовательности углов переключения КРЭУ при удалении отдельных гармонических составляющих методом доверительных окрестностей с ломаным шагом при спектральном разложении сигналов с помощью функций Уолша (рис. 2).

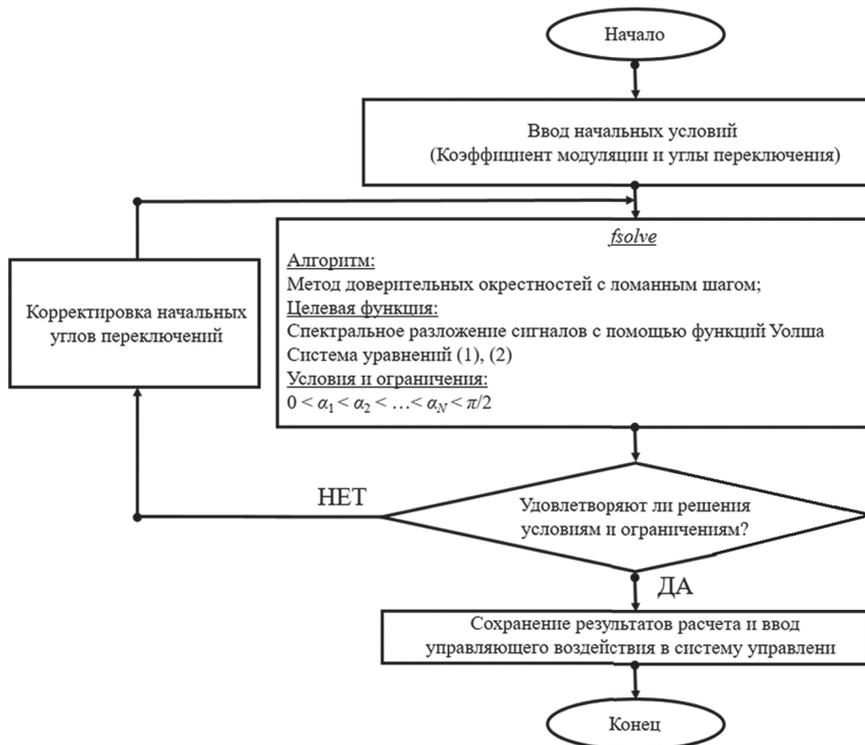


Рис. 2. Блок-схема алгоритма управления 4-У АИН

Полученные данные в [7] служат основой для последующего повышения эффективности работы 4-У АИН посредством адаптации и оптимизации настроек, структуры и алгоритмов системы модуляции и управления, которые при выбранной элементной силовой базе (КРЭУ) силовой части обеспечивают выполнение заложенных функций во всем диапазоне возмущающих и управляющих воздействий, возникающих при эксплуатации электропоезда.

Литература

1. **Бережнов Д.А.** Многоуровневый автономный инвертор напряжения // Железнодорожный транспорт. 2021. № 7. С. 42—43.
2. **Бережнов Д.А.** Фиксация потенциалов в структуре силовой цепи четырехуровневого автономного инвертора напряжения // Фёдоровские чтения — 2021. LI международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2021. С. 226—230.
3. **Бережнов Д.А.** Выбор структуры преобразователей частоты в системе частотного регулирования скорости электропривода переменного тока // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов 28 международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. М.: НИУ «МЭИ», 2022. С. 409.
4. **Бережнов Д.А., Иньков Ю.М.** Перспективные алгоритмы управления в электроприводе с многоуровневым преобразователем частоты для электропоездов серии ЭС1в/и // Практическая силовая электроника. 2022. № 2 (86). С. 49—51.
5. **Исаев Ю.Н.** Численно-аналитическое моделирование восстановления оптических сигналов и изображений: автореферат дис. ... доктора физико-математических наук: 05.13.18, Том. гос. ун-т. Томск, 2004. 35 с.
6. **Духнич Е.М.** Повышение эффективности работы высоковольтных преобразователей на основе ключей с распределенным электростатическим управлением: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.12. Москва, НИУ «МЭИ», 2019. 186 с.
7. **Бережнов Д.А.** Разработка топологии четырехуровневого автономного инвертора напряжения повышенной эффективностью в статических и динамических режимах // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт. Сборник материалов научно-практической конференции АО «ВНИИЖТ». Щербинка, 2021. С. 18—27.

*Б.В. Дубровский, dubrovskybogdan@yandex.ru,
М.Е. Вухров, VikhrovMY@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва*

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НЕОБХОДИМЫХ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В последнее время огромный рост информационных технологий повлек за собой то, что практически все компании и организации начали хранить и обрабатывать данные, отражающие сведения об их деятельности, в электронном виде. Это стало причиной создания центров обработки данных или дата-центров.

Центр обработки данных — это специализированное сооружение, предназначенное для размещения серверного и коммуникационного оборудования. В функционал таких объектов входит подключение абонентов к каналам сети Интернет, хранение, обработка и распространение информации, как правило, в интересах корпоративных клиентов и другое. Для надежного электроснабжения необходимо построить системы с высокой отказоустойчивостью.

Требования нормативных документов к СЭС центров обработки данных. К сожалению, сейчас в нашей стране нет стандарта, распространяющегося на электрооборудование таких инфокоммуникационных объектов, как центры обработки данных. По этой причине в России все ЦОДы оснащаются и проектируются на основании требований американского стандарта с некоторыми поправками. По факту данный стандарт воспринимается всеми странами в качестве единого международного для дата-центров.

Нас в большей степени будет интересовать приложение G вышеуказанного стандарта, так как именно он регламентирует требования к электрооборудованию. Разберем и проанализируем основные требования к системе электроснабжения рассматриваемых сооружений.

В соответствии с [1] системы электрооборудования подразделяются на четыре уровня (или TIER).

Уровень 1 — базовый (начальный) уровень, применявшийся в 1960—70 годы. Система данного уровня подразумевает обеспечение наименьшего уровня надежности электропитания с целью удовлетворения потребностей электрических нагрузок. Электроснабжение выполняется с небольшим резервированием или совсем без него. Строение распределительных и групповых сетей осуществляется таким образом, что авария на какой-либо панели (щите) или на кабеле, а также ремонт и техническое обслуживание с выводом из эксплуатации способны повлечь за собой частичное или полное прерывание нормального функционирования. Также не предъявляются никакие требования по резервированию в месте ввода питания от энергосистемы.

Допускается установка генераторов, которые могут работать как по одному, так и параллельно. Обоснованием установки генераторов является увеличение выдаваемой мощности, но не резервирование. Обычно устанавливают автоматику, которая при прерывании питания от рабочего ввода запускает систему генераторов и переключает нагрузку на нее с основного ввода. Наличие автоматики также не является обязательным условием.

Могут приниматься к установке любые из ранее рассмотренных типов ИБП исполнением как одиночным блоком, так и в параллель с целью уве-

личения мощности. Должно быть предусмотрено наличие байпаса для сохранения непрерывности работы технологического оборудования в случае ремонта или технического обслуживания источника бесперебойного питания. Годовой простой может составить 28,8 ч. При таком простое коэффициент отказоустойчивости равен 99,671 %

Повышенные требования предъявляются к питающим трансформаторам и щитам. Они должны быть рассчитаны на работу с электронным оборудованием, являющимся источником высших гармоник. Допускается применение трансформаторов, способных гасить гармонические искажения.

Структурная схема системы электроснабжения центров обработки данных, относящихся к уровню 1, с наибольшим количеством применяемого оборудования представлена на рис. 1.

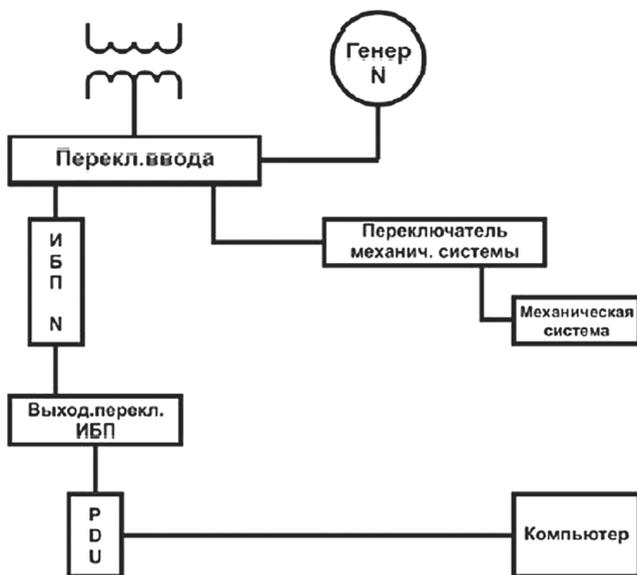


Рис. 1. Структурная схема СЭС уровня 1

Система заземления и уравнивания потенциалов (основная и дополнительная) должна отвечать минимальным требованиям. Наличие системы молниезащиты должно исходить из анализа риска удара молнии.

Нет никаких ограничений по способу прокладки электропроводки.

Уровень 2. Все требования, распространяющиеся на уровень 1, относятся и ко второму уровню. Также к рассматриваемому уровню относятся дополнительные требования.

К основному вводу от энергосистемы требования по резервированию не предъявляются. Система электроснабжения должна предусматривать наличие ИБП с резервированием ($N + 1$). Помимо основного ввода необходимо наличие генераторной установки, способной поддерживать питание всего оборудования ЦОДа. Допустимо наличие резервного генератора, но необязательно.

Для распределения электроэнергии между потребителями необходимы силовые распределительные щиты (PDU). Одна линия, проложенная от распределительного щита, должна питать не более одной серверной стойки. Иными словами, выбор магистральной схемы питания серверных стоек недопустим. Также оборудование каждой стойки должно иметь резервный ввод от другого распределительного щита. PDU может иметь резервный ввод. Это условие носит только рекомендательный характер. Простой за год не перешагнет отметку в 22 часа, а коэффициент отказоустойчивости будет равняться 99,741 %

Структурная схема системы электроснабжения центров обработки данных, относящихся к уровню 2, с наибольшим количеством применяемого оборудования представлена на рис. 2.

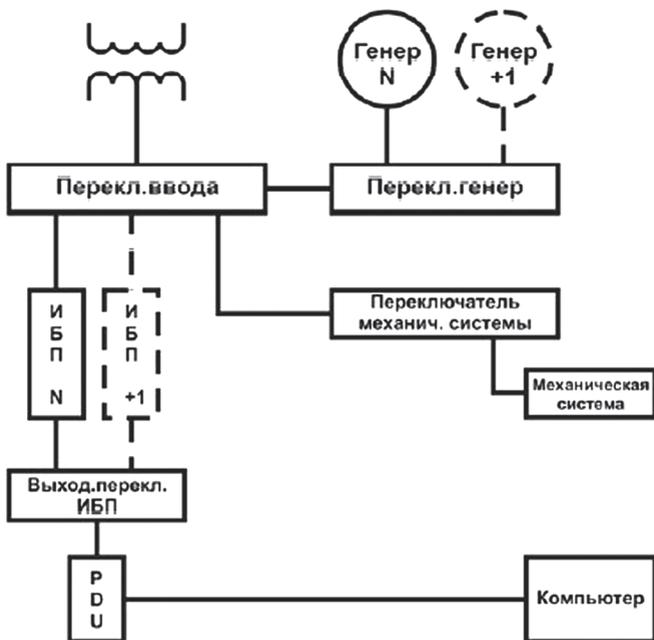


Рис. 2. Структурная схема СЭС уровня 2

В системе заземления необходимо предусмотреть общую соединительную сеть, также ее сопротивление не должно превышать значения в 5 Ом. Все электрооборудование ЦОДов питается на низком напряжении, а в нашей стране система заземления нейтрали на уровне напряжения 0,4 кВ, как правило, является глухозаземленной. В соответствии с [1] п. 1.7.101 сопротивление заземляющего устройства при таком напряжении не должно превышать значения в 4 Ом. Значит, при проектировании ЦОДа в России необходимо руководствоваться меньшим из приведенных значений.

Уровень 3. Все требования, распространяющиеся на уровень 2, относятся и к третьему уровню. Также к рассматриваемому уровню относятся дополнительные требования.

Все системы электроснабжения данного уровня, в том числе системы генераторов, ИБП, распределительная и питающая системы, должны иметь резервирование не ниже $(N + 1)$. Иными словами, все технологическое оборудование (серверные стойки, вентиляционные установки и кондиционеры машинных залов) оказывается зарезервированным. Такая схема электроснабжения позволит выполнять ремонтные работы или техническое обслуживание с выводом из эксплуатации без остановки работы оборудования, также отказ в работе одного из вводов не нарушит нормального функционирования технологического оборудования.

Структурная схема системы электроснабжения центров обработки данных, относящихся к уровню 3, с наибольшим количеством применяемого оборудования представлена на рис. 3. Требования к системе заземления предъявляются такие же, как на втором уровне.

Что касается переключений между вводами, «...можно использовать конфигурацию с автоматическим переключением между вводами...» [5], т.е. при электроснабжении ЦОДов третьего уровня необходим автоматический ввод резерва (АВР).

Предъявляется требование, что на объекте должно быть запасено топливо в таком количестве, чтобы его хватило на автономную работу от генератора в нормальном режиме в течение 24 ч. Также должна быть установлена автоматика, реагирующая на снижение мощности, поступающей из сети, и подающая сигнал на запуск генераторных установок.

Должна быть обязательно предусмотрена центральная система текущего контроля и управления питанием и наблюдения за окружающей средой, которая осуществляет текущий контроль над всеми видами крупного электрооборудования, куда относятся главные распределительные устройства, генераторные системы, автоматические переключатели, пункты управления электродвигателями, т.е. необходима диспетчеризация системы электроснабжения. При отказе основной системы контроля

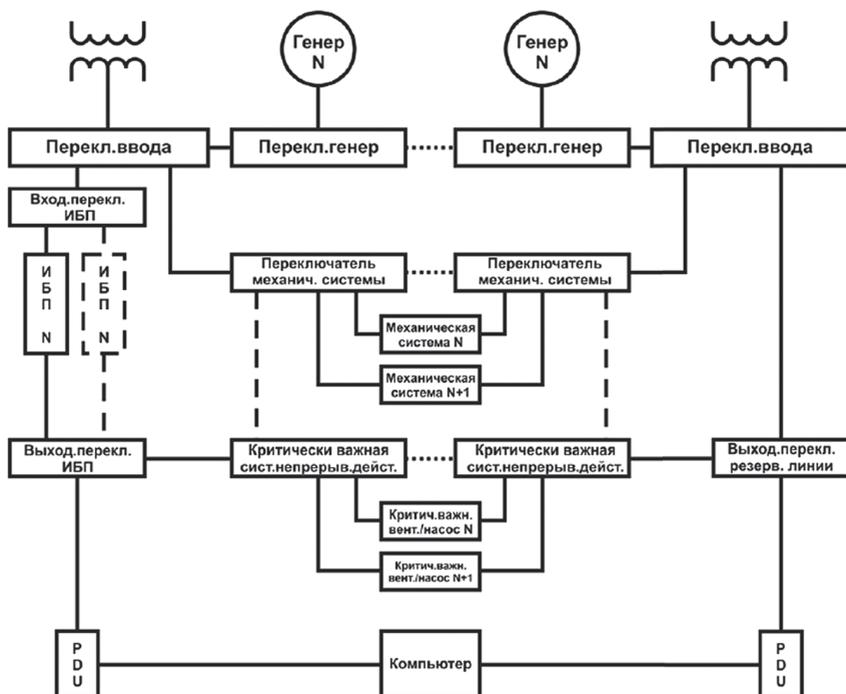


Рис. 3. Структурная схема СЭС уровня 3

должна быть предусмотрена резервная. Иными словами, должно осуществляться технологическое резервирование диспетчеризации и контроля. Простой за год не перешагнет отметку в 1,6 ч, а коэффициент отказоустойчивости будет равняться 99,98 %.

Уровень 4. Все требования, распространяющиеся на уровень 3, относятся и к четвертому уровню. Также к рассматриваемому уровню относятся дополнительные требования.

Структурная схема системы электроснабжения центров обработки данных, относящихся к уровню 4, с наибольшим количеством применяемого оборудования представлена на рис. 4.

Каждый элемент системы электроснабжения четвертого уровня должен соответствовать требованию по резервированию не ниже $2(N + 1)$. Для всего питающего оборудования, включая кабельные линии, должна быть предусмотрена возможность ручного обхода (байпаса) для осуществления технического обслуживания, ремонта или на случай отказа.

*Т.А. Сычев, SychevTA@yandex.ru,
Г.Р. Титова, TitovaGR@mpei.ru,
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва*

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОНЦЕРТНЫХ ЗАЛОВ

Трудно переоценить роль музыки в нашей жизни. С ее помощью человек всегда стремился передать свое настроение — начиная голосом и заканчивая сложными модульными синтезаторами, способными моделировать звуковые волны любых характеров и видов. Одним из связующих звеньев между человеком и музыкой являются концертные залы, служащие не только зданиями для выступлений, но и городскими акцентами, способствующими развитию событийного и культурного туризма.

Вопросы проектирования концертных залов являются актуальными, а с развитием технологий, применяемых к электроприемникам звукофикации и освещения, становятся более сложными и требующими новых решений.

В качестве объекта, позволяющего определить особенности, присущие проектированию электроснабжения концертных и театрально-зрелищных зданий, был выбран зал, рассчитанный на 1700 посадочных мест и предназначенный для концертов классической и популярной музыки.

Основными нормативными документами, регламентирующими выполнение систем электроснабжения концертных залов, являются:

- ПУЭ, седьмое издание, глава 7.2;
- СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение»;
- СП 309.1325800.2017 «Здания театрально-зрелищные. Правила проектирования»;
- ГОСТ Р 52736—2007 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического действия тока короткого замыкания».

Расчет внутренней сети электроснабжения начинаем с расчета системы электрического освещения. В концертных залах осуществляется рабочее, аварийное и постановочное освещение.

Рабочее освещение служит для обеспечения условий видения во время производственных работ на планшете, галереях, колосниках и карманах [1]. Освещенность для этого вида освещения должна находиться в пределах от 300 до 500 лк, а рекомендуемый цветовой диапазон температуры источников света должен составлять от 3500 до 5500 К [2].

Аварийное освещение служит для обеспечения эвакуации людей при отключении электроснабжения. Постановочное сценическое освещение

служит для оформления концертов, эстрадных представлений и является их составной частью. Система данного вида освещения должна быть составлена таким образом, чтобы давать возможность режиссерам и постановщикам решать на сцене самые разнообразные осветительные задачи.

Расчет количества светильников выполняем с помощью программы DIALux evo. Преимущество программы заключается в объемной встроенной базе данных светильников, включающей в себя приборы для постановочного и сценического освещения. Базы данных постоянно обновляются мировыми производителями.

Для светотехнического расчета DIALux evo использует метод коэффициента использования светового потока, позволяющий проводить расчет осветительной установки с учетом прямой и отраженной составляющих освещенности. Учитываются следующие характеристики: необходимый заданный уровень освещенности, размеры помещения, коэффициент запаса, учитывающий снижение со временем светового потока ламп, световой поток ламп в светильнике и коэффициент использования светового потока.

Результаты моделирования рабочего, аварийного и постановочного освещения представлены на рис. 1—3.

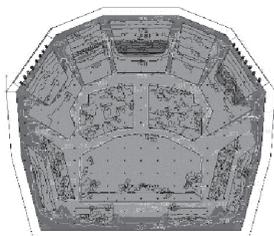


Рис. 1. Рабочее освещение

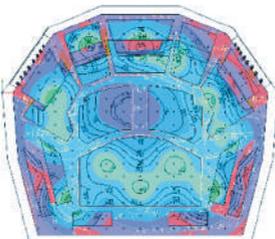


Рис. 2. Аварийное освещение

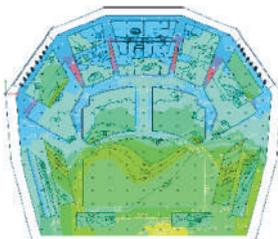


Рис. 3. Постановочное освещение

Для расчета электрических нагрузок необходимы данные об электроприемниках концертного зала. На основании спецификации оборудования проводятся его классификация по назначению и расчет методом коэффициента спроса. Суть данного метода: расчетная максимальная нагрузка находится как произведение коэффициента спроса на номинальную мощность электроприемника. Получена полная мощность здания: $S_{\text{расч.з}} = 417,8$ кВА.

Проводим разбиение электроприемников на группы и рассчитываем нагрузку силовых пунктов. Питание электроприемников постановочного освещения, электроприводов сцены (при количестве 10 и более) и звукотехнических устройств должно осуществляться двумя линиями от разных секций ТП.

Следующим шагом является выбор мощности и количества трансформаторов ТП согласно требуемой степени надежности и расчетной мощности объекта. При внутренней установке на встроенных ТП и КТП рекомендуется использование масляных трансформаторов, однако важно помнить об ограничениях по их мощности и количеству — до 1000 кВА каждый и не более двух.

Номинальная мощность каждого из двух масляных трансформаторов на ТП определяется из условия обеспечения одним из трансформаторов полной необходимой мощности с учетом перегрузки до 40 % не более 6 ч в течение не более 5 суток. Для сухих же трансформаторов допустимая перегрузка составит до 30 %.

К установке принимаем два масляных трансформатора номинальной мощностью $S_{\text{ном.ТП}} = 320$ кВА. Коэффициент загрузки составляет 0,65. Для двухтрансформаторных подстанций при преобладании нагрузок первой категории коэффициент загрузки трансформаторов K_3 принимается в пределах 0,6—0,7 [3].

Для построения схемы сети на напряжении 0,4 кВ учитываются категории электроприемников. Первая категория — электродвигатели пожарных насосов и электроприемники, противодействующие пожару и обеспечивающие безопасность. Вторая категория — электродвигатели сценических механизмов, звуковое оборудование (цифровая микшерная система, порталы, акустика ближнего поля, линии задержки, активные сценические мониторы и т.д.) и светотехническое оборудование. Третья категория — все остальное.

В здании концертного зала устанавливаем одно общее ВРУ, предназначенное для приема электроэнергии от городской сети и дальнейшего распределения ее между потребителями IУР с помощью радиальных линий.

После того, как конфигурация внутренней сети электроснабжения определена, осуществляется выбор сечений кабельных линий электрической сети на напряжении 0,4 кВ. Для концертных залов принимаемый материал жилы — медь, а сам кабель не должен распространять горение. Выбираем кабель марки ВВГнг — FRLS (огнестойкий с медными жилами, изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридных композиций пониженной пожароопасности). Расчетная токовая нагрузка линии определяется по формуле

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} U_{\text{ном}}}, \quad (1)$$

где S_p — расчетная мощность линии, $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение сети.

Предварительно определяется сечение кабеля по найденному расчетному току нормального режима из условия формулы [2]

$$I_p \leq I_{\text{доп}} k_{\text{п}}, \quad (2)$$

где $k_{\text{п}}$ — коэффициент, учитывающий способ прокладки кабеля и зависящий от температуры окружающей среды, способа прокладки (в штукатурке или трубах) и взаимного влияния проложенных рядом кабелей.

Кроме того, необходимо учесть требования по минимальному допустимому сечению кабельных линий 0,4 кВ — 1,5 мм² для осветительной сети и 2,5 мм² для розеточной сети. После предварительного выбора сечения кабель подлежит проверке по допустимой потере напряжения.

Расчет токов короткого замыкания в сетях 0,4 кВ концертного зала, проводимый с целью выбора аппаратов защиты и проверки сечений проводников на термическую стойкость, должен быть выполнен в соответствии с ГОСТ 28249—93 и ГОСТ Р 52736—2007.

Учитываются индуктивные сопротивления всех элементов короткозамкнутой цепи, включая силовые трансформаторы, проводники, трансформаторы тока, реакторы, токовые катушки автоматических выключателей, активные сопротивления элементов короткозамкнутой цепи, активные сопротивления различных контактов и контактных соединений [4]. Выделяются характерные точки, в которых необходимо проверить значения токов трехфазного и однофазного короткого замыкания — на шинах низкого напряжения ТП, в точках присоединения распределительных щитов РЩ.

На рисунках 4 и 5 представлены схемы замещения для расчета трехфазного и однофазного токов короткого замыкания в конце кабельной линии, питающей один из РЩ.

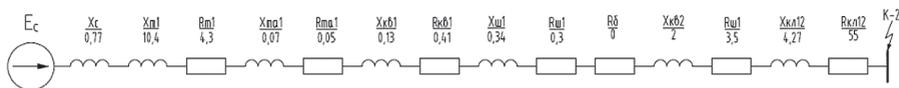


Рис. 4. Схема замещения для расчета трехфазного тока КЗ

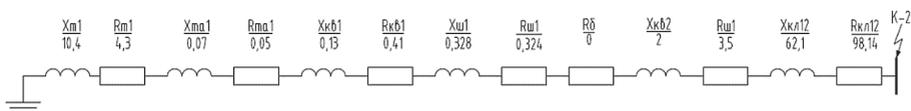


Рис. 5. Схема замещения для расчета однофазного тока КЗ

Определяем суммарное активное и реактивное сопротивления прямой и нулевой последовательности от системы до предполагаемой точки КЗ.

Далее, зная эти данные, выполняем расчет периодической составляющей тока КЗ, постоянной времени затухания аperiodической составляющей и величины ударного тока КЗ.

При протекании токов КЗ по проводникам их температура возрастает, что может оказать разрушительное действие на изоляцию и жилу кабеля раньше, чем аппараты защиты «почувствуют» и отключат сверхток. Поэтому так важен расчет термического действия токов короткого замыкания на проводники. Имея значения расчетного и допустимого токов, протекающих через кабель в нормальном режиме, находят начальную температуру жилы по формуле

$$\vartheta_{\text{ж}}^{\text{п}} = (\vartheta_{\text{ж}}^{\text{д}} - \vartheta_{\text{о.с}}) \left(\frac{I_{\text{р}}}{I_{\text{д}}} \right)^2 + \vartheta_{\text{о.с}}, \quad (3)$$

где $\vartheta_{\text{ж}}^{\text{п}}$ — начальная температура жилы; $\vartheta_{\text{ж}}^{\text{д}}$ — температура жилы при нагреве длительно допустимым током; $\vartheta_{\text{о.с}}$ — температура окружающей среды.

Зная расчетный ток трехфазного симметричного КЗ в выбранной точке, рассчитываем интеграл Джоуля по формуле

$$B_{\text{к}} = I_{\text{к}}^2 \left[t_{\text{откл}} + T \left(1 - e^{-2 \frac{t_{\text{откл}}}{T}} \right) \right], \quad (4)$$

где $t_{\text{откл}}$ — время отключения КЗ автоматическим выключателем; T — постоянная времени затухания аperiodической составляющей.

При помощи справочных таблиц определяем $\vartheta_{\text{КЗ}}$ — температуру кабеля при возможном коротком замыкании, и сверяем ее с допустимым значением.

Завершающий этап проектирования — выбор коммутационных и защитных аппаратов. Автоматические выключатели предназначены для отключения питания при протекании по проводнику токов перегрузки раньше, чем данный ток вызовет повышение температуры проводника, опасное для изоляции.

Выбор осуществляется по следующим критериям:

$$U_{\text{нв}} \leq U_{\text{ном}}; \quad (5)$$

$$I_{\text{раб}} \leq I_{\text{ном}} \leq I_{\text{доп}}; \quad (6)$$

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} \leq I_{\text{CSQF}}; \quad (7)$$

где $U_{\text{нв}}$ — номинальное напряжение выключателя; $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение сети; $I_{\text{раб}}$ — рабочий ток цепи, А; $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток устройства защиты, А; $I_{\text{доп}}$ — допустимый длительный ток кабеля, А; I_{CSQF} — номинальная рабочая отключающая способность выключателя.

Пример выбора автоматического выключателя линии, питающей один из распределительных щитов, представлен в таблице.

Т а б л и ц а 1

Выбор автоматического выключателя линии питания ЩР

Критерий	Исходные данные		Условие	Вариант аппарата: NZMB1 — A80-SVE	
1	Число полюсов	3	=	Число полюсов	3
2	Номинальное напряжение сети, В	400	≤	Номинальное рабочее напряжение, В	400
3	Расчетный ток кабеля, А	67,36	≤	Номинальный длительный ток, А	80
4	Ток трехфазного КЗ $I_{\text{КЗ}}^{(3)}$, кА	3,5	≤	Номинальная рабочая отключающая способность I_{CSQF} , кА	25

Приведенный расчет электроснабжения концертного зала иллюстрирует требования к проектированию театрально-зрелищных зданий, последовательность выполняемых вычислений и возможности использования специализированных программ.

Литература

1. **Ашкенази Г.И., Холмский Р.М.** Электрооборудование театрально-зрелищных зданий. М.—Л. Госэнергоиздат, 1961.
2. **Анчарова Т.В., Рашевская М.А.** Электроснабжение зданий. Часть 1. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2012. 84 с.
3. **Кудрин Б.И.** Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для студентов высших учебных заведений. М.: Интернет Инжиниринг, 2006. 672 с.
4. **Анчарова Т.В., Рашевская М.А.** Электроснабжение зданий. Часть 2. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2012. 76 с.

*Е.Г.Андреева, lenandr02@yandex.ru,
А.С.Карев, shura.karev.1999@mail.ru,
Омский ГТУ*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ ДОМОХОЗЯЙСТВА НА ЕГО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ

Электричество играет важную роль в современном экономическом и социальном развитии. Спрос на промышленную электроэнергию растет с развитием экономики. Кроме того, потребление электроэнергии в жилых домах также значительно увеличивается с улучшением уровня жизни. Электроэнергетика стала фундаментальной отраслью и важной общественной полезностью, поддерживающей развитие национальных экономик. Между тем мир сталкивается с серьезной нехваткой ресурсов, загрязнением окружающей среды, парниковым эффектом и другими сложными проблемами. Поэтому для решения этих проблем необходимо разработать более чистое производство энергии и интеллектуальные энергетические системы.

Информационные и коммуникационные технологии (ИКТ) широко используются в электроэнергетических системах, что делает энергосистемы цифровыми, интеллектуальными, эффективными и надежными. Интеллектуальная сеть станет тенденцией в развитии электроэнергетической системы. ИКТ нового поколения (облачные вычисления, анализ больших данных и интернет-вещей) широко используются в конструировании и развитии интеллектуальных сетей в электроэнергетике.

На сегодняшний день на электроснабжение домохозяйств приходится значительная доля объема энергопотребления. Оптимизации энергопотребления в бытовом секторе уделяется большое внимание.

Согласно приказу Росстата № 553 от 17.09.2020 г. (п. 2.4.1) «домохозяйство — это лица, проживающие в жилом доме, квартире или комнате либо части жилого дома или квартиры, совместно обеспечивающие себя продуктами питания и другими необходимыми средствами к существованию, объединяя полностью или частично свои доходы. Данные люди могут быть связаны родственными отношениями, или связаны отношениями брака, а также не являться родственниками» [1].

Моделирование потребления электроэнергии домохозяйством зависит от структуры используемых бытовых электрических устройств.

При проведении исследований электропотребления домохозяйства группируются по типу жилья (многоквартирный дом, индивидуальные

коттеджи, сельские дома и прочее). При расчетах потребления электроэнергии бытовыми электроприборами очень часто отсутствует статистика по составу энергооборудования домохозяйств. Два важных вопроса касаются потребления электроэнергии в бытовом секторе (населением):

1) каковы реальные объемы потребления электроэнергии в быту регионов России;

2) какова оплата электроэнергии домашними хозяйствами [2].

По оперативным данным филиала АО «СО ЕЭС» — Омское РДУ «в июне 2022 г. потребление электроэнергии в Омской области составило 783,9 млн кВт·ч, что на 1,9 % больше объема потребления за июнь 2021 г. Выработка электроэнергии электростанциями Омской области в июне 2022 г. составила 307,7 млн кВт·ч, что на 1,9 % больше объема выработки за июнь 2021 года» [3].

При определении основных закономерностей энергопотребления в РФ строятся суточные графики потребления электроэнергии в различные периоды времени [4].

Проведен аналитический расчет по потреблению в осенний период на примере домохозяйств из трех квартир в многоквартирном доме. Состав электроприемников (ЭП) в трех исследуемых квартирах формируется из следующих бытовых электроприборов: телевизор, электрическая лампочка, мясорубка, миксер, персональный компьютер, холодильник, духовой шкаф, стиральная машина, пылесос, фен, зарядное устройство, утюг, мультиварка, тостер, бойлер, чайник, микроволновка, морозильная камера. Площадь квартир составляет: 84,5 м², 53,6 м², 40,8 м². Категория надежности — третья. Система заземления TN—С—S. Немаловажную роль играет количество проживающих человек: в первой квартире проживают 4 человека, во второй — 2 человека, а в третьей — 3 человека. Кроме того, электрическая нагрузка квартиры зависит от времени года, длительности светового дня, длительности использования приемников.

Расчетная мощность ЭП квартиры P_p , кВт, определяется по методу коэффициента спроса и вычисляется по формуле

$$P_p = \sum P_{\text{ном } i} K_{c i}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ном } i}$ — номинальная мощность i -го ЭП квартиры, кВт; $K_{c i}$ — коэффициент спроса i -го ЭП квартиры.

Расчетный ток линии I_p , А, определяется из расчетной мощности:

$$I_p = \frac{P_p}{U_{\text{ном}} \cos \varphi}, \quad (2)$$

где $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение питающей сети, кВ; $\cos \varphi$ — средневзвешенный коэффициент мощности ЭП квартиры. Как правило, значение средневзвешенного коэффициента мощности $\cos \varphi_{\text{ср}}$ составляет 0,95.

Расчет по каждой из трех квартир приведен в таблице. На рисунках 1 и 2 приведены суточные графики нагрузки для первой и второй квартир по показаниям приборов учета электроэнергии. Из полученных данных видно, что в зимний период потребление электроэнергии возрастает примерно в 1,5 раза.

Т а б л и ц а

Результаты расчетов

Характеристика квартиры	P_p , кВт	I_p , А
1-я квартира (4 человека, 84,5 м ²)	3,471	16,61
2-я квартира (2 человека, 53,6 м ²)	4,573	21,89
3-я квартира (3 человека, 40,8 м ²)	1,883	9,0

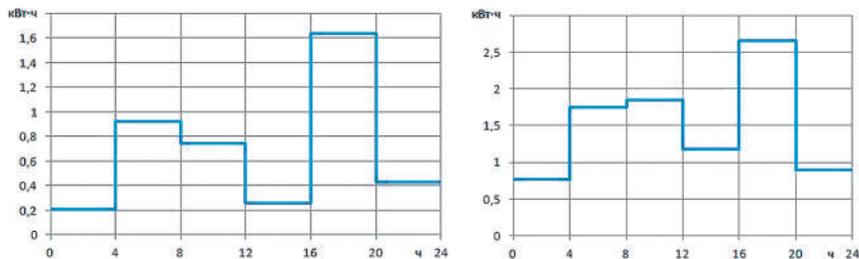


Рис. 1. Суточные графики нагрузки первой квартиры за сентябрь и январь

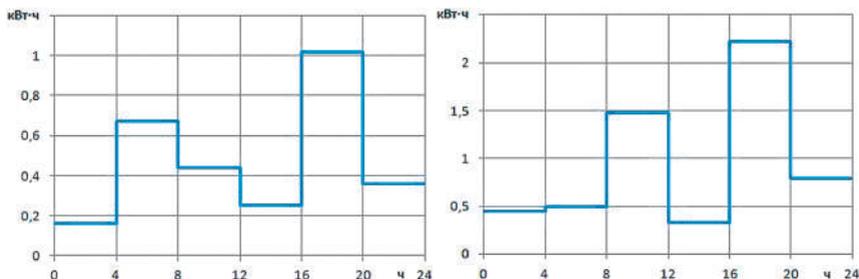


Рис. 2. Суточные графики нагрузки второй квартиры за сентябрь и январь

Проведено аналитическое исследование, из которого видно, что энергопотребление домохозяйств зависит от многих факторов. Основными являются: изменение коэффициента спроса, количество и состав, а также режим работы электроприемников, длительность светового дня, количество проживающих человек. Данные факторы являются техническими.

К экономическим факторам относят: величина тарифа — зависит от места проживания человека (область, регион, город, село), вид домохозяйства. В данном исследовании они не учитывались.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что для оптимизации электропотребления домохозяйств следует использовать системы Smart Grid (умные сети) и Smart Home (умный дом). Данные системы смогут автоматически регулировать работу электроприемников, что позволит сократить электропотребление в домохозяйстве в целом.

Литература

1. **Приказ** Росстата от 17.09.2020 г. № 553 «Об утверждении документов Всероссийской переписи населения 2020 года». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_377126/15efa26b630ff9d53422c77ce29919ae54f76e4d/ (дата обращения 25.04.2022).
2. **Гребенюк Г.Г.** Оптимизация энергопотребления домохозяйства на основе прогноза графика максимальной нагрузки бытовых приборов // Управление большими системами. 2017. № 69. С. 50—75.
3. **Потребление** электроэнергии в энергосистеме Омской области в первом полугодии 2022 года увеличилось на 0,6 % относительно первого полугодия 2021 года. URL: <https://www.so-ups.ru/odu-siberia/news/odu-siberia-news-view/news/18922/> (дата обращения: 16.09.2022 г.).
4. **Сенчук Д.А., Цырук С.А., Матюнина Ю.В.** Разработка алгоритма ценозависимого управления потреблением электрической энергии на промышленном предприятии // Промышленная энергетика. 2020. № 4. С. 2—7.

*А.Б. Дарьенков, darenkov@nntu.ru,
А.В. Шалухо, shaluhov@nntu.ru,
Ю.Н. Шувалова, yulia.shuvalova2017@yandex.ru,
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева»*

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ДЕГРАДАЦИИ В МЕМБРАНОЭЛЕКТРОДНОМ БЛОКЕ ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА С ПОЛИМЕРНОЙ ПРОТОНООБМЕННОЙ МЕМБРАНОЙ

Одно из направлений развития современной электроэнергетики связано с расширением использования водорода для производства электроэнергии [1]. Ключевой технологией водородной энергетики являются топливные элементы (ТЭ) — химические источники тока, обеспечивающие прямое преобразование химической энергии топлива в электрическую. По сравнению с традиционными энергоустановками ТЭ обладают рядом преимуществ: высоким КПД, экологичностью, отсутствием шума, модульностью конструкции [2].

В настоящее время наиболее распространенным типом ТЭ являются низкотемпературные топливные элементы с протонообменной мембраной (ПОМТЭ), которые характеризуются быстрым запуском, простотой эксплуатации, высокой удельной мощностью. Однако широкому использованию ПОМТЭ, например, в системах электроснабжения стационарных потребителей препятствует ряд технических проблем, одна из которых связана с недостаточным и неопределенным ресурсом работы.

В процессе эксплуатации водородного ТЭ протекают процессы, приводящие к деградации мембрано-электродного блока (МЭБ), в результате чего срок службы ТЭ может варьироваться. Для решения проблемы долговечности ПОМТЭ требуется изучение процессов деградации и способов противодействия им.

Статья посвящена задачам обобщения данных об известных причинах деградации МЭБ, способах их профилактики и подходах к активации МЭБ.

Принцип работы ТЭ и структура МЭБ. На представленном рисунке приведена структура ПОМТЭ. МЭБ включает в себя протонообменную мембрану; катализаторы; газодиффузионные слои.

Основными функциями протонообменной мембраны являются разделение анодной (с водородом) и катодной (с кислородом или воздухом) областей, перенос протонов с анода на катод. Через пористые газодиффу-

зионные слои (ГДС) производятся токосъемом, подвод исходных реагентов и отвод продуктов реакции. Как правило, ГДС изготавливаются из углеродных материалов.

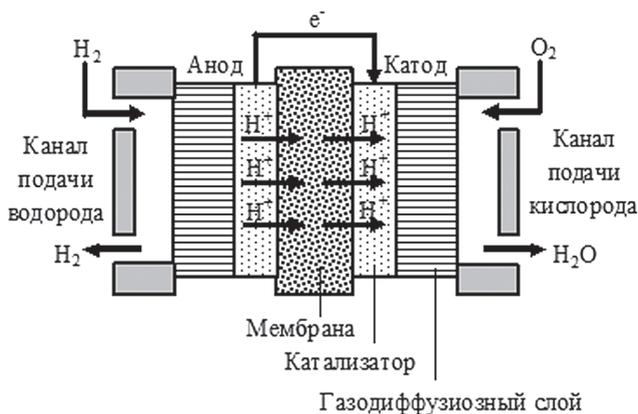


Рисунок. Структура ТЭ

В качестве катализаторов обычно используют платиновую чернь или платину на каком-либо углеродном носителе (сажа, углеродные нановолокна, нанотрубки). Катализаторы могут быть нанесены на протонообменную мембрану, на ГДС или на то и другое одновременно.

Анализ причин деградации МЭБ. В качестве основных можно выделить следующие причины деградации МЭБ.

1. Химическая деградация мембран связана с образованием перекиси водорода в результате реакции окисления водорода до воды [2, 3]. Перекись водорода и соответствующие радикалы создают окисляющую среду, которая может привести к значительным потерям напряжения, исчезновению пиковой мощности и снижению способности удаления воды, особенно в области высоких токов.

2. Физическая деградация мембран связана с неупругими деформациями, формированием дефектов и переорганизацией структуры полимера [2, 4, 5]. Механическая деградация приводит к неоднородному изменению морфологии мембраны, ее разрушению, потере политетрафторэтилена, а также увеличению контактного сопротивления.

3. Примеси, содержащиеся в водороде и воздухе, которые подаются к работающему ТЭ, могут оказывать негативное действие на электрохимические реакции в электродах и, как следствие, на производительность ТЭ.

Например, водород, получаемый риформингом природного газа, метанола, бензина, и т.п., содержит СО и сероводород, которые прочно оседают на платине, блокируя катализатор [7].

4. При низких температурах работа ТЭ нарушается из-за ограниченной способности передачи газов, замерзания воды, образования большого количества льда. При холодном запуске происходит механическое разрушение МЭБ, что также может привести к потере энергетической производительности и механической прочности [7, 8].

5. Повышенные потенциалы (например, в режиме разомкнутой цепи), а также циклическое изменение потенциала (динамическая нагрузка) способствуют растворению и переосаждению платины. Это приводит к укрупнению частиц и потере электрохимически активной поверхности, что исключает платину из процесса катализа [9, 10].

6. Дегградация углеродного адсорбента, применяющегося в качестве носителей катализаторов, может привести к потере электрического контакта между носителем и катализатором, что исключает платиновую частицу из процесса катализа [2].

7. В силу дегградационно-окислительных процессов при долговременной работе ТЭ происходит изменение водного баланса, который влияет на электрохимические характеристики и время работы ТЭ [12].

Наибольшее влияние на работоспособность и долговечность ПОМТЭ оказывают химическая дегградация мембраны и дегградация углерода, поскольку эти процессы протекают при любом режиме работы ТЭ. Следует отметить, что дегградация одного элемента МЭБ приводит к изменению работы и других частей ПОМТЭ, поэтому в реальных условиях точно определить исходную причину старения достаточно сложно.

Анализ способов профилактики дегградации и активации МЭБ. Полностью исключить дегградационные процессы невозможно, поэтому для снижения скорости и последствий дегградации разрабатываются специальные способы внешнего воздействия на МЭБ.

Снизить интенсивность пероксидной дегградации мембран можно, уменьшая степень загрязнения МЭБ ионами металлов, используя агенты, связывающие радикалы, минимизируя кроссовер кислорода.

В качестве способов снижения дегградации МЭБ ТЭ при холодном запуске рассматриваются поддержание электродов в слегка увлажненном состоянии, а также продувка газом после работы, что способствует удалению воды на время остановки.

Альтернативные типы носителей применяют для снижения дегградаций катализаторов. Новые носители характеризуются улучшенными характеристиками, в том числе повышенной стабильностью. К ним можно отне-

сти углеродные нанотрубки, электропроводящие оксиды металлов, электропроводящие полимеры и др.

Кроме вышеперечисленных частных методов профилактики деградации могут применяться специальные способы активации МЭБ, направленные на восстановление свойств ТЭ [14, 15]. Перечислим их.

1. Управление током.

1.1. *Активация постоянным током* заключается в поддержании тока элемента на определенном уровне в течение нескольких часов, что способствует удалению примесей и снижению сопротивления переносу протонов. Метод распространен из-за простоты эксплуатации, но значение тока необходимо регулировать с учетом характеристик реального ТЭ.

1.2. *Постепенная активация током* представляет собой последовательное увеличение плотности тока до момента улучшения производительности ТЭ. Метод имеет недостатки — длительное время и большое потребление водорода.

1.3. *Активация импульсом высокого тока* заключается в пропускании через ТЭ пикового переменного тока с определенным периодом в заданном цикле. Импульсы пикового тока обеспечивают быструю активацию, однако неправильно выбранные параметры тока могут способствовать повреждению ТЭ.

2. Управление напряжением.

Аналогично управлению током, управление напряжением заключается в регулировании напряжения элемента для активации ТЭ. Операции, механизмы, влияние на деградацию, преимущества и недостатки схожи с управлением током. Однако некоторые реакции удаления оксидов происходят только при фиксированной разности потенциалов, поэтому регулирование напряжения может обеспечить лучший результат в удалении оксидов.

3. *Подача водорода и азота* на анод и катод соответственно также позволяет активировать ТЭ при определенном токе возбуждения. В результате химических реакций, проходящих внутри ТЭ, производительность элемента увеличивается во всем диапазоне токов.

4. *Управляемое катодное голодание* достигается благодаря регулированию подачи реагентов и позволяет добиться быстрой активации. Использование данного способа активации позволяет добиться восстановления оксидов. Однако неправильно подобранные значения напряжений и токов могут привести к быстрому старению и деградации ТЭ.

Данные о причинах, последствиях деградации МЭБ, способах их профилактики и активации ТЭ приведены в таблице.

Причины деградации МЭБ и способы их профилактики

Способ деградации	Окисление	Механическая деградация	Работа при низких температурах	Отравление примесями водорода	Растворение катализатора	Деградация углерода
Последствия деградации	Снижение производительности ТЭ; уменьшение срока службы					
	Изменение водного баланса; снижение механической прочности МЭБ; снижение содержания углерода	Неоднородное изменение морфологии мембраны; разрушение мембраны; потеря политетрафторэтилена; расслоение частей МЭБ, что приводит к более высокому контактному сопротивлению		Блокирование катализатора; укрупнение частиц; исключение платины из процесса катализа; ухудшение управления водными ресурсами; изменение морфологии МЭБ		
Способы профилактики деградации	Уменьшение степени загрязнения МЭБ; уменьшение кроссовера кислорода; воздействие водородом при хранении	Оптимизация условий пользования и влияния внешних факторов	Продувка инертным газом после работы; воздействие водородом при хранении	Использование топлива с минимальным количеством примесей	Поиск новых носителей катализаторов; воздействие водородом при хранении	
Способы активации ТЭ	Активация постоянным током и напряжением; постепенная активация током и напряжением; перекачка водорода; катодное голодание	Активация импульсным током и напряжением	Активация перекачкой водорода	Активация постоянным током и напряжением; постепенная активация током и напряжением; перекачка водорода	Любой способ	

Заключение. В настоящее время ПОМТЭ рассматриваются в качестве перспективного источника питания для стационарных потребителей. Однако для расширения использования ПОМТЭ требуется в том числе решение задач по повышению ресурса работы. На срок службы ПОМТЭ в большой степени влияет деградация МЭБ.

В работе проведен анализ причин, последствий деградации и способов профилактики деградации МЭБ. Дальнейшие исследования будут по-

связаны изучению снижения последствий деградаций, восстановления свойств МЭБ с помощью активации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51016.

Литература

1. **Бедретдинов Р.Ш.** Экономическая оценка эффективности применения гибридного энергетического комплекса на основе водорода // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 4. С. 47—58.
2. **Шалухо А.В., Липужин И.А., Шароватов Р.А.** Автономная система электрообеспечения сельскохозяйственного предприятия с твердооксидными топливными элементами // Фёдоровские чтения — 2021: LI международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2021.
3. **Influence** of artificially aged gas diffusion layers on the water management of polymer electrolyte membrane fuel cells analyzed with in-operando synchrotron imaging / T. Arlt, M. Klages, M. Messerschmidt et al. // URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.061>.
4. **Carral C., Melé P.** A constitutive law to predict the compression of gas diffusion layers // URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.210>
5. **Electrical** resistance and microstructure of typical gas diffusion layers for proton exchange membrane fuel cell under compression / D. Qiu, H. Janßen, L. Peng et al. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.117>
6. **Протонообменные** мембраны для водородно-воздушных топливных элементов / Ю.А. Добровольский, Е.В. Волков, А.В. Писарева и др. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/protonoobmennyye-membrany-dlya-vodorodno-vozdushnyh-toplivnyh-elementov>
7. **Pan Y., Wang H., Brandon N.P.** Gas diffusion layer degradation in proton exchange membrane fuel cells: Mechanisms, characterization techniques and modelling approaches. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230560>
8. **Alink R., Gerteisen D., Oszcipok M.** Degradation effects in polymer electrolyte membrane fuel cell stacks by sub-zero operation — An in situ and ex situ analysis. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.03.074>
9. **Корчагин О.В., Тарасевич М.Р.** Токогенерирующие реакции в топливных элементах с протонопроводящим и анионопроводящим электролитами. М.: Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, 2014.
10. **A review** on performance degradation of proton exchange membrane fuel cells during startup and shutdown processes: Causes, consequences, and mitigation strategies / Y. Yu, H. Li, H. Wang et al. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.059>

11. **Electrochemical** durability of gas diffusion layer under simulated proton exchange membrane fuel cell conditions / G. Chen, H. Zhang, H. Ma, H. Zhong. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.07.085>
12. **Combined** electrochemical and surface analysis investigation of degradation processes in polymer electrolyte membrane fuel cells / M. Schulze, N. Wagner, T. Kaz, K.A. Friedrich. URL: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.05.063>
13. **Degradations** in porous components of a proton exchange membrane fuel cell under freeze-thaw cycles: Morphology and microstructure effects / A. Ozden et al. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.209>
14. **Activation** of polymer electrolyte membrane fuel cells: Mechanisms, procedures, and evaluation / Pei P., Fu X., Zhu Z. et al. D.URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.228>
15. **Импульсная** активация топливного элемента на основе протонпроводящей полимерной мембраны / Е.А. Галицкая, Е.В. Герасимова, Ю.А. Добровольский и др. М.: Институт физики твердого тела РАН, 2018.

*3.3. Туйчиев, tuychiev7055@gmail.com,
Ферганский политехнический институт, Узбекистан,
Д.Т. Юсупов, dilmurod85@list.ru,
Институт проблемы энергетики РУз АН, Узбекистан*

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СИММЕТРИРУЮЩЕГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Надежность электроснабжения, определяемая состоянием энергосистем и работающих в них силовых трансформаторов, является важной проблемой, поэтому вопросам увеличения срока службы этого электрооборудования придается особое значение [1]. Одним из факторов, приводящих к выходу из строя силовых трансформаторов 10/0,4 кВ, является несимметрия тока и напряжения.

Несимметрия напряжения в электрических сетях 10/0,4 кВ возникает в основном за счет подключения однофазных малоомощных потребителей [4], при этом существенно влияет на состояние трансформаторов и сокращает срок их службы [4]. При несимметрии тока 10 % из-за снижения изоляционных свойств срок службы трансформатора уменьшается на 16 % [4, 5].

С помощью модели лабораторной сборки LD DIDACTIC [3] (рис. 1) создано несимметричное состояние напряжений в сети и проведены экспериментальные исследования. Результаты представлены в табл. 1.

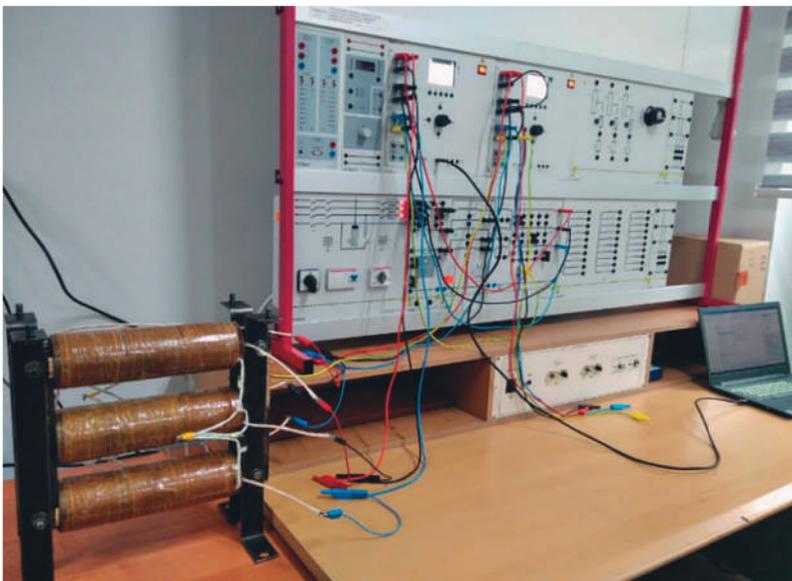


Рис. 1. Проведение экспериментальных исследований с использованием трехфазного симметрирующего силового трансформатора и макета лабораторной сборки LD DIDACTIC

Таблица 1

Результаты исследований несимметрии с использованием лабораторной модели LD DIDACTIC [3]

$t, \text{с}$	$U_A, \text{В}$	$U_B, \text{В}$	$U_C, \text{В}$	Φ_{UA}	Φ_{UB}	Φ_{UC}
0,0	243,3	246,7	208,2	0,0	110,3	-124,8
0,1	243,3	246,7	208,2	0,0	110,2	-124,7
0,2	243,3	246,8	208,2	0,0	110,2	-124,7
0,3	243,3	246,8	208,2	0,0	110,2	-124,7
0,4	243,3	246,7	208,2	0,0	110,2	-124,7
0,5	243,3	246,7	208,3	0,0	110,2	-124,7

Таким образом, коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности сети составляет $K_0 = 10,36 \%$, что не соответствует требованиям ГОСТ 32144—2013 [2].

С помощью лабораторной модели LD DIDACTIC [3] было проведено экспериментальное исследование по балансировке несимметричных напряжений в сети через симметрирующий силовой трансформатор; результаты напряжения для каждой фазы на нижней стороне симметрирующего силового трансформатора были определены экспериментальным путем. В результате получены напряжения на нижней стороне симметрирующего силового трансформатора в рабочем состоянии (рис. 2): $U_A = 234,4$ В; $U_B = 238,3$ В; $U_C = 237,8$ В; значения между векторами $\varphi_A = 0^\circ$; $\varphi_B = 120,1^\circ$; Определено, что $\varphi_C = -120,1^\circ$

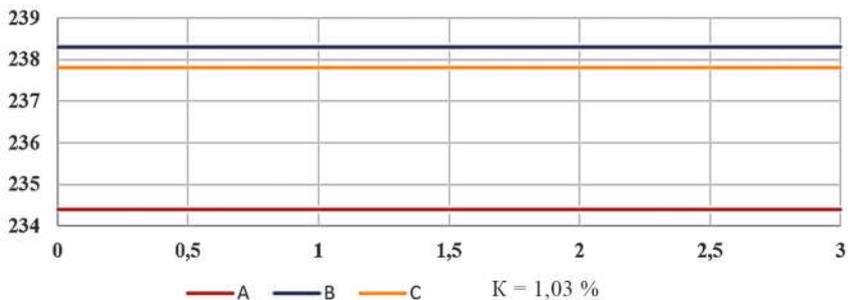


Рис. 2. График напряжений на фазах симметрирующего силового трансформатора при нормальной работе

Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности составляет $K_0 = 1,03$ %, т.е. симметрирующий трансформатор привел напряжения в соответствии с требованиями ГОСТ 32144—2013 [2].

Следующий опыт заключается в подключении симметрирующего силового трансформатора к симметричной сети и подключении к стороне низшего напряжения несимметричной активной нагрузки по фазам: $P_A = 0,147$ кВт; $P_B = 0$ кВт; $P_C = 0,150$ кВт. Результаты экспериментального исследования представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты для случая симметричной сети и несимметричной активной нагрузки

P_A , кВт	P_B , кВт	P_C , кВт	I_A , А	I_B , А	I_C , А
0,147	0,0	0,150	0,662	0,002	0,656
U_A , В	φ_{UA}	U_B , В	φ_{UB}	U_C , В	φ_{UC}
222,9	0,0	228,8	121	229,4	-120,0

В экспериментальном исследовании коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности составил $K_0 = 1,82\%$, что не превышает значения 2% , требуемого ГОСТ 32144—2013 [2].

Выводы. Результаты экспериментальных исследований, проведенных с использованием трехфазного симметрирующего силового трансформатора и лабораторной модели LD DIDACTIC [3], показали, что даже в случае несимметричной нагрузки возможно привести коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности к требованиям ГОСТ 32144—2013 [2]. Это позволит повысить надежность работы трансформаторов.

Литература

1. **Statistical Review of World Energy**, 67-th edition, June 2018.
2. **ГОСТ 32144—2013**. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.
3. [Электронный ресурс]. URL: www.ld-didactic.com.
4. **Faiz J., Ghazizadeh M., Oraee H.** Derating of transformers under non—linear load current and non-sinusoidal voltage—an overview // IET Electric Power Applications. July 2015. P. 486—495.
5. **Управление качеством электроэнергии: учебное пособие** / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. 347 с.
6. **Tuychiyev Z.Z., Yusupov D.T.** Determination of asymmetrical position of 10/0,4 kV power transformers in operational condition // Scientific and Technical Journal Namangan Institute of Engineering and Technology. 2022. V. 7. Is. 2. P. 239—244.
7. **Туйчиев З.З.** Учта бир фазали трансформатор ердамида ночизикли юкламалар таъсирини тадқиқ этиш // ФарПИ илмий—техника журнали. 2022. 26 Том махсус сон № 1. 183—186 б.
8. **Юсупов Д.Т., Туйчиев З.З.** Носимметрияга олиб келувчи омиллар ва уларни бартараф этиш бўйича чора—тадбирлар // ЎзР ФА Навоий бўлими ташкил этилганининг 5 йиллигига бағишланган / “Фан, таълим ва ишлаб чиқаришнинг интеграцияси—ривожланиш ва тараққиёт гарови” халқаро илмий—амалий конференция материаллари. III—Жилд 2022 йил 9—10 июнь, 192—194 б.
9. **Криштопа Н.Ю.** Повышение эффективности энергосбережения в сельских сетях 0,38 кВ при несимметричной нагрузке: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург—Пушкин, 2016. 148 с.
10. **Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Горпинич А.В.** Расчет надежности силовых трансформаторов при наличии несинусоидальности и несимметрии напряжений // Вестник Приазовского государственного технического университета. Вып. № 14. 2004. С. 1—6.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО СНИЖЕНИЮ НЕСИММЕТРИЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Несимметрия напряжения в электрических сетях 10/0,4 кВ возникает в основном за счет подключения однофазных маломощных потребителей [3]. Коэффициент несимметрии регламентирован ГОСТ 32144—2013 [1] — допустимое значение 2 %, предельное 4 %.

Коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности K_0 , %, возникающий в силовых трансформаторах, можно рассчитать по формуле [1; 2] (U_{AB} —значение напряжения между фазами А и В):

$$K_0 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} 100 \%, \quad (1)$$

где

$$\beta = \frac{U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4}{(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)^2}. \quad (2)$$

Заменим линейные напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} на фазные напряжения U_A , U_B , U_C :

$$U_A = \frac{U_{AB}}{\sqrt{3}}; \quad U_B = \frac{U_{BC}}{\sqrt{3}}; \quad U_C = \frac{U_{CA}}{\sqrt{3}}. \quad (3)$$

Формулу (2) с использованием (3) преобразуем в формулу для расчета по фазным напряжениям:

$$\beta = \frac{(U_A)^4 + (U_B)^4 + (U_C)^4}{((U_A)^2 + (U_B)^2 + (U_C)^2)^2}. \quad (4)$$

Коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности, возникающий в в силовых трансформаторах, определяется по формуле (1):

$$K_0 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} 100 \% = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 \left(\frac{(U_A)^4 + (U_B)^4 + (U_C)^4}{((U_A)^2 + (U_B)^2 + (U_C)^2)^2} \right)}}{1 + \sqrt{3 - 6 \left(\frac{(U_A)^4 + (U_B)^4 + (U_C)^4}{((U_A)^2 + (U_B)^2 + (U_C)^2)^2} \right)}}} 100 \%. \quad (5)$$

Это выражение получено для расчета коэффициента несимметрии на основе фазных напряжений:

Отклонение напряжения [1; 2] рассчитывается как

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100. \quad (6)$$

Среднее значение коэффициента несимметрии [4] равно

$$K_{\text{сред}} = \frac{1}{n} \sum_i^n K_i. \quad (7)$$

Среднеквадратичное отклонение по среднему значению коэффициента несимметрии [4] равно

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^n K_i - K}{(n-1)}}. \quad (8)$$

Коэффициент вариации [4] определяется как

$$V = \frac{\sigma}{K_{\text{сред}}} 100 \%. \quad (9)$$

Цель работы. Исследование подключения к сети продольных и многофазных несимметричных нагрузок, возникающих из-за неполнофазных режимов элементов электрической сети, устранение поперечных несимметрий, возникающих из-за неравенства активных и реактивных сопротивлений потребителей по фазам, определение соответствия нормативным документам силовых трансформаторов для повышения надежности с помощью проведения экспериментальных исследований.

Использовался трехфазный симметрирующий силовой трансформатор мощностью 2,5 кВА и макет лабораторной сборки LD DIDACTIC [5]. Исследования проводились для случаев поперечной несимметрии, возникающей из-за неравенства активных и реактивных сопротивлений потребителей по фазам. Результаты представлены в табл. 1 (для примера) и на графиках (рис. 1—3).

Таблица 1

Результаты для случая подключения несимметричного индуктивного контура к нижней стороне симметрирующего силового трансформатора при наличии продольной несимметрии

t, c	U_A, B	U_B, B	U_C, B	$P_A, кВт$	φ_{UA}	$P_B, кВт$	φ_{UB}	$P_C, кВт$	φ_{UC}
0,0	228,6	231,5	232,0	0,011	0,0	0,09	119,7	0,012	-120
0,1	228,7	232,8	232,1	0,011	0,0	0,09	119,9	0,012	-120
0,2	228,7	232,8	232,1	0,011	0,0	0,09	119,9	0,012	-120
0,3	228,8	232,9	232,1	0,011	0,0	0,09	119,9	0,012	-120

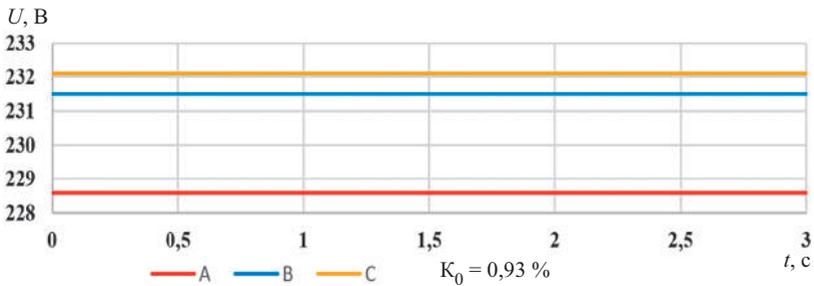


Рис. 1. Несимметричный индуктивный контур подключен к нижней стороне симметрирующего силового трансформатора при наличии продольной несимметрии

При подключении несимметричного индуктивного контура коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности составил $K_0 = 0,93 \%$.

При подключении несимметричной емкостной нагрузки по результатам экспериментальных исследований напряжения (рис. 2) было получено: $U_A = 237,9$ В, $U_B = 240,5$ В, $U_C = 240,9$ В, а значения углов между векторами — $\varphi_A = 0^\circ$, $\varphi_B = 120,2^\circ$, $\varphi_C = -120,2^\circ$. Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности составил $K_0 = 0,78 \%$.

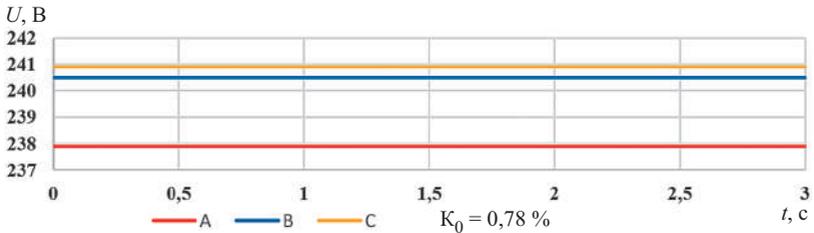


Рис. 2. Несимметричная емкостная нагрузка подключена к нижней стороне симметрирующего силового трансформатора при наличии продольной несимметрии

При подключении несимметричной активной, индуктивной и емкостной нагрузок напряжения (рис. 3) было получено: $U_A = 228,2$ В, $U_B = 227,0$ В, $U_C = 234,3$ В, а значения углов между векторами — $\varphi_A = 0^\circ$, $\varphi_B = 117,0^\circ$, $\varphi_C = -121,4$. Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности составил $K_0 = 1,98$ %.

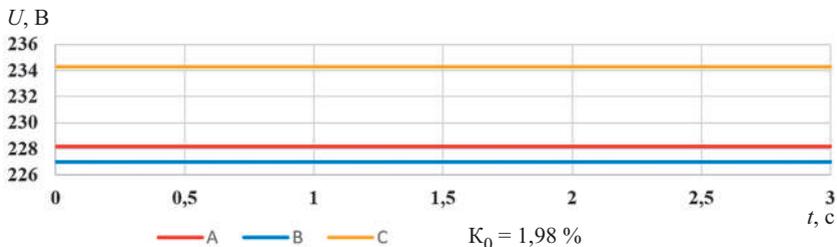


Рис 3. Несимметричная активная, индуктивная и емкостная нагрузки подключены к нижней стороне симметрирующего силового трансформатора при наличии продольной несимметрии

Таким образом, все определенные в исследованиях коэффициенты несимметрии напряжений по нулевой последовательности соответствуют требованиям ГОСТ 32144—2013. При наличии продольной несимметрии можно достичь практически полной симметрии даже при подключении несимметричной активной, индуктивной и емкостной нагрузок на нижнюю сторону обмотки симметрирующего силового трансформатора. За счет устранения несимметричных состояний можно повысить надежность работы силовых трансформаторов.

Литература

1. **ГОСТ 32144—2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.
2. **ГОСТ 30804.4.30—2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. М.: Стандартинформ, 2014 г.
3. **Faiz J., Ghazizadeh M., Oraee H.** Derating of transformers under non—linear load current and non—sinusoidal voltage—an overview // IET Electric Power Applications. July 2015. P. 486—495.
4. **Расулов А.С., Раймова Г.М., Саримсокова Х.К.** Эҳтимоллар назарияси ва математик статистика // Ўзбекистон файласуфлари миллий жамияти нашриети. Тошкент, 2006 йил. 272 бет.
5. [Электронный ресурс]. URL: www.ld-didactic.com.

6. **Управление** качеством электроэнергии: учебное пособие / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др. М.: Издательский дом МЭИ, 2017 . 347 с.
7. **Tuychiyev Z.Z. Yusupov D.T.** Determination of asymmetrical position of 10/0,4 kV power transformers in operational condition // Scientific and Technical Journal Namangan Institute of Engineering and Technology. 2022. V. 7. Is. 2. P. 239—244.
8. **Туйчиев З.З.** Учта бир фазали трансформатор ердамида ночизикли юкламалар таъсирини тадқиқ этиш // ФарПИ илмий—техника журнали. 2022. 26 Том махсус сон № 1. 183—186 б.
9. **Юсупов Д.Т., Тўйчиев З.З.** Носимметрияга олиб келувчи омиллар ва уларни бартараф этиш бўйича чора—тадбирлар // ЎзР ФА Навоий бўлими ташкил этилганининг 5 йиллигига бағишланган / “Фан, таълим ва ишлаб чиқаришнинг интеграцияси—ривожланиш ва тараққий қилиниши” халқаро илмий—амалий конференция материаллари. III—Жилд 2022 йил 9—10 июнь, 192—194 б.
10. **Криштопа Н.Ю.** Повышение эффективности энергосбережения в сельских сетях 0,38 кВ при несимметричной нагрузке: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург—Пушкин, 2016. 148 с.
11. **Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Горпинич А.В.** Расчет надежности силовых трансформаторов при наличии несинусоидальности и несимметрии напряжений // Вестник Приазовского государственного технического университета. Вып. № 14. 2004. С. 1—6.

*Г.С. Кулешова, AlexeenkovaGS@mpei.ru,
Д.В. Михеев, MikheevDV@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ К ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОГО ИНДУКТИВНО- ЕМКОСТНОГО ЭЛЕМЕНТА

Одной из актуальных проблем современных распределительных сетей и систем электроснабжения является обеспечение нормативных показателей качества электрической энергии [1]. Во многом это обусловлено функционированием нелинейной нагрузки, искажающей синусоидальную форму кривых напряжения и тока в системе электроснабжения, что оказывает негативное влияние на работу других электроприемников [2]. В этой связи особое внимание уделяется проблеме организации одновременной компенсации реактивной мощности и фильтрации высших гармонических составляющих напряжения и тока.

Эффективным решением данной проблемы является применение фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) [3]. Перспективным направлением в развитии фильтрокомпенсации является разработка ФКУ на основе гибридных индуктивно-емкостных элементов, объединяющих в себе функции реактора и конденсатора, что позволяет повысить эффективность и улучшить технико-экономические характеристики ФКУ ~ на 10—20 % по сравнению с существующими аналогами [4—6].

Гибридный индуктивно-емкостной элемент представляет собой двухзаходную катушку, конструктивно образованную двумя проводниками в виде фольги 1 и 2 длиной l и изолирующим их слоем диэлектрика D с определенным количеством витков. К источнику напряжения $u_{вх}$ гибридный элемент подключается через начало первого H_1 и конец второго K_2 проводника (входные выводы), а выводы проводников K_1 и H_2 (выходные выводы) остаются разомкнутыми. В результате такого подключения в гибридном индуктивно-емкостном элементе реализуется принцип самокомпенсации реактивной мощности [4, 7].

Принцип работы ФКУ на основе гибридного индуктивно-емкостного элемента аналогичен принципу работы стандартного пассивного ФКУ. Для реализации функций ФКУ необходимое число секций (рис. 1, *a*) размещают на магнитопроводе с немагнитными зазорами, при этом секции соединяют между собой последовательно согласно, входные выводы подключают к компенсируемой сети, а выходные выводы оставляют разомкнутыми [8]. Такая конструкция позволяет эффективно канализировать магнитные потоки и регулировать значение резонансной частоты посредством изменения длины немагнитного зазора $l_{НЗ}$ и числа витков катушек коррекции [8—10]. В частности, на рис. 1, *б* приведена функциональная схема однофазной двухсекционной модели ФКУ на основе гибридных индуктивно-емкостных элементов с магнитопроводом с немагнитными зазорами.

Следует отметить, что ФКУ на основе гибридных индуктивно-емкостных элементов имеет идентичную с узкополосным дискретным пассивным ФКУ схему замещения, параметры которой определяются эквивалентными сосредоточенными параметрами физической модели ФКУ [7, 11].

В [12] разработана компьютерная модель, на основе которой исследованы переходные процессы при подключении ФКУ на основе гибридного индуктивно-емкостного элемента к трехфазной симметричной электрической сети. Таким образом, в настоящем докладе ставится задача экспериментального исследования переходных процессов при подключении однофазного ФКУ на основе гибридного индуктивно-емкостного элементов к однофазной сети, содержащей высшие гармоники, от которой получает

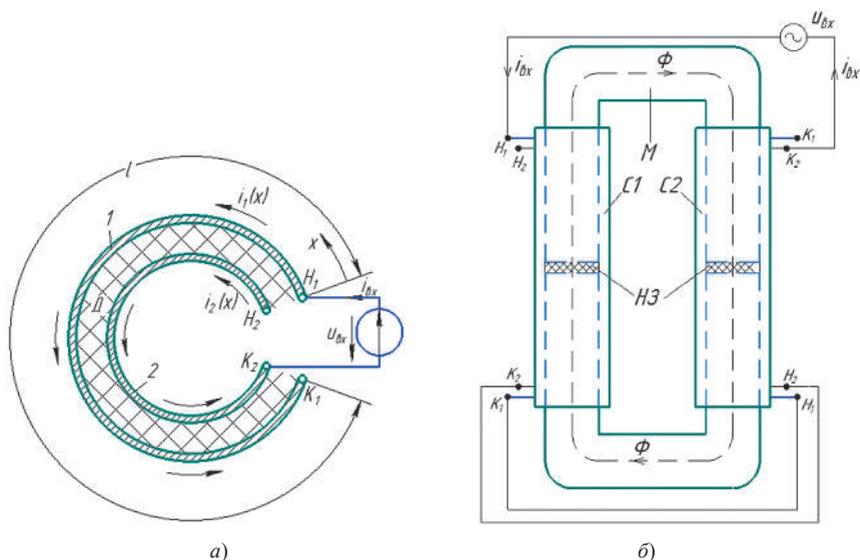


Рис. 1. Секция гибридного индуктивно-емкостного элемента (один виток, вид сверху, выходные выводы разомкнуты) (а), функциональная схема однофазной двухсекционной модели ФКУ на базе гибридного индуктивно-емкостного элемента (б)

питание потребитель, представляющий собой линейную активно-индуктивную нагрузку.

На рисунке 2 изображена схема электрической цепи для физического моделирования переходных процессов при подключении ФКУ на базе гибридного индуктивно-емкостного элемента к электрической сети. Электрическая сеть моделируется несинусоидальным источником, образованным последовательным соединением двух синусоидальных источников u_1 ($U_1 = 2,8$ В, $f_1 = 50$ Гц) и u_k ($U_k = 1,3$ В, $k = 5$, $f_k = 250$ Гц) с общим внутренним сопротивлением $R_{ист} = 47$ Ом, а потребитель — линейной активно-индуктивной нагрузкой ($Z_{н} = 300 + j216,7$ Ом, $L_{н} = 690$ мГн, $\cos \varphi = 0,81$). Для осуществления компенсации реактивной мощности и фильтрации высшей гармоники напряжения ($k = 5$) к узлам a и b электрической цепи была подключена физическая модель ФКУ на базе гибридного индуктивно-емкостного элемента (рис. 1, б, длина немагнитного зазора $l_{H3} = 5$ мм) с эквивалентными параметрами $L_{ФКУ} = 22,6$ мГн, $C_{ФКУ} = 17,6$ мкФ, $R_{ФКУ} = 4,3$ Ом. Отметим, что подключение ФКУ на основе гибридного индуктивно-емкостного элемента с такими параметрами позволит повысить коэффициент мощности в точке общего присоединения на 22 %. Все измерения проводились в программно-техническом комплексе (ПТК) DeltaProfi [13].

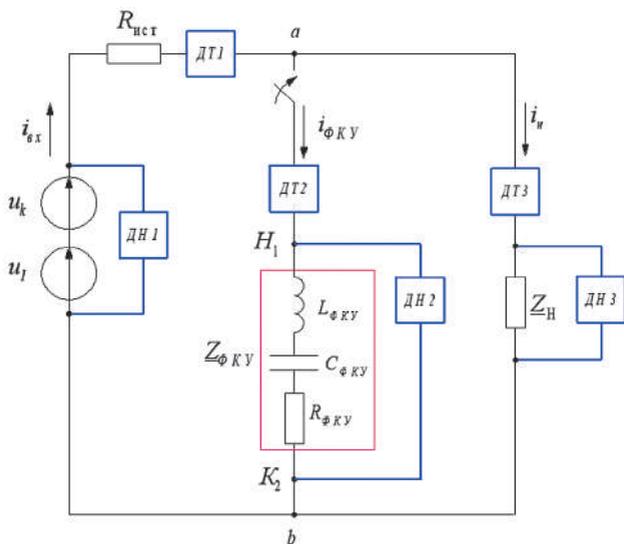


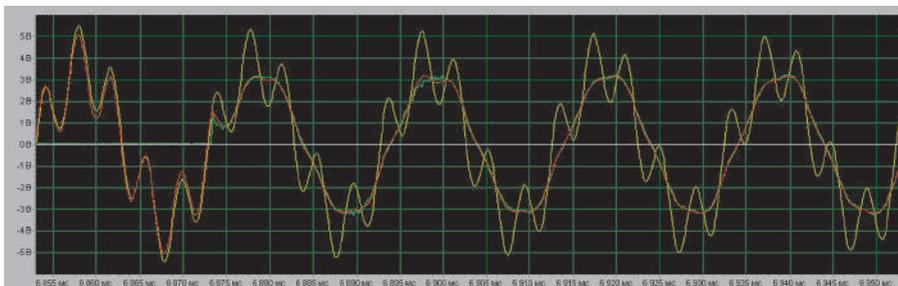
Рис. 2. Схема электрической цепи для физического моделирования переходных процессов при подключении ФКУ на базе гибридных индуктивно-емкостных элементов к электрической сети (ДТ — датчики тока, ДН — датчики напряжения)

Полученные в результате проведенного физического моделирования осциллограммы переходных процессов при подключении ФКУ к компенсируемой электрической сети представлены на рис. 3. В ходе проведенного экспериментального исследования получены следующие результаты:

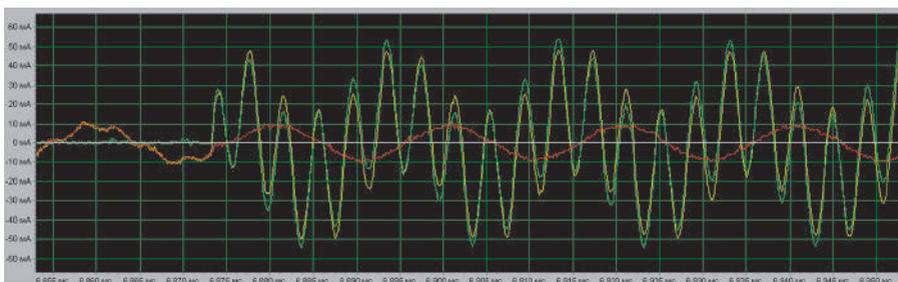
- полученные экспериментальным путем осциллограммы изменения напряжений и токов (рис. 3) подтверждают адекватность математической модели и результаты компьютерного моделирования переходных процессов при подключении ФКУ на базе гибридного индуктивно-емкостного элемента к электрической сети, приведенные в [12];

- при подключении к электрической сети ФКУ на базе гибридного индуктивно-емкостного элемента не возникает опасных перенапряжений и сверхтоков на рассматриваемых частотах;

- в результате подключения ФКУ на базе гибридного индуктивно-емкостного элемента осуществляется компенсация реактивной мощности и достигается снижение степени несинусоидальности напряжения и тока в месте подключения нагрузки. При этом задача улучшения фильтрации высших гармонических составляющих напряжения и тока может быть решена за счет создания гибридных ФКУ на основе гибридных индуктивно-емкостных элементов [14].



а)



б)

Рис. 3. Осциллограммы переходных процессов:

a — изменение напряжений в сети: входного напряжения (желтый), напряжения на зажимах ФКУ на базе гибридного индуктивно-емкостного элемента (зеленый), напряжения на нагрузке (красный); *б* — изменение токов в сети: входного тока (желтый), тока в ветви ФКУ на базе гибридного индуктивно-емкостного элемента (зеленый), тока в ветви нагрузки (красный)

В заключение следует отметить, что ФКУ на базе гибридных индуктивно-емкостных элементов выполняет аналогичные с пассивным дискретным ФКУ функции, но основывается на ином физическом принципе и имеет другое конструктивное исполнение, благодаря чему достигается улучшение технико-экономических показателей устройства [12].

Эффективность применения ФКУ на основе гибридных индуктивно-емкостных элементов определяется его добротностью, уровнем потерь активной мощности, а также зависит от применяемых средств регулирования его параметров и управления его режимами. Решение данных вопросов особенно актуально при использовании ФКУ в электрических сетях и системах электроснабжения с переменной нагрузкой.

Литература

1. **Bulycheva E., Yanchenko S.** Online Determination of Varying Harmonic Load Contribution to Grid Voltage Distortion // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020 (Sochi, IEEE, 2020).
2. **Бульчева Е.А., Кулешова Г.С., Янченко С.А.** Идентификация высших гармоник в реальном времени в электрических сетях с переменным режимом работы // Промышленная энергетика. 2020. № 10. С. 28—38. DOI 10.34831/EP.2020.62.73.004.
3. **Das J.** Passive filters — potentialities and limitations // IEEE trans. on industry applications. 2004. V. 40. No 1. P. 232—241.
4. **Reeves R.** Inductor-capacitor hybrid // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1975. V. 122. No 11. P. 1323—1326.
5. **Исследование** установившихся режимов работы токоограничивающего и фильтрокомпенсирующего устройств на основе каткона / П.А. Бутырин, Г.Г. Гусев, Д.В. Михеев и др. // Фёдоровские чтения — 2019: XLIX международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 178—183.
6. **Михеев Д.В., Кулешова Г.С.** Экспериментальное исследование и компьютерное моделирование фильтрокомпенсирующего устройства на основе гибридного индуктивно-емкостного элемента // Промышленная энергетика. 2020. № 12. С. 9—16.
7. **Математическое** и физическое моделирование фильтрокомпенсирующего устройства на основе каткона / П.А. Бутырин, Г.Г. Гусев, В.В. Кужман, Д.В. Михеев // Электричество. 2014. № 11. С. 58—62.
8. **Пат. 2714925** РФ, МПК H02J 3/01 (2006.01). Фильтрокомпенсирующее устройство // Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Карпунина М.В., Кваснюк А.А., Михеев Д.В., Шакирзянов Ф.Н., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». № 2019128529; заявл. 11.09.2019, опубл. 21.02.2020. Бюл. № 6.
9. **Математическая** модель фильтрокомпенсирующих устройств на основе гармонической линеаризации характеристики магнитопровода каткона / П.А. Бутырин, Г.Г. Гусев, В.В. Кужман и др. // Вестник МЭИ. 2015. № 5. С. 79—84.
10. **Кулешова Г.С., Михеев Д.В.** Моделирование режимов работы ФКУ на основе гибридного индуктивно-емкостного элемента при изменении параметров электрической сети // Фёдоровские чтения — 2021: LI международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2021. С. 198—204.
11. **Демирчян К.С., Гусев Г.Г.** Синтез схем замещения катушки индуктивности с самокомпенсацией реактивной мощности // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1987. № 2. С. 3—10.
12. **Kuleshova G.S., Mikheev D.V.** Modeling the operating modes of a FCD based on a hybrid inductive-capacitive element in power supply systems // XV International scientific and technical conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” (Dynamics), Omsk, Russia (в печати).

13. **Современные** компьютерные технологии в дисциплине «Теоретические основы электротехники» / М.П. Жохова, Д.В. Михеев, М.В. Карпунина, Г.С. Алексеенкова // Современные тенденции развития системы образования. Чебоксары: ИД «Среда», 2018. С. 55—60.
14. **Розанов Ю.К., Гринберг Р.П.** Гибридные фильтры для снижения несинусоидальности тока и напряжения в системах электроснабжения // Электротехника. 2006. № 10. С. 55—60.

*Д.М. Камалов, mr.KNAIVE@mail.ru,
Э.М. Баширова, bashirova-elmira@yandex.ru,
ИНН ФГБОУ ВО УГНТУ, г. Салават*

ОБЗОР ОТЕЧЕСТВЕННЫХ КОНТРОЛЛЕРОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрены современные промышленные контроллеры, представленные отечественными компаниями АО «НВТ-Системы», «УМИКОН», «ОВЕН», НИЛ АП. Они не уступают зарубежным аналогам и даже в чем-то превосходят. Также можно отметить, что нахождение компаний на территории Российской Федерации позволяет потребителям оперативно и качественно получать техническую поддержку и консультации.

Многие отечественные компании используют зарубежные микросхемы в производстве контроллеров, но только в том случае, если отсутствуют их аналоги на российском рынке. Производители нацелены на снижение зависимости от зарубежных компонентов и активно ищут аналоги на российском рынке или стараются открыть собственное производство недостающих компонентов. Процесс открытия собственного производства требует больших финансовых затрат, но при успешности производства компонентов, не имеющих аналогов на российском рынке, в ближайшем будущем быстро окупится [1].

Рассмотрим несколько отечественных компаний, разрабатывающих современные промышленные контроллеры для автоматизации производства (АСУ ТП, АСДУ, АИИС КУЭ и др.).

АО «НВТ-Системы» — ведущий поставщик программно-технических комплексов (ПТК) и услуг по созданию полнофункциональных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) электрических станций, нефтехимических, металлургических и других сложных технологических производств. Имеет программно-технический комплекс САРГОН собственной разработки. Также компания использует и зарубежные ПТК, такие как АBB, AllenBreadly, GE, Siemens, Yokogawa.

Созданные системы используют различные контроллеры: Армконт (собственной разработки), Треи-5В-04, Треи-5В-05 (Компания ТРЭИ), ТКМ-21, ТКМ-31, ТКМ-51, МФК, Теконик (Текон), Ломиконт (НИИ-Теплоприбор), Ремиконт-130 (НИИ-Теплоприбор), Кросс-500 (АБС-Чебоксары), ТЭКОН-17 (Группа компаний «ТЕКОН»), Simatic S7-400 (Siemens), ABB Freelance (ABB), StarDom (Yokogawa), GE Fanuc (GE), Control-Logix (AllenBreadly), i-7000 (ICP DAS) и др.

Также примером разработки отечественного семейства контроллеров является компания «УМИКОН». Ее программно-технический комплекс является единственным отечественным универсальным ПТК, который включает в себя и полнофункциональный комплекс программного обеспечения (КПО) верхнего уровня, и полномасштабный комплекс технических средств (КТС) [2].

На базе ПТК компании «УМИКОН» внедрены и успешно эксплуатируются десятки автоматизированных систем в различных отраслях, включая металлургическую, горнодобывающую, химическую промышленность, атомную энергетику, а также городскую инфраструктуру. По большинству технических характеристик ПТК «УМИКОН» значительно превосходит аналоги или не имеет таковых.

Компания «ОВЕН» уже 30 лет на рынке средств промышленной автоматизации. Компанией разработано и внедрено более 250 наименований продукции для создания АСУ ТП любого уровня сложности. Она имеет собственное производство с современным оснащением для серийного выпуска приборов. Продукция ОВЕН работает на тысячах предприятий России и стран СНГ.

В 2020 г. компания представила новую линейку контроллеров: ОВЕН ПЛК200, ОВЕН ПЛК210 и ПЛК210-KR с исполнительной средой от НПФ «КРУГ» (СРВК). Расширена линейка модулей ввода-вывода с Ethernet ОВЕН MB210, разработаны промышленный неуправляемый сетевой коммутатор ОВЕН КСН210 и преобразователь протокола ModbusОВЕН МКОН. Представлены новые программируемые реле: ОВЕН ПР102 —компактное на 40 каналов ввода/вывода и ОВЕН ПР103 —программируемые реле с Ethernet [1].

Компания производит линейку моноблочных контроллеров с расширенными коммуникационными возможностями и дополнительными функциями надежности ОВЕН ПЛК210. Контроллер программируется в среде CODESYS V3.5 SP14 Patch 3. В рамках единого ПО пользователь разрабатывает управляющую логику, человеко-машинный интерфейс и настраивает обмен с другими устройствами.

В качестве другого примера новейшего современного отечественного промышленного контроллера рассмотрим контроллеры Научно-исследовательской лаборатории автоматизации проектирования (НИЛ АП, г. Та-

ганрог). В настоящее время НИЛ АП выпускает свою продукцию под торговой маркой RealLab! Средства и системы промышленной автоматизации НИЛ АП спроектированы специально для жестких условий эксплуатации и изготовлены в соответствии с российскими и мировыми стандартами.

Компания непрерывно ведет разработку новых комплексов АСУ ТП, и осуществляет работы по совершенствованию и созданию новых средств автоматизации. НИЛ АП разрабатывает панельные промышленные контроллеры серий NLCon-LXD и NLCon-CED с различными размерами экрана. Эти изделия совмещают в себе сенсорную панель оператора и программируемый логический контроллер (ПЛК).

Возможные сферы применения данных ПЛК — от отдельных технологических линий, систем «Индустрия 4.0» и «Интернет вещей (IoT)» до сложных комплексных решений по автоматизации предприятия.

Контроллеры NLCon-LXD и NLCon-CED являются программируемыми логическими контроллерами (ПЛК). Работают под управлением операционной системы LinuxAngstrom. Они являются свободно программируемыми контроллерами, логика работы определяется потребителем в процессе программирования контроллера [2]. Для связи с персональным компьютером или локальной сетью ПЛК имеет интерфейс Ethernet; также имеется встроенная micro SD-карта.

ПЛК выполнен для применения в жестких условиях эксплуатации, имеет гальваническую изоляцию 2,5 кВ (ГОСТ Р52931—2008) между входами питания и портами RS-485.1.1.

В рамках программы импортозамещения НИЛ АП предлагает средства автоматизации под торговой маркой RealLab! как замену контроллеров ICPDAS, Advantech (ADAM) и других производителей.

В данном обзоре представлены отечественные промышленные контроллеры, которые широко распространены на предприятиях Российской Федерации и, как правило, не уступают зарубежным аналогам. Основное их достоинство в том, что разработчики и производители доступны потребителям в случае необходимости получения консультаций в рамках технической поддержки, в том числе и в случае необходимости проведения модернизации АСУ ТП на предприятии.

Литература

1. **Менделевич В.А.** Новое поколение контроллеров мультиплатформенной системы МИРТС // Автоматизация и IT в энергетике. 2021. № 2 (139). С. 34—41.
2. **Курдин И.Н., Гребнев Д.М.** К вопросу о выборе программируемых логических контроллеров для автоматизации работы. [Электронный ресурс]. URL: <https://docplayer.ru/71612606-К-вопросу-о-выборе-programmiruemyh-logicheskikh-kontrollerov-dlya-avtomatizacii-raboty.html>

*В.А. Гуцан, GutsanVA@mpei.ru,
А.А. Белогловский, BeloglovskyAA@mpei.ru,
Н.А. Лебедева, LebedevaNA@mpei.ru,
М.А. Бухтилова, BukhtilovaMA@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва*

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ БЕЗУСЛОВНОЙ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ К РЕШЕНИЮ
ЗАДАЧ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
В УСТАНОВКАХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ:
ВЛИЯНИЕ ФОРМУЛИРОВКИ ЗАДАЧИ**

Одним из видов инженерной деятельности в технике и электрофизике высоких напряжений (ТЭВН) является регулирование электрических полей (ЭП) [1]. Это предполагает минимизацию значений напряженности ЭП в изоляционных конструкциях высокого напряжения (ВН) или максимизацию разрядных напряжений в них, что в общем случае не одно и то же. Изменяя форму электродов, расстояние между ними, добавляя экранирующие электроды, можно добиться решения задачи.

В случае газовых разрядных промежутков можно выделить две разновидности подобных задач:

1) минимизация наибольшего значения напряженности ЭП в изоляционном промежутке [2];

2) максимизация значения начального напряжения промежутка [3, 4].

В общем случае эти задачи различны. Из-за того, что решение второй задачи является более трудоемким, на практике в большинстве случаев решается первая из них. Поэтому авторы доклада решили проверить, насколько различаются решения этих задач и насколько решение второй задачи зависит от состава газа.

Названные выше задачи допускают формулировку в виде задач условной математической оптимизации (математического программирования), которая в общем виде выглядит следующим образом [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} f(X) \rightarrow \min(\max), \\ g_j(X) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, M, \\ X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_N \end{bmatrix}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где X — вектор искомых переменных x_1, x_2, \dots, x_N ; необходимо отыскать наибольшее или наименьшее значение целевой функции f в расчетной области, заданной системой ограничений $g_j(X) \geq 0, j = 1, 2, \dots, M$.

В некоторых случаях ограничения задачи (1) не влияют на ее решение, и ими можно пренебречь. Тогда решение сводится к задаче безусловной математической оптимизации:

$$\left\{ \begin{array}{l} f(X) \rightarrow \min(\max), \\ X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_N \end{bmatrix}. \end{array} \right. \quad (2)$$

В качестве простого примера приложения аппарата математической оптимизации к решению задач регулирования ЭП в устройствах ВН рассмотрим оптимизацию параметров системы электродов «коаксиальные цилиндры» (рис. 1), которая используется в газонаполненном электрооборудовании. Внутренний цилиндр представляет собой токоведущую жилу радиусом R_0 , к которой приложено напряжение U , а внешний цилиндр — это внешняя заземленная оболочка радиусом R_1 .

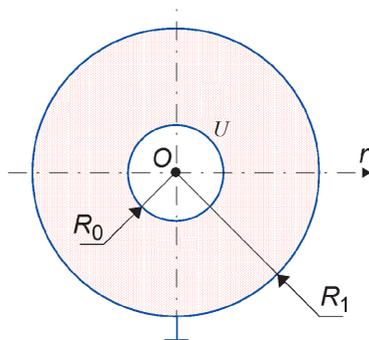


Рис. 1. Расчетная модель системы электродов «коаксиальные цилиндры»

Рассмотрим несколько задач безусловной математической оптимизации, которые позволяют отыскать оптимальные значения R_0 при фиксированных величинах R_1 и U .

Задача 1: минимизация наибольшего значения E_{\max} напряженности ЭП в выбранной системе. Ее математическая формулировка имеет вид

$$E_{\max}(R_0) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где функция $E_{\max}(R_0)$ в соответствии с [3, 4] записывается в форме

$$E_{\max}(R_0) = \frac{U}{R_0 \ln(R_1 / R_0)}. \quad (4)$$

Подставляя функцию (4) в (3), получим задачу безусловной математической оптимизации:

$$f(R_0) = \frac{U}{R_0 \ln(R_1 / R_0)} \rightarrow \min, \quad (5)$$

где целевая функция f зависит от единственной переменной R_0 , а значения R_1 и U задаются в условиях задачи.

Задача (5) имеет аналитическое решение $R_0^* = R_1 / e$, где e — основание натурального логарифма. Это решение в дальнейшем будет использовано для проверки приближенного численного решения задачи (5).

Задача 2: максимизация начального напряжения U_0 в выбранной системе, заполненной воздухом. Ее математическая формулировка имеет вид

$$U_0(R_0) \rightarrow \max. \quad (6)$$

Начальное напряжение U_0 газового промежутка между коаксиальными цилиндрами в соответствии с [3] рассчитывается по формуле

$$U_0 = E_0 R_0 \ln(R_1 / R_0), \quad (7)$$

где E_0 — начальная напряженность электрического поля на поверхности цилиндрического проводника радиусом R_0 . Хорошо известны аппроксимации с использованием функции $E_0(R_0)$ для некоторых газов [4]. Для воздуха она имеет вид

$$E_0 = 24,5 \delta m \left[1 + \frac{0,65}{(R_0 \delta)^{0,38}} \right], \quad (8)$$

где δ — относительная плотность газа [3]; m — коэффициент гладкости цилиндрического проводника [3] (если он идеально гладкий, то $m = 1$), значения E_0 измеряются в кВ/см, а R_0 — в см.

С учетом записанных выше соотношений (7) и (8) функция $U_0(R_0)$ записывается в форме

$$U_0(R_0) = 24,5 \delta m \left[1 + \frac{0,65}{(R_0 \delta)^{0,38}} \right] R_0 \ln(R_1 / R_0),$$

а задача безусловной оптимизации (6), следовательно, приобретает вид

$$f_2(R_0) = 24,5 \delta m \left[1 + \frac{0,65}{(R_0 \delta)^{0,38}} \right] R_0 \ln(R_1 / R_0) \rightarrow \max. \quad (9)$$

Задача 3: максимизация начального напряжения U_0 в системе «коаксиальные цилиндры», заполненной элегазом. В настоящее время в качестве газовой изоляции, кроме воздуха, применяется шестифтористая сера SF₆ (элегаз) [4]. Электрическая прочность элегаза превышает электрическую прочность азота и воздуха примерно в 2,5 раза. Причина этого заключается в том, что элегаз является электроотрицательным газом, в состав его молекулы SF₆ входит фтор — галоген, легко присоединяющий к себе электрон и образующий устойчивые отрицательные ионы.

Формулировка задачи максимизации значения начального напряжения в системе «коаксиальные цилиндры», заполненной элегазом, по-прежнему имеет вид (6), где зависимость $U_0(R_0)$ определяется соотношением (7). При этом, однако, следует учитывать, что для элегаза зависимость $E_0(R_0)$ в соответствии с [4] определяется аппроксимацией

$$E_0 = 89,3 \delta \left[1 + \frac{0,135}{(R_0 \delta)^{0,48}} \right].$$

Тогда целевая функция задачи безусловной оптимизации (6) в данном случае приобретает вид

$$f_3(R_0) = 89,3 \delta \left[1 + \frac{0,135}{(R_0 \delta)^{0,48}} \right] R_0 \ln(R_1 / R_0) \rightarrow \max. \quad (10)$$

Результаты минимизации наибольшего значения E_{\max} напряженности ЭП в выбранной системе. В данном случае решалась задача безусловной оптимизации (5). Это было сделано численным методом Ньютона 2-го порядка. Сразу отметим, что он же был использован для решения задач (9) и (10). В качестве примера ниже приведены результаты расчета оптималь-

ного радиуса токоведущей жилы R_0^* при $R_1 = 7,5$ см, $U = 50$ кВ. На рисунке 2 показаны кривые $E_{\max}(R_0)$ и $E_0(R_0)$, рассчитанные при указанных значениях параметров задачи.

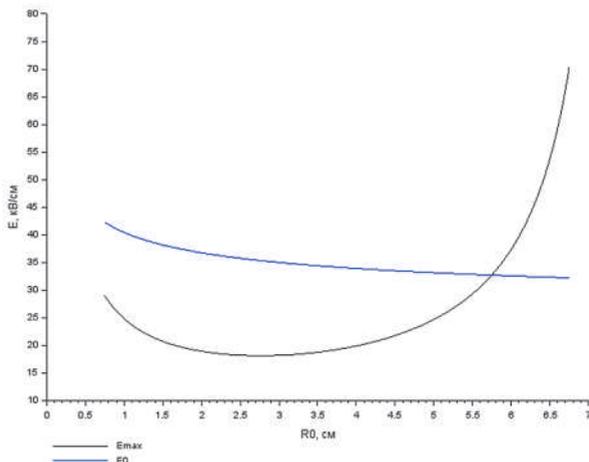


Рис. 2. Расчетные зависимости $E_{\max}(R_0)$ и $E_0(R_0)$ для системы электродов «коаксиальные цилиндры» (см. рис. 1), заполненной воздухом, при $R_1 = 7,5$ см и $U = 50$ кВ

В результате численного решения задачи (5) были найдены соответствующие ему оптимальные значения $R_0^* = 2,759$ см и $E_{\max}^* = E_{\max}(R_0^*) = 18,12$ кВ/см. Известное для этой задачи, например из [3], аналитическое решение $R_0^* = R_1 / e$ дает такое же значение радиуса токоведущей жилы: $R_0^* = 2,759$ см. Это совпадение численного и аналитического решений подтверждает корректность полученного авторами численного решения задачи безусловной оптимизации (5).

Результаты максимизации начального напряжения U_0 в выбранной системе, заполненной воздухом. В данном случае решалась задача безусловной оптимизации (9) при $R_1 = 7,5$ см и нормальных атмосферных условиях ($\delta = 1$). В качестве примера ниже приведены результаты расчета оптимального радиуса токоведущей жилы R_0^* при $R_1 = 7,5$ см. На рисунке 3 изображен график зависимости $U_0(R_0)$, полученный для воздуха при указанных значениях параметров задачи.

В результате численного решения задачи (9) были найдены соответствующие ему оптимальные значения $R_0^* = 2,405$ см и $U_0^* = U_0(R_0^*) = 98,22$ кВ/см.

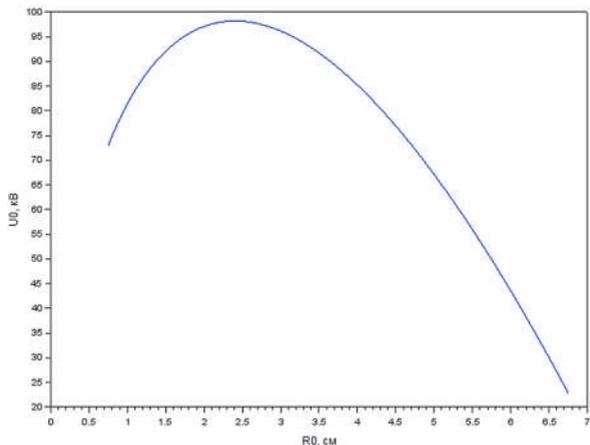


Рис. 3. Расчетная зависимость $U_0(R_0)$ для случая системы электродов «коаксиальные цилиндры», заполненной воздухом при $R_1 = 7,5$ см и $\delta = 1$

Результаты максимизации начального напряжения U_0 в выбранной системе, заполненной элегазом. В данном случае решалась задача безусловной оптимизации (10) при $R_1 = 7,5$ см и нормальных атмосферных условиях ($\delta = 1$). В качестве примера ниже приведены результаты расчета оптимального радиуса токоведущей жилы R_0^* при $R_1 = 7,5$ см. На рисунке 4 изображен график зависимости $U_0(R_0)$, полученный для элегаза при указанных значениях параметров задачи.

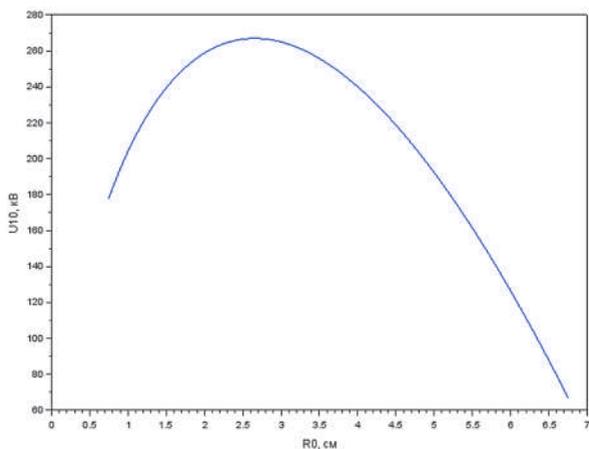


Рис. 4. Расчетная зависимость $U_0(R_0)$ для случая системы электродов «коаксиальные цилиндры», заполненной элегазом при $R_1 = 7,5$ см и $\delta = 1$

В результате численного решения задачи (10) были найдены соответствующие ему оптимальные значения $R_0^* = 2,654$ см и $U_0^* = U_0(R_0^*) = 267,01$ кВ/см.

Для наглядного сравнения рассчитанные выше значения R_0^* были собраны в таблицу. Для значений R_0^* , найденных в результате решения задач безусловной оптимизации (9) и (10), были определены их отклонения R_0^* от решения $R_{0(5)}^*$ задачи (5):

$$R_0^* = \left| \frac{R_{0(5)}^* - R_0^*}{R_{0(5)}^*} \right|.$$

Для решения самой задачи (5) $R_0^* = R_{0(5)}^*$, и потому $R_0^* = 0$. Все найденные значения R_0^* также внесены в таблицу.

Т а б л и ц а

Результаты расчета радиуса высоковольтного электрода системы «коаксиальные цилиндры» по разным критериям (целевым функциям)

Параметр	Задача безусловной оптимизации		
	Задача (5) $E_{\max}(R_0) \rightarrow \min$	Задача (9), воздух, $U_0(R_0) \rightarrow \max$	Задача (10), элегаз, $U_0(R_0) \rightarrow \max$
R_0^* , см	2,759	2,405	2,654
R_0^* , о.е.	0	0,12831	0,03806

Из таблицы легко видеть, что, например, при переходе от оптимизации радиуса токоведущей трубы по критерию минимизации наибольшего значения напряженности ЭП (5) к критерию максимизации начального напряжения (9), значение R_0^* уменьшается почти на 13 % (при прочих равных условиях).

Подвести итог сказанному в этом докладе можно следующим образом.

1) Задачи регулирования ЭП в ТЭВН зачастую формулируются в виде задач условной или безусловной математической оптимизации.

2) При этом, по меньшей мере, возможны две различные формулировки целевых функций (критериев) для одной физической задачи: минимизировать наибольшее значение напряженности ЭП в системе электродов; максимизировать начальное напряжение изоляционного промежутка.

3) Применение этих критериев дает разные результаты. Поэтому, если физическая задача допускает обе формулировки, следует с осторожностью относиться к результатам, найденным по первому из двух названных критериев, поскольку он может иметь оценочный характер.

Литература

1. **Белогловский А.А., Калугина И.Е.** Основы применения методов математического программирования в электроэнергетике: метод. руководство. М.: Издательство МЭИ, 2017.
2. **Аджнев Д.К., Белогловский А.А.** Оптимизация геометрии элемента конструкции газового проходного изолятора средствами математического программирования // Фёдоровские чтения — 2019: XLIX международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 184—191.
3. **Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С.** Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: учебник для вузов / под общ. ред. В.П. Ларионова. — 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. **Электрофизические основы техники высоких напряжений:** учеб. для вузов / И.М. Бортник и др.; под общ. ред. И.П. Верещагина. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2010.

СЕКЦИЯ 4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ. НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

*А.Е. Вилявин, Л.Х. Зайнутдинова, Lzain@mail.ru, АГУ, г. Астрахань,
Р.А. Зайнутдинов, rz@altsolar.ru, ООО «АльтСолар», г. Астрахань,
А.С. Курылев, ido_astu@mail.ru, АГТУ, г. Астрахань*

РАЗРАБОТКА ГРЕБНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СОЛНЕЧНОГО КАТАМАРАНА

В мире уже известны отдельные проекты энергоэффективных судов с применением фотоэлектрических систем для частичного замещения выработки электроэнергии дизель-генераторами, что, безусловно, способствует снижению расхода топлива и моторного масла и, следовательно, уменьшению загрязнения окружающей среды. Появляются суда, в ходе экспериментальных испытаний которых энергообеспечение полностью осуществляется за счет солнечной энергии. В работах [1, 2] показано, что при благоприятных погодных условиях (с высоким уровнем солнечной радиации) на малотоннажных судах уже сегодня можно достигать достаточной энерговооруженности.

Известен опыт успешного пилотного похода отечественного катамарана «Эковолна» от Балтики до Каспия. В мае 2018 г. катамаран «Эковолна» стартовал в Санкт-Петербурге, а 1 сентября 2018 г. катамаран торжественно встречали в Астрахани. Протяженность речного пути от Балтийского до Каспийского моря составила 5987 км. Этот путь удалось пройти за счет использования только одной солнечной энергии. Горючее топливо не применяли.

В ходе экспедиции электромоторы Torqeedo Cruise 4.0 TL постоянного тока оказались не способны удовлетворить требованиям в продолжительной работе, и часть электромоторов к концу экспедиции вышла из строя. Причиной выхода из строя принято считать неподходящий тип приводного электродвигателя, использовавшегося в серийных моделях Torqeedo.

В данных электромоторах устанавливают синхронные электродвигатели с внешним ротором и возбуждением от постоянных магнитов. Использование постоянных магнитов из редкоземельных металлов сильно повышает стоимость всей системы. Другим недостатком является низкая ремонтопригодность. На это влияют такие факторы, как сложная конструкция, использование мало распространенных компонентов, высокая плотность строения прибора. Перечисленные факторы практически исключают какой-либо ремонт непосредственно на месте использования, если таковой понадобится.

С целью решения перечисленных проблем было решено для катамарана, энергоснабжение которого осуществляется за счет солнечной электростанции, рассмотреть возможность использования надежного и недорогого короткозамкнутого трехфазного асинхронного двигателя с соответствующими характеристиками.

Разработка функциональной схемы электрического привода пропульсивной установки (в дальнейшем ПУ). С учетом типа двигателя была разработана функциональная схема электрического привода такой установки для катамарана (рис. 1).

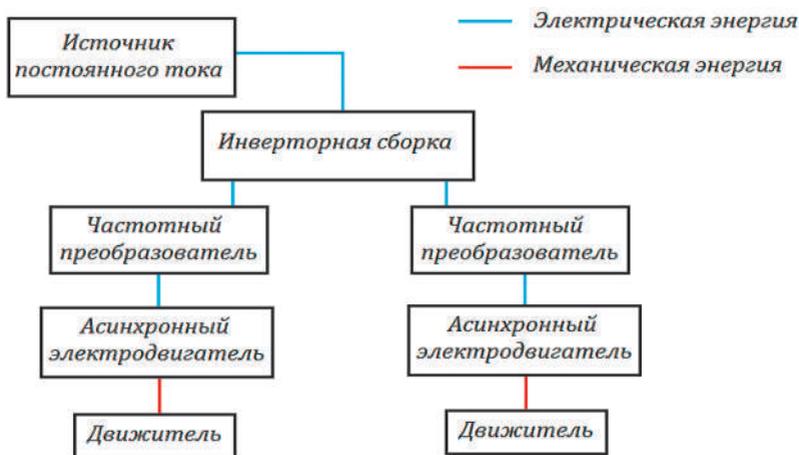


Рис. 1. Функциональная схема электропривода пропульсивной установки солнечного катамарана

Функциональная схема состоит из следующих элементов:

источник постоянного тока — аккумуляторные батареи солнечной электростанции;

инверторная сборка — для обеспечения электродвигателей напряжением необходимых параметров был предусмотрен инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный трехфазный с напряжением 380 В;

частотные преобразователи — так как асинхронные электродвигатели будут использованы в приводе ПУ, требуется обеспечить возможность регулирования режима ее работы. Для этого используются преобразователи частоты, устанавливаемые отдельно для каждого двигателя, что значительно расширит возможности регулирования режима работы электропривода установки.

Асинхронные трехфазные электродвигатели с короткозамкнутыми роторами в нашем случае являются определяющими элементами конструкции, вокруг которых будет проходить разработка ПУ.

Использование двух навесных поворотных колонок с гребными винтами и приводом от электродвигателей позволяет увеличить суммарную мощность установки и обеспечить высокую маневренность катамарана с существенным уменьшением диаметра циркуляции в условиях узкостей и малых глубин судового хода при работе одного гребного винта на ход вперед, а второго — на ход назад.

Выбор асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. О высокой надежности и малой стоимости асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором известно широко [3]. Исходя из опыта экспедиции «Эковолна», приняли мощность одного двигателя равной 4 кВт. Наиболее подходящим вариантом для электропривода ПУ будет электродвигатель с частотой вращения 1500 об/мин, обладающий хорошими массогабаритными показателями при средней частоте вращения. Для проектируемого электропривода установки будет достаточным показатель степени защиты, соответствующий IP55. Электродвигатели с данным показателем степени защиты имеют широкое распространение, поэтому такой выбор не скажется на итоговой стоимости электропривода. Исходя из возможных видов монтажного исполнения наиболее подходящим для проектируемого электропривода пропульсивной установки будет IM3611, а именно крепление на малый фланец валом вниз с одним цилиндрическим концом вала.

Особенности выбора частотно-регулируемого привода. Выбор частотно-регулируемого привода для ПУ имеет некоторую особенность. Диапазона скоростей привода можно достичь относительно несложным и наиболее широко распространенным методом управления — вольт-частотным. Диапазон регулирования современных электроприводов с асинхронным двигателем при вольт/частотном управлении может составлять 1:40, что для ПУ катамарана более чем достаточно. Кроме этого,

вольт-частотное управление при соблюдении закона $(U/f^2) = \text{const}$ позволяет обеспечить изменение критического момента в соответствии с винтовой характеристикой, что необходимо для данного типа нагрузки.

Трехфазный солнечный инвертор. Процесс выбора трехфазного солнечного инвертора для электрического привода установки катамарана начали с выбора ведущих фирм-производителей (по данным интернета). В результате внимание остановили на следующих компаниях: европейский производитель — Victron Energy; азиатский — SILA; российский — MicroArt.

Компания Victron Energy (Нидерланды) сегодня — мировой бренд, прочно закрепившийся на мировом рынке. Имя компании ассоциируется с надежностью и уверенностью в производителе. Компания является ведущим поставщиком солнечных инверторов, специализированных для использования на прогулочных судах (яхтах и катамаранах).

Компания SILA (Россия—Тайвань) — относительно молодой производитель на рынке солнечных инверторов, но успела зарекомендовать себя как надежный поставщик. Несмотря на то, что компания зарегистрирована на территории РФ, сами инверторы производят на Тайване.

Компания MicroArt — российский разработчик и производитель в области электротехники и силовой электроники. Компания специализируется на разработке, производстве и продаже оборудования для возобновляемых источников энергии и бесперебойных систем энергоснабжения мощностью от 1,3 до 200 кВт на одну фазу.

Для сравнения из представленного серийного ряда солнечных инверторов каждой компании были выбраны по одной наиболее подходящей для проектируемого привода модели. Основными критериями выбора инвертора для пропульсивной установки стали: мощность, выходное напряжение и цена. Критерии сравнения для трехфазных гибридных солнечных инверторов представлены в табл. 1.

В результате сравнения солнечных инверторов различных производителей для электропривода установки солнечного катамарана был выбран солнечный инвертор MicroArt МАП HYBRID 48–4.5×3. Он соответствует всем необходимым параметрам, имеет хорошие массогабаритные показатели и наименьшую стоимость.

МАП HYBRID 48–4.5 — многофункциональный автономный преобразователь напряжения (далее МАП, инвертор). Многофункциональность МАП подразумевает возможность использования прибора в качестве источника бесперебойного питания (ИБП), универсального зарядного устройства и сетевого инвертора, оптимизирующего использование альтернативных источников энергии.

Таблица 1

Сравнение характеристик солнечных инверторов различных моделей

Характеристика	MicroArt МАП HYBRID 48–4.5×3	SILA PRO 10000MH	Victron Energy MultiPlus-II 48–5×3
Мощность, кВт	13,5	10	15
U , В	48	48	48
$U_{\text{вых}}$, В	220—380	220—380	230
Количество фаз	3	3	3
Частота, Гц	50	50	50
Форма выходного сигнала	Чистый синус	Чистый синус	Чистый синус
Пиковая мощность, кВт	16,5	20	20
Коэффициент преобразования, %	96	91	96
Встроенный микрокомпьютер	—	+	—
Встроенная сетевая плата	+	+	—
Вход USB	+	+	+
Рабочий температурный диапазон, °С	–25...50	–10...50	–40...65
Возможность работы с литий-ионными аккумуляторами	+	—	+
Габариты [В × Г × Ш], см	63 × 37 × 51	50 × 62,2 × 16,75	56,5 × 32,3 × 45
Масса без упаковки, кг	69,3	45	90
Цена, руб.	253 500	269 544	546 000

Инвертор использован для обеспечения бесперебойного и/или автономного питания оборудования, работающего от 220/230 В (или 380/400 В для трехфазных систем) переменного напряжения. Инвертор преобразует энергию, накопленную в АКБ, в переменное напряжение 220/230 В (или 380/400 В для трехфазных систем из трех инверторов).

МАП HYBRID 48–4.5 имеет возможность сборки на его базе трехфазного комплекса. Трехфазный комплекс включает в себя три прибора одинаковой мощности. Благодаря их синхронизации комплекс может обеспечивать бесперебойность работы по трем фазам, при этом он дает возможность подключать трехфазные нагрузки. Приборы подключают к одному массиву АКБ, их заряд ведется и регулируется всеми приборами в зависимости от установленной емкости и алгоритма заряда.

Разработка электрической принципиальной схемы трехфазного комплекса солнечных инверторов МАП HIBRID 48–4.5. В данном проекте для питания трехфазных асинхронных двигателей пропульсивной установки катамарана необходимо трехфазное напряжение номиналом 380 В, с этой целью был разработан трехфазный комплекс солнечных инверторов, работающих автономно от массива аккумуляторных батарей.

Для настройки системы необходимо в меню «Генерация МАП» войти в подкаталог «Синхронизация МАП» и установить на одном МАП «Ведущий/Фаза1», а на остальных приборах выставить «Фаза2» и «Фаза3», они будут «Ведомыми фазами». После того, как введены необходимые параметры и определены приборы по фазам, необходимо соединить приборы для их синхронизации. Для этого на задней панели прибора находятся разъемы RJ-12, промаркированные как «X1» и «X2». Проводами с соответствующими разъемами соединяют инверторы, выход X1 одного инвертора со входом X2 другого. Схема соединения синхронизации МАП HYBRID 48–4.5 приведена на рис. 2.

Принципиальная электрическая схема инверторной сборки приведена на рис. 3.

Выбор серии преобразователя частоты. Основными критериями для выбора преобразователей частоты пропульсивной установки катамарана будут: оптимальное соотношение качества регулирования, большие пусковые моменты, высокие токи перегрузки и низкая стоимость. В результате сравнения для установки на ПУ солнечного катамарана был выбран преобразователь частоты фирмы PROSTAR, модель PR6000-0075T3G. Он является высокотехнологичным устройством, обладающим высокой точностью, широким диапазоном регулирования и обеспечивающим высокий момент на валу электродвигателя. Также данный преобразователь имеет хорошие массогабаритные показатели и приемлемую стоимость.

Сравнение технико-экономических показателей разработанного электропривода с аналогами. В качестве аналога приведем электромоторы Torqeedo Cruise 4.0 TL, ранее использовавшиеся на солнечном катама-



Рис. 2. Схема синхронизации МАП HYBRID 48–4.5

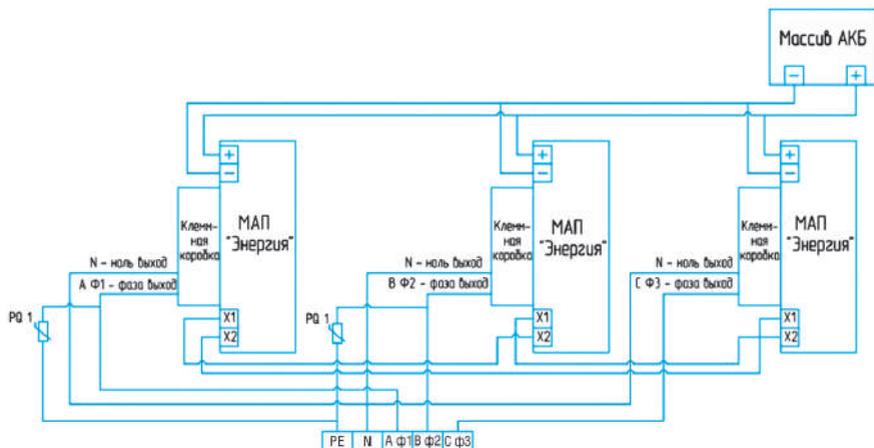


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная инверторной сборки

ране «Эковолна». Стоимость двух электромоторов Torqeedo Cruise 4.0 TL составляла 667 368 руб.

Список компонентов разработанного электропривода с указанием их стоимости: короткозамкнутый асинхронный двигатель 4 кВт (2 шт.) — по 12 631 руб.; инвертор МАП HYBRID 48–4.5 (3 шт.) — по 84 500 руб.; преобразователь частоты PR6000-0075Т3G (2 шт.) — по 31 450 руб.

Суммарная стоимость компонентов комплекса составляет 341 122 руб. Таким образом, разработанный электропривод имеет значительное преимущество в сравнении с серийным аналогом: его стоимость снижается практически в два раза.

Также стоит учесть, что в отличие от модели компании Torqeedo разрабатываемый привод состоит из нескольких отдельно исполненных компонентов. Такое исполнение обладает высокой ремонтопригодностью и способностью восстановления функционирования простой заменой отдельных компонентов системы с существенным сокращением трудоемкости и капиталовложений. При выходе из строя модели компании Torqeedo пользователю надо обращаться в специализированный сервис и, скорее всего, заменять целиком весьма дорогостоящий электромотор.

Литература

1. Курылев А.С., Зайнутдинов Р.А., Курылев С.А. Технологическое развитие энергоэффективных судов с альтернативными источниками энергии // Промышленная энергетика. 2019. № 7. С. 54—60.

2. **Курылев С.А., Зайнутдинов Р.А.** Основы применения солнечных электростанций в составе судовых энергетических установок // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. Качество — Безопасность — Диагностика. 2017. С. 595—600.
3. **Чернышев А.Ю., Дементьев Ю.Н., Чернышев И.А.** Электропривод переменного тока. М.: Юрайт, 2019. 215 с.

*Д.В. Переверзев, danupwf@gmail.com,
В.А. Кабанов, kabanov.valerij2011@yandex.ru,
Н.В. Сычев, sychevn@inbox.ru,
М.Р. Королёв, maxkor42@gmail.com,
НИУ «МЭИ», Москва*

ПРИМЕНЕНИЕ ВОДОРОДНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ НА ЗАПРАВОЧНОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ВОДОРОДНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АВТОМОБИЛЕЙ

В настоящее время наблюдается постоянное увеличение спроса на традиционное углеводородное сырье. Ограниченность запасов нефти и газа и неуклонный рост цен на них заставляют передовые страны вести активные поиски альтернативных энергоносителей, в частности на основе водорода.

Неоспоримым преимуществом водорода по сравнению с традиционными углеводородными энергоносителями является его экологичность — в процессе выработки электроэнергии при помощи водородных топливных элементов отсутствуют выбросы парниковых газов в атмосферу. Россия с ее огромными природными ресурсами имеет большой потенциал в развитии этой отрасли энергетики.

Цель работы — исследование водородных накопителей энергии и способов их применения. В качестве объекта исследования выбрана заправочная станция для водородных и электрических автомобилей (в дальнейшем водородная заправочная станция, или ВЗС), получающую электроэнергию от солнечной электростанции (СЭС). В процессе проектирования ВЗС изучена возможность применения различных типов водородных накопителей, подобрано основное оборудование, необходимое для работы объекта, и сделан вывод о целесообразности применения водородных технологий для выбранной отрасли.

Местом расположения ВЗС выбрана станция Раевская в Краснодарском крае. Выбор сделан по двум критериям: наибольшая величина среднегодового солнечного излучения в регионе — около $4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в сутки; на до-

рогах Краснодарского края в настоящее время в эксплуатации находится около 500 электромобилей, что рождает спрос на развитие инфраструктуры зарядных станций.

Для расчета принято, что число потребителей составляет 200 машин в сутки, из них 160 — электромобили, оставшиеся 40 — автомобили, использующие в качестве топлива водород.

Расчетный электромобиль — Nissan Leaf. Принимается, что зарядка производится в среднем на 70 % емкости аккумулятора. Согласно паспортным данным автомобиля, емкость аккумулятора равна 40 кВт·ч, зарядка от 0 до 80 % происходит за 40 минут при мощности 50 кВт постоянного тока [1].

В качестве водородного автомобиля принят Toyota Mirai. Считаем, что заправка производится в среднем на 60 % емкости водородного бака. Согласно паспортным данным автомобиля, заправка занимает 5 мин, требуемое для заправки давление — не менее 70 МПа [2].

Основное оборудование зарядного комплекса: СЭС; генератор водорода; система хранения водорода; топливные элементы; компрессор для заправки водородных автомобилей. СЭС состоит из трех основных компонентов: солнечной батареи; инвертора; водородных накопителей.

Водород удобнее всего получать путем электролиза. Основные способы хранения водорода: в газообразной форме в баллонах под давлением; в сжиженном виде в криогенных танках, с транспортировкой по трубопроводам; в обратимо связанном состоянии: твердые металлогидриды — в контейнерах, жидкие соединения — в цистернах или трубопроводах. Ввиду дороговизны хранения водорода в сжиженном виде рассматриваются два способа: хранение под давлением и хранение в интерметаллических соединениях.

Хранение под давлением происходит в специальных баках-ресиверах. При этом само давление, под которым хранится газ, может существенно различаться. Основным ограничением здесь выступает безопасность — чем больше давление водорода, тем выше угроза его взрыва.

Суть хранения водорода в интерметаллических соединениях заключается в следующем. В емкости, предназначенные для хранения, помещают специально подобранные сплавы некоторых металлов, которые при определенных давлении и температуре обладают свойством подобно губке поглощать водород, превращаясь при этом в гидрид. При изменении параметров (повышении температуры или давления) гидрид вновь распадается, высвобождая водород.

Использование гидридов имеет значительные преимущества в отношении техники безопасности. Поврежденный сосуд с гидридом водо-

рода представляет значительно меньшую опасность, чем поврежденный жидководородный танк или сосуд высокого давления, заполненный водородом.

Существуют различные виды топливных элементов.

1. Твердоокисидные топливные элементы (SOFC). Они находят широкое применение от вспомогательных энергоблоков в транспортных средствах до стационарной выработки электроэнергии с выходной мощностью от 100 Вт до 2 МВт. Более высокая рабочая температура делает SOFC подходящими кандидатами для использования с устройствами рекуперации энергии тепловых двигателей или комбинированием тепла и энергии, что дополнительно увеличивает общую топливную эффективность.

2. Протонообменные мембранные топливные элементы (ПЭМ). Топливные элементы с протонообменной мембраной, также известные как топливные элементы с полимерным электролитом или PEMFC, обеспечивают высокую удельную мощность и обладают рядом преимуществ, связанных с их малым весом и объемом, по сравнению с другими топливными элементами. Сегодня топливный элемент из ПЭМ является общепринятым выбором для применения в автомобильном транспорте (автомобиль, автобус, грузовик и т. д.)

3. Щелочные топливные элементы (AFC) — самые дешевые в производстве. Одним из их преимуществ является то, что производимая вода пригодна для питья. В настоящее время этот тип FC проходит испытания для стационарных источников питания [3].

Давление, при котором хранится водород в ресиверах, и давление, при котором происходит высвобождение водорода из металлгидридов, исчисляются единицами МПа. В то же время для зарядки расчетного водородного автомобиля требуется давление не менее 70 МПа. Для обеспечения требуемого давления необходим компрессор.

Расчет необходимого количества водорода начинается с определения потребления электроэнергии для зарядки электромобилей на 70 %:

$$\Theta_{\text{эл.моб}} = n_{\text{эл.моб}} E_{\text{эл.моб}} \cdot 0,7 = 160 \cdot 40 \cdot 0,7 = 4480 \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (1)$$

где $n_{\text{эл.моб}}$ — количество электромобилей; $E_{\text{эл.моб}}$ — энергия заряда электромобиля.

Для производства 4480 кВт·ч энергии для заряда электромобилей посредством топливных элементов (далее ТЭ) при расходе 22,2 Нм³ на 30 кВт·ч требуется:

$$V_{\text{вод. элмоб}} = \Theta_{\text{эл.моб}} \frac{22,2}{30} = 4480 \frac{22,2}{30} = 3315,2 \text{ Нм}^3, \quad (2)$$

Нормальный кубический метр водорода весит 89,88 г. Учитывая, что полный бак заданного водородного автомобиля весит 5,6 кг, водорода требуется:

$$V_{\text{вод.водмоб}} = \frac{m_{\text{бак}}}{m_{\text{вод}}} = \frac{5,6}{0,08988} = 62,3 \text{ Нм}^3, \quad (3)$$

где $m_{\text{бак}}$ — масса бака автомобиля, $m_{\text{вод}}$ — масса нормального метра кубического водорода.

На 60 % зарядки всех водородных автомобилей понадобится:

$$V_{\text{вод.водмоб}} = n_{\text{вод.моб}} V_{\text{вод.водмоб}} + 0,6 = 40 \cdot 62,3 \cdot 0,6 = 1495,2 \text{ Нм}^3, \quad (4)$$

где $n_{\text{вод.моб}}$ — количество водородных автомобилей.

Итого на заправку всех машин, водорода в сутки требуется:

$$V_{\text{вод}} = V_{\text{вод.элмоб}} + V_{\text{вод.водмоб}} = 3315,2 + 1495,2 = 4810,4 \text{ Нм}^3. \quad (5)$$

В таком случае выработка водорода составит:

$$E_{\text{вод}} = \frac{V_{\text{вод}}}{24} = \frac{4810,4}{24} = 200,5 \text{ Нм}^3/\text{ч}. \quad (6)$$

Данные расчета необходимого количества водорода сведены в табл. 1.

Таблица 1

Количество водорода, требуемого на ВЭС

$V_{\text{вод.элмоб}}, \text{ Нм}^3$	3315,2
$V_{\text{вод.водмоб}}, \text{ Нм}^3$	1495,2
$V_{\text{вод}}, \text{ Нм}^3 \text{ (кг)}$	4810,4 (432,4)
$E_{\text{вод}}, \text{ Нм}^3/\text{ч}$	200,5

Рассмотрим выбор генератора водорода. Цена одного электролизера составит 139 тыс. долл., а общая стоимость семи аппаратов производительностью 30 Нм³/ч составит 72,975 млн руб.

Промышленные установки требуют напряжения $3 \times 400 \text{ В}$ ($\pm 3 \%$) переменного тока частотой 50 Гц. При этом потребление составит 174 кВт при токах в 300 А. Данные о выбранном электролизере приведены ниже:

Производитель	Toplink Chemical Technology
Напряжение	380 В, $\pm 3\%$, 3 фазы
Частота	50 Гц
Мощность	174 кВт
Производительность	30 Нм ³ /ч
Чистота водорода	99,99 %
Цена	139 тыс. долларов

Для электролиза требуется 4,7 кВт·ч/Нм³ [4]. Соответственно требуемая суточная выработка составит

$$\Theta_{\text{эл.эл}} = V_{\text{вод}} E_{\text{эл}} = 4810,4 \cdot 4,7 = 22\,610 \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (7)$$

где $E_{\text{эл}}$ — затраченная энергия на электролиз 1 Нм³.

Далее произведен подбор топливного элемента. Для зарядки Nissan Leaf на расчетные 70 % исходя из паспортных данных [1] потребуются 34 мин. Соответственно требуемая мощность стэка ТЭ составляет 50 кВт.

По данным китайских производителей ТЭ мощностью 50 кВт будет стоить 190 тыс. долларов, или 14,25 млн руб.

Количество зарядных мест для 160 автомобилей в сутки составит

$$n_{\text{зар}} = \frac{n_{\text{эл.моб}}}{24 \frac{t_{\text{ч}}}{t_{\text{зар}}}} = \frac{160}{24 \frac{60}{34}} = 3,8 \text{ места}, \quad (8)$$

где $t_{\text{ч}}$ — время часа в минутах; $t_{\text{зар}}$ — время зарядки автомобиля на 70 % в минутах.

Итак, потребуется четыре заправочных места, общая выработка ЭЭ будет составлять

$$\Theta_{\text{общ}} = P_{\text{зар}} \cdot 24 n_{\text{зар}} = 50 \cdot 24 \cdot 4 = 4800 \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

где $P_{\text{зар}}$ — мощность зарядки.

Требуемая для зарядки электромобилей мощность составляет 4480 кВт·ч. Избыток, равный 320 кВт·ч, будет расходоваться на электрооборудование станции и, при возможности, отдаваться в сеть. Общая стоимость — 57 млн руб.

Для хранения водорода под давлением требуются ресиверы. Максимальное выходное давление электролизеров — 3 МПа. Наиболее близкое распространенное на рынке решение — ресиверы с давлением 2,5 МПа. Для хранения необходимого объема водорода при данном давлении требуется ресивер чуть менее 200 м³.

На основании анализа рынка установлено, что стоимость подходящего ресивера составляет 1,5 млн руб.

Цена необходимого количества металлгидрида MgH₂ составляет 160 тыс. руб. Но помимо цены гидрида имеет значение и оборудование для создания и поддержания необходимой температуры.

Исходя из требуемой мощности нагревательной установки (66,52 кВт) выбрана печь ПШО 10.20/7 (И1) стоимостью 1,579 тыс. руб. Мощность печи равна 90 кВт.

Для обоих случаев хранения водорода необходим компрессор для заправки автомобилей топливом.

Зарядка Toyota Mirai в соответствии с паспортными данными должна занимать 5 мин. Требуемая в таком случае производительность компрессора должна составлять 750 Нм³/ч; требуемое давление — не менее 70 МПа. Стоимость такого компрессора с вдвое меньшей производительностью от фирмы NEUMAN&ESSER составляет 66,55 млн руб/шт., соответственно стоимость двух компрессоров — 133,1 млн руб.

Для СЭС требуется подобрать инвертор. Среднесуточная мощность выработки

$$P_{\text{общ}} = \frac{\Theta_{\text{эн.эл}}}{24} = \frac{22\,610}{24} = 942,1 \text{ кВт.} \quad (10)$$

Исходя из соображений надежности вся вырабатываемая электроэнергия должна передаваться через несколько инверторов. Выбранный вариант компоновки установки — 32 инвертора мощностью 30 кВт [5], модель Foshan Mars Solar Technology.

Стоимость одного инвертора равна 4454 долларов, общая стоимость составляет 10,69 млн руб.

Далее проводится выбор солнечных панелей. Требуемая выработка — 22 610 кВт·ч/сутки. В среднем за год на станицу Раевскую приходится 4 кВт·ч/м² солнечного излучения.

Солнечная батарея: габариты 1559 × 1046 мм, модуль включает целых 96 клеток SunForte PM096B00 333W от BenQ (Grid A), способных выдавать на выходе 333 Вт мощности. При этом за счет технологии IBC производитель смог добиться КПД в 20,4 %. Приведем характеристики данной панели:

Производитель	BenQ
Модель	SunForte PM096B00 333W
Габариты	1559 × 1046 мм
Мощность на выходе	333 Вт
КПД	20,4 %
Напряжение холостого хода	64,9 В
Ток короткого замыкания	6,58 А
Цена	40 000 руб.

Среднегодовой удельный приход солнечной радиации:

$$R_{\text{ср.год}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{ср.год}}^{\text{сут}}}{24} = \frac{4000}{24} = 166,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad (11)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ср.год}}^{\text{сут}}$ — среднегодовой приход солнечного излучения.

Тогда при КПД панели 20,4 % требуемое число панелей составит

$$n_{\text{пан}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{эн.эл}}}{R_{\text{ср.год}} \eta \cdot 24ab} = \frac{22\,610}{166,7 \cdot 0,204 \cdot 24 \cdot 1,559 \cdot 1,046} = 17\,000 \text{ шт.}, \quad (12)$$

где η — КПД панели; a — длина панели; b — ширина панели.

Стоимость комплекта солнечных панелей — 680 млн руб.

Итоговая стоимость составит:

при хранении водорода под давлением — не менее 904,865 млн руб.;

при хранении в металлгидридах — не менее 905,105 млн руб.

Таким образом, при сроке окупаемости 10 лет средняя стоимость заправки составит менее 1400 рублей. Эта величина сравнима со стоимостью обычной заправки на бензиновой АЗС.

Можно сделать вывод, что уже на сегодняшний день водородные технологии в сфере заправки экоавтомобилей в теории могут быть успешно коммерциализированны. На практике же основным препятствием выступает недостаточная распространенность данного вида транспорта.

Литература

1. **Технические** характеристики Nissan Leaf [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://autotesla.ru/other-elektrokar/elektromobili-nissan/nissan-leaf-obzor-elektromobilya.html>
2. **Технические** характеристики Toyota Mirai [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.drom.ru/catalog/toyota/mirai/>
3. **Виды** топливных элементов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://econet.ru/articles/86640-toplivnyye-elementy-vidy-i-printsip-raboty>
4. **Водородные** электролизеры. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gasonsita.ru/hydrogen-electrolysis>
5. **Инвертор**. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://russian.alibaba.com/product-detail/high-efficiency-30kw-off-grid-inverter-hybrid-with-controller-off-grid-for-solar-system-1600134915613.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.3f7c7ab8sPDkQd

*А.Н. Дорошин, doroshinan@yandex.ru,
Н.В. Сычев, sychevn@inbox.ru,
В.А. Кабанов, kabanov.valerij2011@yandex.ru,
НИУ «МЭИ», Москва*

ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОСТИНИЧНОГО КОМПЛЕКСА

В наше время человечество занимается активным поиском способов уменьшения влияния производственной деятельности человека на климат и экологическую обстановку на планете. Maria Zuber, вице-президент Мас-сачусетского технологического института по исследовательской деятельности, выделяет три области исследования, имеющие потенциал в борьбе с климатическими изменениями: аккумуляторные технологии, возобновляемые источники энергии и управляемый термоядерный синтез.

Аккумуляторы важны для внедрения возобновляемых источников энергии. Нам нужны аккумуляторы с большей емкостью, эффективностью и меньшей стоимостью [1]. Из-за непостоянства генерации СЭС необходимо использовать накопители, которые будут запасать избыток электроэнергии, вырабатываемый солнечными панелями и отдавать его потребителям в моменты времени, когда выработка СЭС меньше потребления. Также применение накопителей поможет оптимизировать работу дизельного генератора: сократит объем выбрасываемого углекислого газа и уменьшит зависимость от привозного топлива.

При реализации автономного электроснабжения от гибридной системы необходимо распределить режимы работы и степени загрузки источников электроэнергии во времени. СЭС работает в базовой части графика нагрузки, а излишки электроэнергии расходуются на заряд аккумуляторных батарей, которые покрывают график нагрузки в часы отсутствия генерации СЭС. Дизельный генератор включается в часы максимальной нагрузки.

В качестве объекта электроснабжения рассматривается экоотель вблизи озера Байкал. Помимо жилых помещений на территории отеля есть кухня и баня. Техническое оснащение жилого номера: чайник, холодильник, фен, освещение, две розетки. Техническое оснащение кухни: освещение, вентиляция, холодильное оборудование. Также в отеле предусмотрена система водоснабжения и уличное освещение.

С использованием свода правил СП 256.1325800.2016 методом коэффициента спроса были определены расчетные нагрузки электроприемников. Также рассчитана суммарная мощность электроприемников и определен суточный график нагрузки (рис. 1). Общая расчетная мощ-

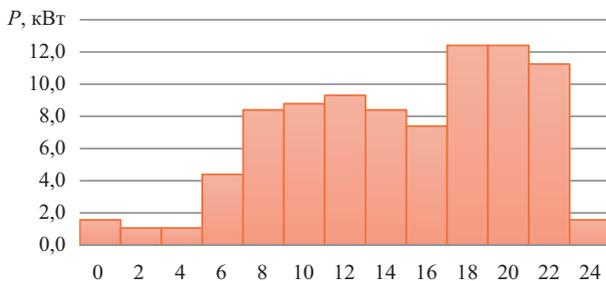


Рис. 1. Суточный график нагрузки

ность электроприемников $P_{\text{нагр}}$ составляет 13 кВт, суточное потребление $\mathcal{E}_{\text{потр}} = 172,8$ кВт·ч.

Для эффективной работы автономной системы электроснабжения необходимо выполнение баланса вырабатываемой и потребляемой мощности. Однако наличие в системе блока аккумуляторных батарей приводит к тому, что генерация и потребление электроэнергии могут не совпадать. В этом случае появляется возможность запасать излишки энергии в часы, когда нагрузка уменьшается, и выдавать дополнительную энергию в сеть в периоды пика нагрузки. Это условие представлено следующим выражением:

$$0 = P_{\text{ген}} - P_{\text{нагр}} \pm P_{\text{акб}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{нагр}}$ — активная и реактивная мощность нагрузки; $P_{\text{ген}}$ — мощность генерирующих установок; $P_{\text{акб}}$ — активная мощность, выдаваемая или потребляемая аккумуляторными батареями [2]. Выполнение этого условия обязательно при покрытии суточного графика нагрузки. Оно выступает в роли технологического ограничения для режима работы автономной системы электроснабжения.

Суммарный суточный приход солнечной радиации (\mathcal{E}_{Σ}) на горизонтальную площадку и время солнечного сияния для каждого дня ($T_{\text{сс}}$) определены с помощью базы данных «NASA» [3]. Для проекта выбраны солнечные модули HVL-395/HJT номинальной мощностью $N_{\text{мод}} = 395$ Вт производства компании «Хевел» [4].

Для каждого суток в году определена необходимая мощность СЭС для покрытия графика нагрузки:

$$N_{\text{СЭС}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{потр}}}{T_{\text{сс}}}. \quad (2)$$

Количество солнечных модулей, обеспечивающих необходимую мощность СЭС:

$$n_{\text{мод}} = \frac{N_{\text{СЭС}}}{N_{\text{мод}}}. \quad (3)$$

При выборе оптимального количества солнечных модулей будем опираться на то, что установленная мощность СЭС должна быть больше или равна общей мощности электроприемников:

$$N_{\text{СЭС}} \geq P_p. \quad (5)$$

На рисунке 2 представлена зависимость количества солнечных модулей, необходимого для выполнения условия (4), от годового изменения времени солнечного сияния в рассматриваемой географической точке.

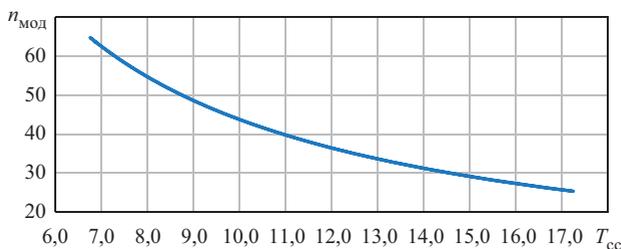


Рис. 2. Зависимость $n_{\text{мод}}$ от $T_{\text{сс}}$

В ходе анализа зависимости, показанной на рис. 2, определено оптимальное количество солнечных модулей $n_{\text{мод}} = 33$, обеспечивающих мощность СЭС $P_{\text{СЭС}} = 13$ кВт.

Ежедневная выработка СЭС рассчитывается по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{СЭС}} = N_{\text{мод}} n_{\text{мод}} T_{\text{сс}}. \quad (5)$$

Так как большую часть года солнечная активность в рассматриваемом регионе крайне низкая, СЭС из 33 модулей не сможет ежедневно покрывать график нагрузки. Поэтому в данной системе автономного электроснабжения используется дизельный генератор. Мощность генерирующих установок $P_{\text{ген}} = P_{\text{СЭС}} + P_{\text{диз}}$.

Определим объем дизельного топлива $V_{\text{диз}}$, необходимого для функционирования данной энергосистемы, из расчета, что на 1 л сгоревшего топлива вырабатывается 4 кВт·ч:

$$V_{\text{диз}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{потр}} - \mathcal{E}_{\text{СЭС}}}{4}. \quad (6)$$

В год необходим объем дизельного топлива $V_{\text{диз}} = 2735$ л.

Емкость аккумуляторных батарей должна быть достаточна для покрытия графика нагрузки в течение суток:

$$C_{\Sigma \text{акб}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{потр}}}{U k_{\text{раз}}}, \quad (7)$$

где $\mathcal{E}_{\text{потр}}$ — объем электроэнергии, потребляемый в сутки; U — напряжение аккумуляторной батареи; $k_{\text{раз}}$ — коэффициент, учитывающий глубину разряда аккумуляторной батареи, принимается равным 0,7.

Получаем $C_{\Sigma \text{акб}} = 5143$ А·ч. Для обеспечения требуемой емкости отдельные аккумуляторы необходимо соединить параллельно. Последовательное соединение аккумуляторов увеличивает напряжение на зажимах аккумуляторной батареи, не влияя на емкость. Необходимое число параллельных элементов в батарее ($n_p = 7$ шт) рассчитывается по формуле

$$n_p = \frac{C_{\Sigma \text{акб}}}{C_i}, \quad (8)$$

где C_i — емкость одного аккумулятора.

Необходимое число последовательных элементов ($n_s = 15$ шт.) рассчитывается по формуле

$$n_s = \frac{U}{u_i}, \quad (9)$$

где u_i — емкость одного аккумулятора. Итого аккумуляторная батарея должна содержать 105 аккумуляторов:

$$n = n_s n_p. \quad (10)$$

Технические характеристики выбранного оборудования приведены в табл. 1 и 2.

Т а б л и ц а 1

Технические характеристики используемых аккумуляторов

Тип аккумулятора	Литий-железо-фосфатный
Марка	LT-LFP 770P
Номинальная емкость, А·ч	770
Номинальное напряжение, В	3,2
Количество параллельных элементов, шт.	7
Количество последовательных элементов, шт.	15

Окончание табл. 1

Тип аккумулятора	Литий-железо-фосфатный
Максимальный ток заряда/разряда	3С/3С
Количество циклов	3000
Стоимость розничная, руб.	46 000

Т а б л и ц а 2

Предлагаемое оборудование для автономной системы электроснабжения

Наименование	Марка	Количество, шт.	Единичная стоимость, руб.	Стоимость комплекта, руб.
Солнечный модуль	HVL-395/HJT	33	18 490	610 170
Аккумулятор	LT-LFP 770P	105	46 000	4 830 000
Дизельный генератор	Амперос АД 13-Т400В(с АВР)	1	284 100	284 100
Система мониторинга и управления	Schneider Electric XW-SCP	1	26 880	26 880
Контроллер заряда	—	16	440	7040
Инвертор	Schneider Electric Conext CL20E Base	1	399 005	399 005

Предлагаемая система электроснабжения обеспечит «зеленой энергией» отель в рассматриваемой географической точке. А применение нескольких источников генерации и накопителей электроэнергии обеспечит надежность и эффективность электроснабжения.

Литература

1. **MIT News**. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://news.mit.edu/2020/maria-zuber-on-climate-change-breakthroughs-will-happen-0422>.
2. **Кузнецова Н.Д., Митрофанов С.В.** Анализ эффективности применения различных типов аккумуляторных батарей в автономных системах электроснабжения // Вестник ПНИПУ. 2018. № 25. С. 48—57.
3. **Специализированная база данных «NASA»**. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://eosweb/larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi>.
4. **Официальный сайт группы компаний «ХЕВЕЛ»**. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.hevelsolar.com>

ОЦЕНКА РИСКА ПОЖАРА НА АВТОНОМНОЙ ГИБРИДНОЙ СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Обязательной составляющей системного подхода по принятию технических решений и реализации мер, направленных на снижение/предотвращение ущерба от техногенных аварийных ситуаций, способных нанести вред человеку или природе, причинить имущественный ущерб, является анализ рисков. Сам комплекс мероприятий носит название *обеспечение промышленной безопасности* или же *управление риском — хеджирование* [1].

Риски, которые возникают в процессе эксплуатации генерирующих систем с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), условно можно отнести к одной из двух категорий [2].

1. Риски, обусловленные зависимостью производства электроэнергии от климатических условий, метеорологических факторов. Конкретно для солнечной энергетики таким неблагоприятным для достаточной генерации электроэнергии фактором является облачность. Очевидно, что для нормальной работы солнечной электростанции (СЭС) необходим резервный традиционный источник питания (например, дизельная электростанция) и/или аккумуляторная батарея (АБ).

2. Риски, наступающие в результате выхода из строя элементов генерирующей установки. Несмотря на то, что СЭС устроены по модульному принципу (выход из строя одного или нескольких модулей не приведет к прекращению работы всей СЭС) и не содержат движущихся частей (поломка которых наиболее вероятна в сложных многокомпонентных технических системах), известны, в частности, случаи возникновения пожара на них.

Так, например, в 2016 г. произошел пожар на крупнейшей в мире солнечной электростанции Ivanpah Solar Electric Generating System (ISEGS), расположенной в Калифорнии [3]. Крупный пожар, приведший к недоотпуску значительного объема электроэнергии, произошел вследствие компьютерного сбоя, который изменил настройку расположения зеркал и направил отраженный солнечный свет на бойлерную вышку. В 2020 г. в поселке Новосергиевка (близ Оренбурга) на территории СЭС также случился пожар. Известно, что огонь уничтожил инверторную установку площадью 25 м² [4].

В таблице 1 приведены ключевые риски солнечной генерации и основные мероприятия по управлению рисками.

**Ключевые риски солнечной генерации и основные мероприятия
по управлению рисками**

Стадия жизненного цикла	Ключевые риски	Мероприятия по управлению рисками
Проектирование	<p>Ошибки проектирования</p> <p>Высокие капитальные затраты</p> <p>Изъятие земель из сельскохозяйственного производства</p> <p>Надежность солнечных модулей</p>	<p>Совершенствование методов проектирования</p> <p>Новые конструкции солнечных модулей с меньшей стоимостью 1 Вт мощности</p> <p>Гарантии на оборудование (до 25 лет)</p>
Эксплуатация	<p>Отказы элементов (короткие замыкания)</p> <p>Погодные риски (характеристики инсоляции и аварии)</p> <p>Токсичность компонентов (соединений селена)</p> <p>Кражи и вандализм</p>	<p>Стандартные компоненты с взаимозаменяемостью</p> <p>Устройства защиты и автоматики</p> <p>Техобслуживание</p> <p>Утилизация солнечных модулей</p> <p>Охранные системы</p>

В нормальных рабочих условиях эксплуатации автономная СЭС функционирует штатно и не требует присутствия обслуживающего персонала, а на природные явления (дождь, облачность, пыль) солнечные модули должны быть рассчитаны. Однако прервать нормальную работу СЭС способны внештатные ситуации, например, град или короткое замыкание (КЗ), произошедшее на силовом кабеле, связывающем фотоэлектрический модуль и инвертор. В случае возникновения КЗ автоматические выключатели должны отключить станцию от питания, при этом сработает сигнализация, информация о возникновении внештатной ситуации передается диспетчеру на диспетчерский пункт. Однако релейная защита и автоматика способны дать отказ в срабатывании, тогда ситуация может стать критической и привести к возникновению пожара.

Одной из основных причин пожара на СЭС является возникновение электрической дуги. В фотоэлектрической системе температура дуги достаточно высока, дуга способна расплавить медь, алюминий, стекло, окружающие поверхности. Дуга в системах постоянного тока считается опасным явлением и будет сохраняться до тех пор, пока есть напряжение, в отличие от систем переменного тока, где дуга, вероятнее всего, затухнет при изменении напряжения, многократно проходя «через ноль».

Неисправность может возникнуть в любой точке кабеля постоянного тока, соединяющего фотоэлектрические модули с инвертором, обычно располагающимся рядом с распределительным щитом [5]. На рисунке 1 показан характерный случай повреждения солнечной панели.



Рис. 1. Поврежденный пожаром фотоэлектрический модуль [5]

Оценка риска с помощью диаграмм причина—последствие (ДПП), являющихся комбинацией деревьев отказов (ДО), выявляющих причины аварий, и деревьев событий (ДС), выявляющих последствия, предполагает три стадии (рис. 2).

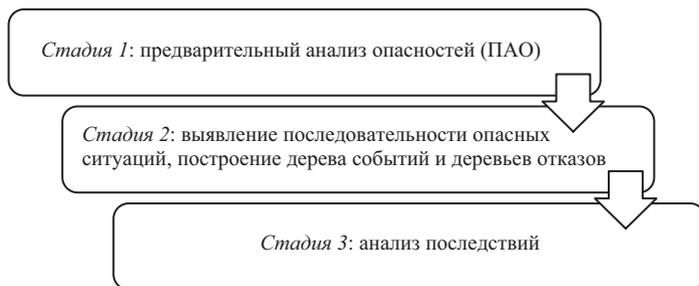


Рис. 2. Стадии оценки риска

Стадия 1 выявляет и рассматривает последовательности событий, которые способны опасность превратить в происшествие, а также рассматривают процедуры по ликвидации последствий этих происшествий. Другими словами, ПАО — это анализ компонентов оборудования системы генерации с ВИЭ и событий, которые могут привести к возникновению опасности. События, как правило, анализируются с помощью ДО [6].

Стадия 2 предполагает выявление последовательностей опасных ситуаций. После выбора оборудования и конфигурации системы применяются два аналитических метода: метод ДС [7], логика которого является индуктивной, и метод ДО с логикой дедуктивного типа.

Стадия 3 подразумевает анализ последствий: подсчитывается материальный ущерб разных вариантов развития событий, оценивается экологическое воздействие, масштабы повреждений оборудования.

Для составления ДПП необходимо выбрать критическое инициирующее событие, за которым потянется последующая цепь аварийных ситуаций.

Целью данной работы является оценка риска пожара на автономной гибридной солнечно-дизельной энергоустановке мощностью 100 кВт, расположенной в с. Яйло Республики Алтай. Конфигурация автономной гибридной энергоустановки (АГЭУ) показана на рис. 3.

В состав АГЭУ входят:

- четыре блока фотоэлектрических модулей (ФЭМ) суммарной мощностью 60 кВт;
- два дизель-генератора (автономный и резервный), мощностью 40 кВт каждый;
- банк гелевых аккумуляторных батарей (АКБ) емкостью 144 кВт·ч;
- автономный блок с инверторами и системой управления.

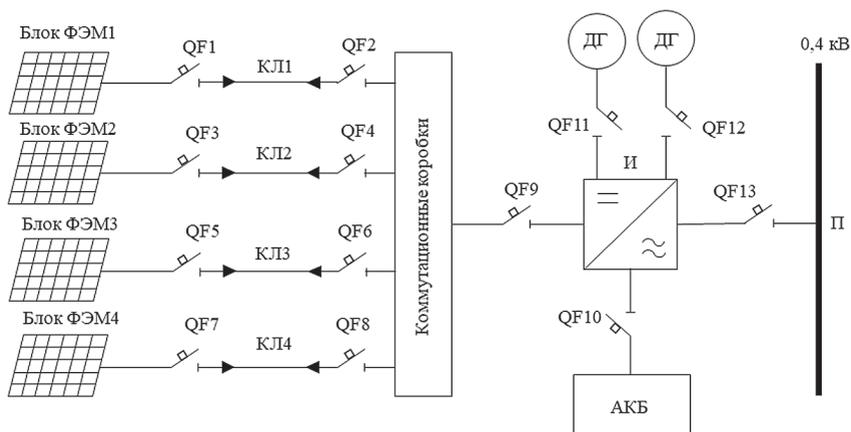


Рис. 3. Конфигурация автономной гибридной солнечно-дизельной энергоустановки

В рассматриваемом примере инициирующим событием является короткое замыкание в кабельной линии, соединяющей блок ФЭМ с комму-

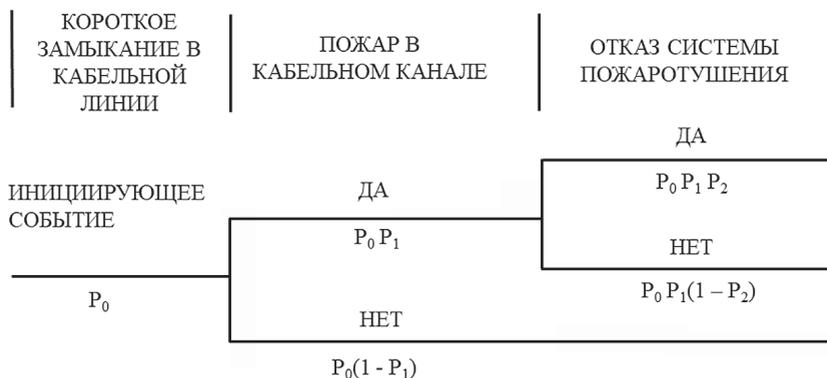


Рис. 4. Дерево событий при пожаре на АГЭУ

тационной коробкой. Развитие событий может привести к пожару (рис. 4), ущерб от которого зависит от действий релейной защиты, сигнализации и системы пожаротушения.

На рисунке 5 показана диаграмма причина—последствие, а в табл. 2 приведены значения показателей надежности для событий отказов систем и компонентов АГЭУ. Исходными данными для расчета надежности служат интенсивность отказов и восстановления компонентов АГЭУ, а коэффициент простоя определяется по характеристикам минимальных сечений отказов (МСО) [2].

Таблица 2

Показатели надежности систем и компонентов АГЭУ [2, 7, 8]

Событие	Интенсивность отказов λ_{ij} , 1/год	Время восстановления (период испытания) τ_{ij} , год	Вероятность события отказа, q_j
Отказ аппаратуры противопожарной сигнализации	$9 \cdot 10^{-2}$	$25 \cdot 10^{-2}$	—
Отказ системы пожаротушения	$9 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-1}$	—
Повреждение изоляции кабельной линии с КЗ	$7 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-4}$	—
Отказ в срабатывании выключателя	$15 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	—
Пожар в кабельной линии	—	—	$2 \cdot 10^{-2}$
Отказ релейной защиты в отключении КЗ	—	—	$0,2 \cdot 10^{-2}$

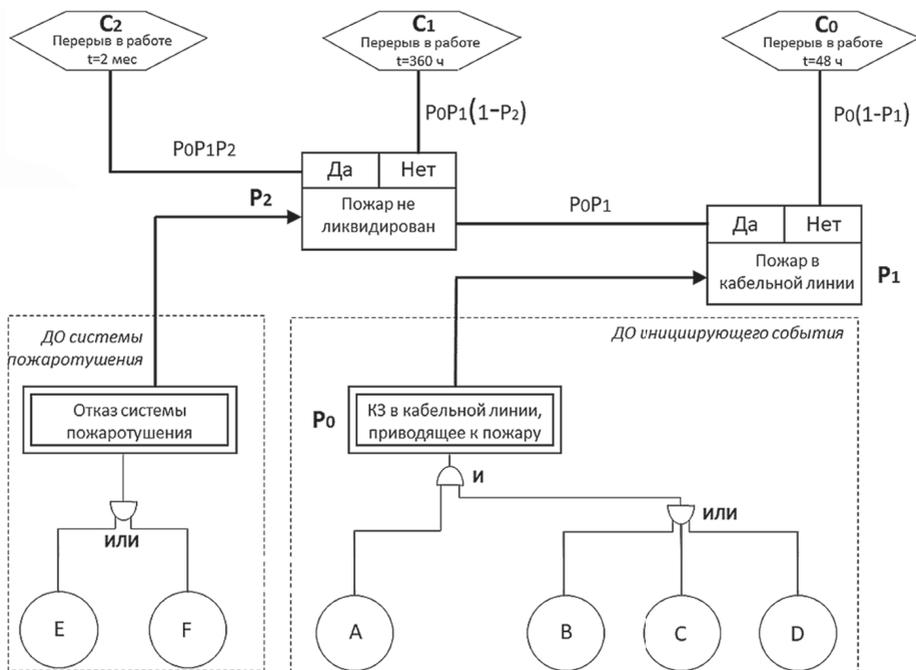


Рис. 5. Диаграмма причина — следствие для АГЭУ: А — повреждение изоляции кабельной линии; В — отказ выключателя QF1; С — отказ выключателя QF2; D — отказ релейной защиты в отключении КЗ; Е — отказ противопожарной сигнализации; F — отказ системы пожаротушения

Коэффициент простоя для j -го элемента равен

$$q_j = \frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu_j} \left[1 - e^{-(\lambda_j + \mu_j)t} \right],$$

где λ_j — интенсивность отказов элемента; μ_j — интенсивность восстановления элемента, величина, обратная времени восстановления τ_j .

Вероятность существования i -го МСО и коэффициент простоя или вероятность появления инициирующего события

$$q_i^* = \prod_{j=1}^n q_j; \quad q_C \approx \sum_{i=1}^{N_C} q_i^*.$$

Результаты расчета вероятностей событий, представленных в ДПП, приведены в табл. 3, а вероятности перерывов в работе блока ФЭМ при разных сценариях — в табл. 4.

Таблица 3

Значения вероятностей событий

Обозначение вероятности события	Численное значение параметра
P_0	$2,1 \cdot 10^{-6}$
P_1	$2,0 \cdot 10^{-2}$
P_2	$6,8 \cdot 10^{-2}$

Таблица 4

Вычисление риска аварийных событий

Событие	Перерыв в работе t_i , ч	$K + U$, руб.	Вероятность события перерыва в работе блока ФЭМ, о.е.	Риск R , руб.
C_0	48	23 074,4	$2,06 \cdot 10^{-6}$	$4,75 \cdot 10^{-2}$
C_1	360	52 458,0	$3,91 \cdot 10^{-8}$	$2,05 \cdot 10^{-3}$
C_2	1440	1 113 632,0	$2,84 \cdot 10^{-9}$	$3,16 \cdot 10^{-3}$

Последствиями пожара являются экономические потери $K_0—K_2$ для всех событий $C_0—C_2$. Они составят от 20 до 1021 тыс. руб. в зависимости от развития событий.

Определим вероятности событий перерывов в работе блока ФЭМ с различными продолжительностями и экономическими потерями: $P[C_0] = P_0(1 - P_1) = 2,06 \cdot 10^{-6}$; $P[C_1] = P_0P_1(1 - P_2) = 3,91 \cdot 10^{-8}$; $P[C_2] = P_0P_1P_2 = 2,84 \cdot 10^{-9}$.

В работе применяется упрощенный метод вычислений ущерба от недопуска энергии АГЭУ. Тариф за 1 кВт·ч выработанной на АГЭУ электроэнергии $c = 4,27$ руб/(кВт·ч). Тогда ущерб от простоя в течение 1 ч при электрической мощности блока ФЭМ $P_{\text{БФЭМ}} = 15$ кВт равен

$$U = 15 \cdot 4,27 = 64,05 \text{ руб.}$$

Оценка риска эксплуатации АГЭУ равна:

$$R = [K_i + ct_i P_{\text{БФЭМ}}] P(C_i), \quad i = (0, 1, 2).$$

где t_i — длительность перерывов в работе АГЭУ.

Результаты оценки риска приведены в табл. 4.

В результате расчета риска пожара на АГЭУ и возможных экономических потерь методом диаграмм причина—последствие видно, что они сильно зависят от величины вероятностей отказов элементов и подсистем АГЭУ. Величина экономических потерь в зависимости от длительности периода простоя АГЭУ изменяется от нескольких десятков до нескольких сотен тысяч рублей.

Литература

1. **Лесных В.В.** Анализ риска и механизмов возмещения ущерба от аварий на объектах энергетики. Новосибирск: Наука, 1999. 251 с.
2. **Тремясов В.А., Zograf Ya.E., Krivenko T.V.** Risk assessment of renewable energy generation systems projects // J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol. 2020. No 13(6). P. 702—711.
3. **Солнечная** электростанция сгорела на работе // Газета.ru. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.gazeta.ru/science/2016/05/23_a_8260373.shtml
4. **В Новосергиевском** районе произошел пожар на солнечной электростанции // Аргументы и факты. Оренбург. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://oren.aif.ru/incidents/fire/v_novosergieevskom_rayone_proizoshel_pozhar_na_solnechnoy_elektrostancii
5. **Пожароопасность** солнечных систем // Электромаг. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.kavelsib.ru/index.php?route=blog/article&article_id=232
6. **Гук Ю.Б., Синенко М.М., Тремясов В.А.** Расчет надежности схем электропитания. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. 208 с.
7. **Хенли Э.Дж., Кумамото Х.** Надежность технических систем и оценка риска. М.: Машиностроение, 1984. 528 с.
8. **Кривенко Т.В.** Развитие моделей и методов оценки надежности автономных систем генерации, использующих возобновляемые источники энергии: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Красноярск, 2018. 127 с.

*А.С. Плехов, aplehov@mail.ru,
Е.В. Крюков, kryukov@nntu.ru,
Я.И. Петухов, yaroslav.2000@mail.ru,
НГТУ, г. Н. Новгород*

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИИ ПЛАВУЧЕЙ ВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Сильный экономический рост в сочетании с более холодной зимой увеличил глобальный спрос на электроэнергию более чем на 6 %. Это самый большой показатель после выхода из финансового кризиса в 2010 г. [1]. Запасы невозобновляемых источников энергии сокращаются, а спрос увеличивается. Появляется необходимость использовать возобновляемые источники энергии [2], которые позволяют не только покрывать спрос, но и оказывают меньшее негативное влияние на экологию. Основной недостаток нетрадиционных источников — их низкие показатели плотности энергии. Для солнечных, ветровых и геотермальных установок значение плотности энергии не превышает 1 кВт/м^2 , а затраты на их производство являются колоссальными. Решить данную проблему позволит использование волновой энергии, которая обладает высокой плотностью энергии.

Волновые электростанции позволяют не только преобразовывать кинетическую энергию волн в электрическую, но и защищать прибрежную зону. Для достижения практической эффективности волновых электростанций необходимы тщательная разработка систем электрогенерации, разработка и анализ математических моделей функциональных элементов системы и проведение физических и компьютерных опытов.

Статья посвящена разработке имитационной модели системы электрогенерации плавучей волновой электростанции (ПВЭС), принципиальная схема которой приведена на рис. 1.

Имитационная модель ПВЭС состоит из следующих блоков:

- блок генератора с возбуждением от постоянных магнитов;
- блок неуправляемого выпрямителя;
- блок преобразователя Кука;
- блок управления зарядом аккумулятора (БУЗА);
- блок инвертора напряжения.

Скриншот имитационной модели блока синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов с использованием MatLab представлен на рис. 2. Генератор приводится в движение периодически, синхронно с движением морской волны.

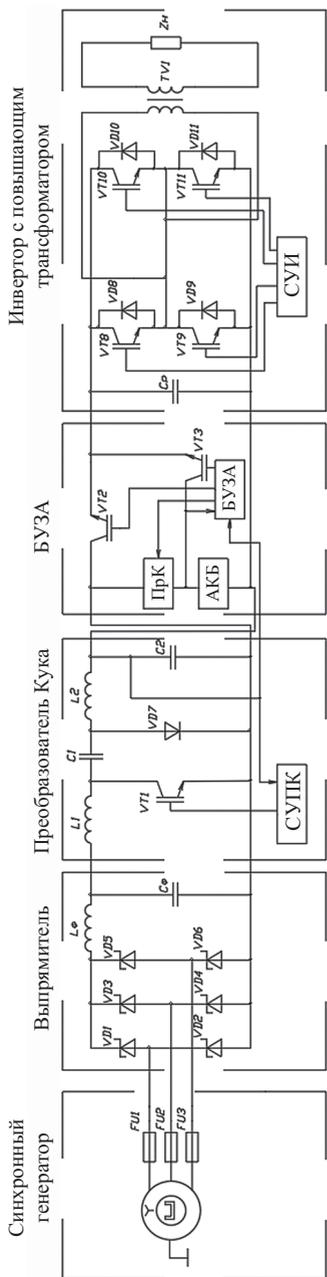


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема системы электрогенерации ПВЭС

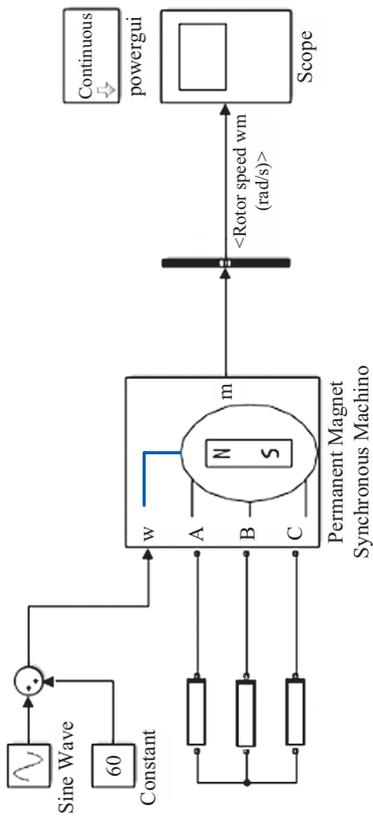


Рис. 2. Имитационная модель блока синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов

Скриншот имитационной модели блока неуправляемого выпрямителя на диодах представлен на рис. 3, блока преобразователя Кука — на рис. 4.

Скриншот имитационной модели блока управления зарядом аккумулятора представлен на рис. 5. В основе блока лежит схема повышающе-понижающего преобразователя напряжения (*buck-boost*) для поддержки питания аккумуляторной батареи.

Скриншот имитационной модели блока инвертора напряжения представлен на рис. 6. Данная модель преобразует постоянное напряжение *DC*, 12 В в переменное напряжение *AC*, 220 В.

Проведенные имитационные эксперименты позволили определить диапазоны напряжений электронных преобразовательных блоков ПВЭС, в

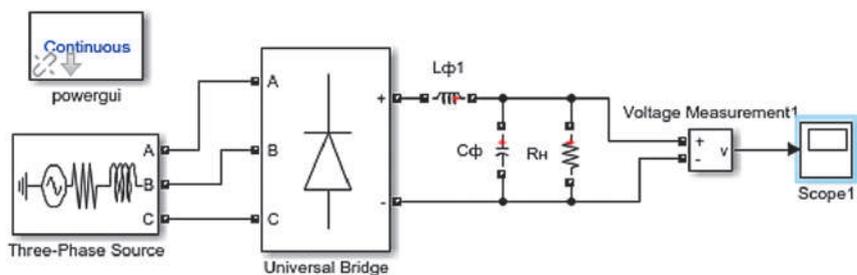


Рис. 3. Имитационная модель блока неуправляемого выпрямителя на диодах

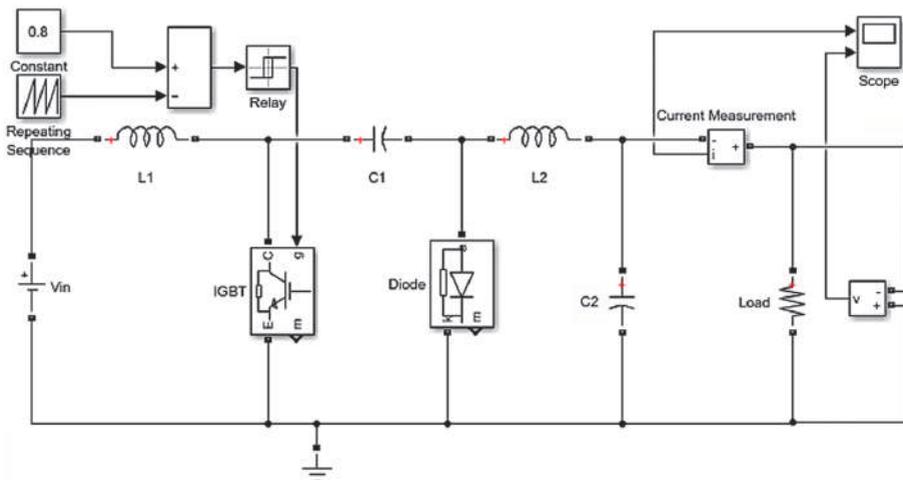


Рис. 4. Имитационная модель блока преобразователя Кука

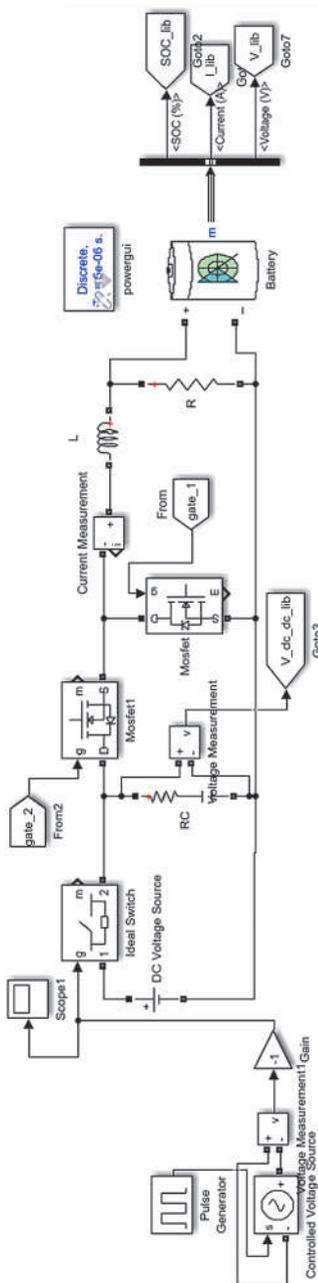


Рис. 5. Имитационная модель блока заряда аккумулятора

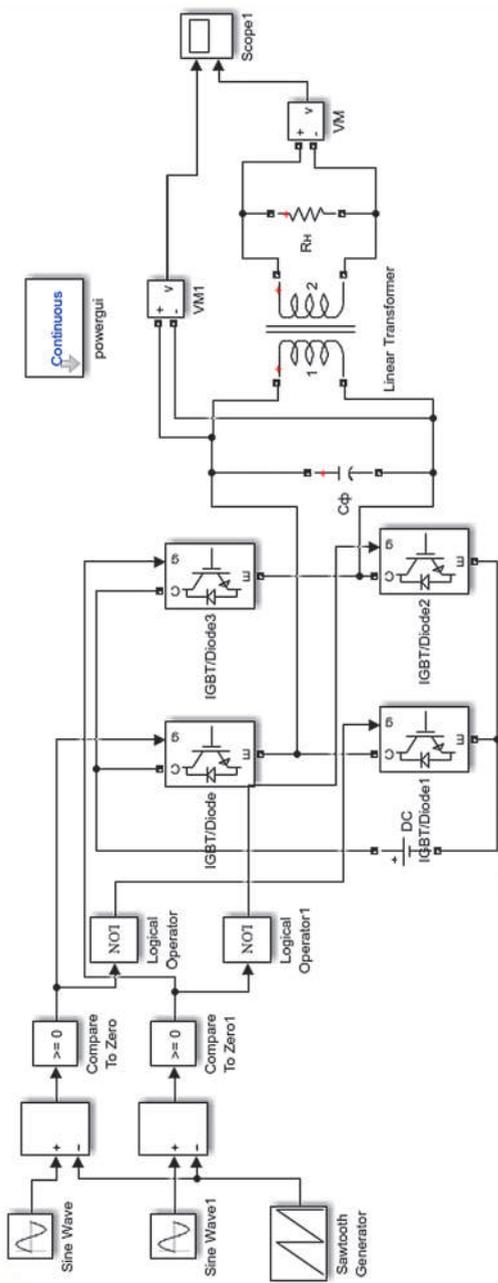


Рис. 6. Имитационная модель блока инвертора напряжения DC/AC

которых эти блоки могут функционировать, обеспечивать стабилизацию и регулирование выходных электрических величин при заданной величине нагрузки на выходе системы электрогенерации. Указанные рабочие диапазоны практически пропорционально зависят от частоты вращения ротора генератора, которая, в свою очередь, определяется периодически отбираемой энергией морских волн.

Модели позволяют визуализировать траекторию изменения исследуемых переменных состояний во времени, оценивать их значения в зависимости от режимов работы. Так, например, для определения диапазонов работоспособности агрегата «преобразователь Кука — автономный инвертор напряжения — выходной повышающий трансформатор» оцениваемой величиной является уровень напряжения питания преобразователя Кука. Это напряжение изменяется в диапазоне $[0 \dots Ud \text{ макс}]$.

При этом Ud — среднее значение напряжения на выходе выпрямителя с фильтром — обеспечивает работу исследуемого агрегата только в ограниченном диапазоне своих значений. Этот ограниченный диапазон является исходным параметром при определении соотношений установленной мощности каждой из компонент системы электрогенерации.

В результате имитационного моделирования, задавая значения напряжения питания преобразователя Кука, были получены осциллограммы изменения выходного напряжения при заданной нагрузке для каждого значения ключевого параметра в диапазоне его изменения (рис. 7). Это позволило выделить границы напряжения на выходе выпрямителя, при которой работоспособна система электрогенерации.

Было установлено, что компоненты системы электрогенерации могут обеспечивать номинальный расчетный ток при следующих диапазонах изменения входного напряжения относительно номинальных значений:

- выпрямитель — 0,02—1,0;
- преобразователь Кука — 0,1—1,0;
- блок заряда аккумулятора — 0,7—1,2;
- выходной инвертор — 0,7—1,2.

Расчеты с использованием имитационных моделей показали, что компоненты принципиальной электрической схемы системы электрогенерации должны (при равных длительностях положительной и отрицательной фаз морской волны) иметь удельные значения установленной мощности относительно требуемой мощности нагрузки, приведенные в табл. 1.

Мощность турбины и ее КПД полностью определяются волновой обстановкой в месте установки ПВЭС: высотой волны, ее фазовой скоростью и конструкцией ловушек-спойлеров. Эти параметры определяют и выбор типа турбины.

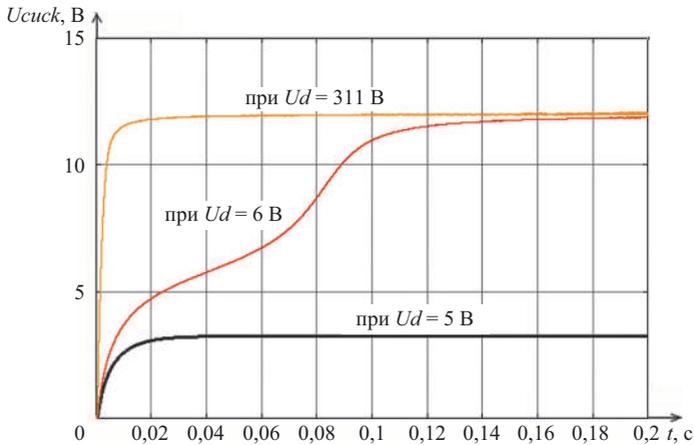


Рис. 7. Осциллограммы выходного напряжения преобразователя Кука при разном напряжении питания

Таблица 1

**Относительные значения установленной мощности системы
электрогенерации ПВЭС**

Название компонента	Относительное значение установленной мощности	Требуемая установленная мощность при нагрузке 300 Вт
Нагрузка	1	300
Трансформатор выходной повышающий	1,1	330
Преобразователь блока управления зарядом аккумулятора (БУА)	1,41	429
Проходной преобразователь Кука	3,03	901
Выпрямитель с фильтром	3,15	946
Электрический генератор	3,33	1000

Выводы. Разработана электрическая система плавучей волновой электростанции, работоспособность которой подтверждена результатами имитационных экспериментов. Компьютерные модели могут быть использованы для разработки конкретных моделей электрических подсистем современных гидротурбинных установок, а также для определения оптимальных соотношений параметров системы в зависимости от предъявляемых требований и условий эксплуатации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00424).

Литература

1. **Key World Energy Statistics 2021.** Ключевая мировая энергетическая статистика. 2022. URL: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity>.
2. **Постановление** Правительства РФ от 29 августа 2020 г. № 1298 «О вопросах стимулирования использования возобновляемых источников энергии, внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации и о признании утратившими силу отдельных положений некоторых актов Правительства Российской Федерации».
3. **Преобразование** энергии морских волн / С.Д. Чижимов, В.М. Козин, И.В. Каменских и др. // Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2014. 173 с.
4. **Тихомиров В.А., Бычков Е.В.** Компьютерный анализ КПД преобразовательных устройств // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 1. С. 93—109.
5. **Плавучая** волновая электростанция / А.А. Куркин, Д.А. Маляров, А.С. Плехов, А.Б. Дарьенков // Патент на изобретение RU 2703877 С2, 22.10.2019. Заявка № 2017135564 от 05.10.2017.

*А.А. Ковалёв, kovaley_ana@mail.ru,
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва,
В.А. Панченко, rancheska@mail.ru,
Российский университет транспорта, Москва,
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва*

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ «АНАЭРОБНАЯ БИОКОНВЕРСИЯ — МИКРОБНАЯ ЭЛЕКТРОЛИЗНАЯ ЯЧЕЙКА» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

По данным Международного энергетического агентства (МЭА), в настоящее время в мире используется лишь малая часть полного потенциала энергии биомассы. В 2018 г. в мире было произведено 35 млн т (нефтяного эквивалента) биогаза и биометана, тогда как их полный потенциал составляет 570 млн т (23 865 ПДж/год или 6629,1 ТВт·ч/год). В настоящее время фактическое использование органических отходов, потенциально пригодных для производства биогаза, составляет порядка 6,14 %, что в 36 раз больше, чем производство биогаза в РФ [1—4].

Энергетический потенциал отходов животноводства Китая составлял 5740—6730 ПДж (1594—1869 ТВтч/год), что примерно эквивалентно

213×10^6 т стандартного угля, 149×10^6 т сырой нефти или 161×10^9 м³ природного газа. Биогаз из отходов животноводства КНР в идеальном случае мог бы удовлетворить 4—5 % годового спроса на энергию или 37 % бытового потребления, что указывает на то, что биогаз можно рассматривать как стабильный и надежный источник энергии для дома [5—13].

Бразилия обладает огромным потенциалом в производстве электроэнергии из биогаза из различных органических отходов. Ежегодно в энергетическую матрицу может добавляться около 8,8 ТВт·ч/год [14—16].

По экспертным оценкам специалистов ежегодное количество отходов АПК в РФ составляет порядка 152 млн т. Животноводческие хозяйства являются основным источником образования органических отходов (навоза, помета): фермы крупного рогатого скота — 91 млн т, птицефабрики — 32 млн т, свиноводческие хозяйства — 26 млн т [17—19].

Общее годовое потребление отходов животноводства для производства биогаза составляет всего 0,17 % объема органических отходов, образующихся на российских сельхозпредприятиях. Таким образом, в настоящее время фактическое использование органических отходов, потенциально пригодных для производства биогаза, на 2—3 порядка ниже, чем имеющийся потенциал. При этом энергетический потенциал отходов животноводства в России составил 201 ПДж в год (55,8 ТВт·ч/год) [20, 21].

Производству биогаза из навоза придается первостепенное значение, во-первых, в энергетическом аспекте, во-вторых, в связи с тем, что из всего объема ежегодно образующегося на животноводческих фермах навоза, экономически приемлемого для переработки в биогаз, порядка 80 % приходится на интенсивные производственные системы (крупные откормочные комплексы и площадки КРС, промышленные свиноводческие и птицеводческие комплексы) [18—24].

В настоящее время в центре внимания находится электрофизическое влияние на процесс разложения органических субстратов, в том числе отходов, с образованием метана. Интересно, что скорость образования метана увеличивается в разы и его концентрация в биогазе повышается до 80—90 %. Опубликованы научные работы об использовании, наряду с электростимулированием, кондуктивных (электропроводящих) материалов, которые используются в качестве электродов [25—27].

Электрический ток оказывает влияние на микроорганизмы, изменяя их метаболизм, а также воздействуя на среду. Использование электрохимического подхода в биотехнологиях позволяет увеличить скорости роста микроорганизмов, а также скорости переработки субстратов и синтеза продуктов, повысить избирательность синтеза тех или иных целевых веществ, контролировать окислительно-восстановительный потенциал и pH.

Системы, в которых соединяются принципы классической биотехнологии и электрохимии, называются биоэлектрохимическими системами. Биоэлектрохимическая система управляется с помощью электрического тока (как источника энергии для окислительно-восстановительных реакций), подаваемого на электроды, которые устанавливаются в биореактор [28].

Биоэлектрохимические системы (БЭС) объединяют биологическое разложение с электрохимическим окислением на аноде и восстановлением на катоде, при этом осуществляется постоянная поставка электронов и рост определенных микроорганизмов для конкретной технологической задачи. Таким образом, «неживая» электрохимия переместилась в область биоэлектрохимии [26]. БЭС подразделяются: 1) на микробные топливные элементы (МТЭ), преобразующие энергию химических связей органических веществ в электричество с помощью микроорганизмов; 2) микробные электролизные ячейки (МЭЯ), которые являются модифицированной системой МТЭ, где с приложением электрического напряжения происходит производство продуктов с добавленной стоимостью [29, 30].

Один из подходов к стимулированию метаногенеза в анаэробных реакторах заключается в использовании поляризованных электродов (анод и катод) внутри анаэробного реактора и объединении использования микробных электролизных ячеек (МЭЯ) и технологии анаэробного сбраживания [31—35]. В комбинированном электрометаногенном реакторе, в дополнение к обычному синтрофному процессу межвидового переноса электронов, метан также может образовываться в следующих процессах: 1) в результате процесса DIET через небиологический проводящий материал, из которого сделан электрод; 2) электрогенные ацетокластические метаногены превращают ацетат в метан на поверхности анода; 3) метаногены, потребляющие электротрофный водород, восстанавливают CO_2 и протоны с образованием метана на поверхности катода [32]. Химическое восстановление CO_2 на катоде также рассматривается как один из важных способов образования метана в таких реакторах [36], который, как предполагается, увеличивает общее содержание метана в биогазе [37].

Электропитание самой биогазовой установки целесообразно с помощью преобразователей возобновляемых источников энергии (ВИЭ), из которых наиболее перспективными и быстро развивающимися на сегодня являются фотоэлектрические и теплофотоэлектрические преобразователи солнечного излучения [38—41].

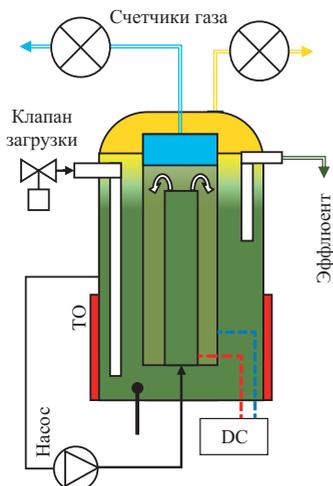
Подобного рода фотоэлектрические преобразователи могут располагаться как в планарных (плоских) [42], так и в концентраторных системах [43]. При планарном исполнении солнечных модулей фотоэлектрического [44] и теплофотоэлектрического типов [45], их расположение может

быть непосредственно на корпусе/здании биогазовой установки. Кровельные солнечные панели различных типов, а также фотоэлектрические, тепловые и теплофотоэлектрические сайдинг-панели найдут применение в подобного рода конструктивных решениях, что позволит им выполнять наряду со строительной функцией также функцию энергоснабжения биогазовой установки.

Таким образом, использование преобразователей солнечной энергии целесообразно не только для энергоснабжения биогазовой установки, но и для технических средств интенсификации процесса анаэробной биоконверсии в виде микробной электролизной ячейки. При этом для подачи разности потенциалов на электроды МЭЯ не требуется дополнительных преобразователей электроэнергии, полученной от фотопреобразователей.

В связи с этим целью данной работы являлись разработка и создание лабораторной биогазовой установки с применением МЭЯ, разницу потенциалов на электродах которой создает преобразованная в электрический ток солнечная энергия, для последующей оценки возможности использования разработанной системы на крупномасштабных биогазовых комплексах.

На рисунке 1 приведена технологическая схема метаногенного реактора с интегрированной в реакторное пространство МЭЯ (рис. 1, а) [46] и общий вид применяемого преобразователя солнечной энергии (рис. 1, б).



а)



б)

Рис. 1. Технологическая схема метаногенного реактора с интегрированной в реакторное пространство МЭЯ [46] (а) и общий вид применяемого преобразователя солнечной энергии в виде солнечного модуля

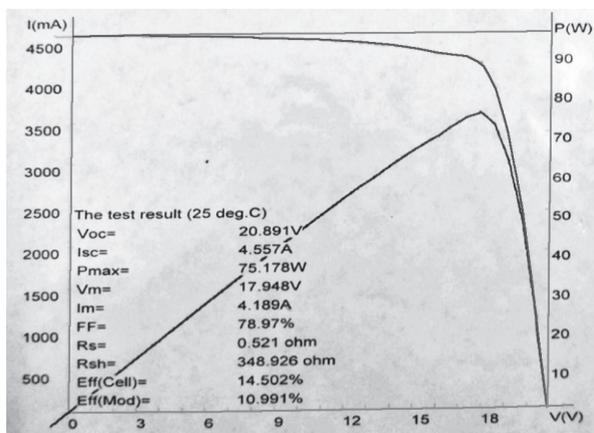


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика солнечного модуля, используемого для электроснабжения МЭЯ

На рисунке 2 показана вольт-амперная характеристика используемого солнечного модуля.

Преобразователь солнечной энергии через контроллер заряда аккумуляторной батареи и понижающий преобразователь подключен к электродам МЭЯ, между которыми размещено устройство увеличения гидравлического времени удержания в МЭЯ.

Таким образом, создана экспериментальная установка для оценки возможности преобразования солнечной энергии в метан путем использования разницы потенциалов на электродах МЭЯ в системе «анаэробная био-конверсия — микробная электролизная ячейка» при анаэробной обработке органических отходов и последующей оптимизации режимов и параметров работы разработанной системы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-49-02002, <https://rscf.ru/project/22-49-02002/>

Литература

1. **Outlook** for biogas and biomethane: prospects for organic growth. Paris: IEA; 2020, <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>.
2. **Directive EU**. 2018/2001 of the European Parliament and of the council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN>; 2018.

3. **EU biodiversity** strategy for 2030. 2020 [accessed on 24th April 2021], https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/communication-annex-eu-biodiversity-strategy-2030_en.pdf.
4. **Global** potential of biogas. World Biogas Association. https://www.worldbiogas-association.org/wp-content/uploads/2019/09/WBA-globalreport-56ppa4_digital-Sept-2019.pdf; 2019.
5. **Ministry** of Agriculture of the PRC, 2018b. China Animal Husbandry And Veterinary Yearbook. China Agriculture Press, Beijing.
6. **Ministry** of Water Resources of the PRC, 2018. CHINA WATER STATISTICAL YEARBOOK. China Statistics Press, Beijing.
7. **Henan** Province Bureau of Statistics, 2018. HENAN STATISTICS YEARBOOK. China Statistics Press, Beijing.
8. **The Development** Evaluation of Economic Zones in China / W. Liu, H.-B. Shi, Z. Zhang et al. // International Journal of Environmental Research and Public Health 2018. 15. 56. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph15010056>.
9. **Zhao H.** 2018. Research on the development status and countermeasures of grain industry in Shandong province / In: X. Xiao, T. Hauer, S.A.R. Khan (Eds.) // Proceedings of the 2018 4th International Conference on Social Science and Higher Education, pp. 879—882.
10. **Anaerobic** thermophilic treatment of cattle manure in UASB reactors. Waste Manag / L. Castrillon, I. Vazquez, E. Maranon, H. Sastre. 2002. Res. 20. 350—356.
11. **The effects** of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. Bioresour / K.J. Chae, A. Jang, S.K. Yim, I.S. Kim // Technol. 2008. 99. 1—6.
12. **An innovative** anaerobic MBR reverse osmosis-ion exchange process for energy-efficient reclamation of municipal wastewater to NEWater-like product water / J. Gu, H. Liu, S.Y. Wang et al. // J. Clean. Prod. 2019. 230. 1287—1293.
13. **National** Bureau of Statistics of the Prc, 2018a. China Energy Statistical Tearbook. China Statistics Press, Beijing.
14. **Salomon K.R., Silva Lora E.E.** Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. Biomass Bioenergy 2009;33:1101—7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.03.001>
15. **Custo** da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura / S.N.M. De Souza, W.C. Pereira, C.E.C. Nogueira et al. // Acta Sci Technol 2004;26:127—33. URL: <http://dx.doi.org/10.4025/actascitechnol.v26i2.1510>.
16. **Electric** energy micro-production in a rural property using biogas as primary source / S.N.M. De Souza, I. Werncke, C.A. Marques et al. Renew Sustain Energy Rev 2013;28:385—91. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.035>.
17. **Калужный С.В., Данилович Д.А., Ножевникова А.Н.** Итоги науки и техники, сер. Биотехнология. Т. 29. М., ВИНТИ, 1991.
18. **Министерство** сельского хозяйства Российской Федерации. Агропромышленный комплекс России в 2013 году. <http://www.mcx.ru/navigation/page/show/205.htm>

19. **Перспективы** развития возобновляемых источников энергии в России. Результаты проекта TACIS Europe Aid/116951/C/SV/RU. Москва, 2009.
20. **Перечень** квалифицированных генерирующих объектов, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии. URL: <http://www.np-sr.ru/market/vie/index.htm>.
21. **Altenergo.su Альтэнерго:** биогазовая станция. URL: <http://www.altenergo.su/biogas>
22. **Министерство** сельского хозяйства Российской Федерации. Руководство по технологическому проектированию систем навозоудаления и подготовки к эксплуатации; Москва, 2008.
23. **Utilization** of manure on livestock farms for providing ecological safety of the territory, ground and underground water bodies in Leningrad region; [In Russian] / V.I. Mogilevtsev, A.Ju. Bryukhanov, D.A. Maximov et al. URL: <http://www.eco.sznii.ru/booklet.pdf>
24. **Current** status and potential of bioenergy in the Russian Federation / Z. Namsaraev, P. Gotovtsev, A. Komova, R. Vasilov // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. 81. 625—634. 10.1016/j.rser.2017.08.045.
25. **Nealson K.H.** Bioelectricity (electromicrobiology) and sustainability // Microb Biotechnol., 2017. V 10 (5). P. 1114—1119.
26. **Microbial** fuel cells: From fundamentals to applications. A review / C. Santoro, C. Arbizzani, B. Erable, I. Ieropoulos // J Power Sources. 2017. V. 356. P. 225—244.
27. **Biorefinery** perspectives of microbial electrolysis cells (MECs) for hydrogen and valuable chemicals production through wastewater treatment / A. Kadier, P. Jain, B. Lai et al. // Biofuel Research Journal. 2020. V. 25 P. 1128—1142.
28. **Синтрофия** и межвидовой перенос электронов в метаногенных микробных сообществах / А.Н. Ножевникова, Ю.И. Русскова, Ю.В. Литти и др. // Микробиология. 2020. Т. 89. № 2. С. 131—151.
29. **Microbial** electrolysis cells for high yield hydrogen gas production from organic matter / B.E. Logan, D. Call, S. Cheng et al. // Environ. Sci. Technol. 2008. V. 42. P. 8630—8640.
30. **Казаринов И.А., Мещерякова М.О., Карамышева Л.В.** Конверсия органических отходов в электрическую энергию с помощью микробных электрохимических технологий // Электрохимическая энергетика. 2016. Т. 16 (4). С. 207—225.
31. **Choi K.S., Kondaveeti S., Min B.** Bioelectrochemical methane (CH₄) production in anaerobic digestion at different supplemental voltages // Bioresource Technology. 2017. V. 245. P. 826—832.
32. **Bioelectrochemical** enhancement of methane production from highly concentrated food waste in a combined anaerobic digester and microbial electrolysis cell / J. Park, B. Lee, D. Tian, H. Jun // Bioresource Technology. 2018. V. 247. P. 226—233.
33. **Feng Q., Song Y.C.** Decoration of graphite fiber fabric cathode with electron transfer assisting material for enhanced bioelectrochemical methane production // J. Appl. Electrochem. 2016. 46. 1211—1219.

34. **Polarized** electrode enhances biological direct interspecies electron transfer for methane production in upflow anaerobic bioelectrochemical reactor / Q. Feng, Y.C. Song, K. Yoo et al. // *Chemosphere*. 2018. 204. 186—192.
35. **Song Y.C., Feng Q., Ahn Y.** Performance of the Bio-electrochemical Anaerobic Digestion of Sewage Sludge at Different Hydraulic Retention Times // *Energy and Fuels*. 2016. 30. 352—359.
36. **Zhang Y., Merrill M.D., Logan B.E.** The use and optimization of stainless steel mesh cathodes in microbial electrolysis cells // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2010. 35. 12020—12028.
37. **Energy** recovery evaluation in an up flow microbial electrolysis coupled anaerobic digestion (ME-AD) reactor: Role of electrode positions and hydraulic retention times / T. Sangeetha, Z. Guo, W. Liu et al. // *Appl. Energy*. 2017. 206. 1214—1224.
38. **Панченко В.А.** Солнечные модули различной конструкции агроинженерного центра ВИМ // *Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечной энергетики: сборник трудов V всероссийской научной конференции 27—28 октября 2017 г., Чебоксары*. С. 116—121.
39. **Ковалёв А.А., Панченко В.А.** Комбинированное использование возобновляемых источников энергии для производства энергоносителей // *Фёдоровские чтения — 2020: I международная научно-практическая конференция с элементами научной школы*. М.: Издательский дом МЭИ, 2020. С. 371—378.
40. **Ковалёв А.А., Панченко В.А., Харченко В.В.** Использование солнечных теплофотоэлектрических модулей для энергоснабжения биогазовой установки с тепловым насосом // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2016. № 5 (20). С. 233—240.
41. **Ковалёв А.А., Панченко В.А.** Использование солнечных теплофотоэлектрических модулей для компенсации энергетических потребностей фермы крупного рогатого скота с биогазовой установкой // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2017. № 4 (25). С. 82—87.
42. **Панченко В.А.** Солнечные теплофотоэлектрические модули стационарной и мобильной конструкции // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. 2020. № 31—33 (353—355). С. 20—33.
43. **Панченко В.А.** Теплофотоэлектрический модуль с концентраторами солнечного излучения параболического типа // *Строительство и техногенная безопасность*. 2020. № 18 (70). С. 107—121.
44. **Панченко В.А.** Кровельные солнечные панели для энергоснабжения зданий и сооружений // *Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность — 2020: сборник статей по материалам международной научно-практической конференции*. 2020. С. 432—436.
45. **Панченко В.А.** Моделирование теплофотоэлектрической кровельной панели для энергоснабжения объектов // *Строительство и техногенная безопасность*. 2018. № 13 (65). С. 143—157.
46. **Two-stage** anaerobic digestion with direct electric stimulation of methanogenesis: The effect of a physical barrier to retain biomass on the surface of a carbon cloth-based biocathode / A.A. Kovalev, D.A. Kovalev, E.A. Zhuravleva et al. // *Renewable Energy*. 2022. V. 181. P. 966—977. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.097>.

*А.П. Слuzов, freeman75561@gmail.com,
И.Е. Бердников, berdnirnikov@gmail.com,
А.Б. Дарьенков, darenkov@nntu.ru,
ФГБОУ ВО «НГТУ им. П.Е. Алексеева»,
г. Нижний Новгород*

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИСТОЧНИКА БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ

Разработка источников бесперебойного питания (ИБП) является важной задачей для обеспечения питанием нагрузок, чувствительных к колебаниям параметров питающей сети. К таким нагрузкам относятся: компьютеры в центрах обработки данных, системы связи, медицинское оборудование.

В зависимости от структуры и топологии ИБП подразделяют на автономные ИБП (offline UPS), линейно-интерактивные ИБП (line interactive UPS) и ИБП с двойным преобразованием (online UPS) [1, 2].

Автономные ИБП состоят из зарядного устройства, статического переключателя и инвертора. В нормальном режиме работы производится заряд аккумуляторной батареи (АКБ), а нагрузка питается от сети, когда инвертор находится в режиме ожидания. Когда происходит сбой питания, статический переключатель (bypass) подключает нагрузку к инвертору, который питается от АКБ. Время переключения статического переключателя обычно меньше 10 мс. Преимуществами автономного ИБП являются низкая стоимость, простота конструкции и небольшие габариты. Недостатками являются отсутствие реальной изоляции нагрузки от питающей сети и плохие энергетические показатели при работе на нелинейную нагрузку. Автономные ИБП обычно используют для питания нагрузки мощностью менее 1 кВА.

Линейно-интерактивные ИБП состоят из статического переключателя, двунаправленного инвертора и АКБ. В нормальном режиме работы нагрузка питается непосредственно от сети, а двунаправленный инвертор заряжает батарею. Во время сбоя в сети статический переключатель отключает нагрузку от сети, и питание подается через двунаправленный инвертор. Преимуществами линейно-интерактивных ИБП являются низкая стоимость, небольшой размер и повышенный КПД. Единственным недостатком является то, что он не обеспечивает никакого регулирования напряжения в нормальном режиме работы. Как правило, линейно-интерактивный ИБП рассчитываются на мощность от 0,5 до 5 кВА, а КПД системы обычно превышает 97 %.

ИБП с двойным преобразованием состоит из выпрямителя, инвертора, буферного преобразователя и статического переключателя. В нормальном режиме работы выпрямитель формирует постоянное напряжение в звене постоянного тока (ЗПТ), а буферный преобразователь заряжает АКБ. Параллельно инвертор преобразует напряжение ЗПТ в необходимое переменное напряжение для питания нагрузки. При сбое питания происходит отключение питающей сети, но инвертор продолжает без перерыва подавать питание на нагрузку, используя энергию, запасенную в АКБ. Таким образом выходное напряжение всегда стабилизировано, независимо от гармоник и искажений напряжения в сети. Статический переключатель в данной схеме используется только при возникновении критического сбоя в работе одного из компонентов. К преимуществам ИБП с двойным преобразованием относится изоляция нагрузки от питающей сети и нулевое время переключения. Недостатками являются повышенные потери энергии при передаче мощности от сети в нагрузку и повышенные искажения потребляемой кривой тока. Все коммерческие ИБП мощностью 5 кВА и выше обычно выполняют по схеме с двойным преобразованием.

Проектируемый ИБП должен обеспечивать стабильное синусоидальное напряжение на выходе, с низким суммарным коэффициентом гармонических искажений (THD), а также мгновенно переходить из режима питания от сети в режим работы от аккумуляторной батареи. Мощность нагрузки 5 кВА и выше, поэтому выбрана схема ИБП с двойным преобразованием для уменьшения искажений потребляемой кривой тока, выпрямитель заменен активным выпрямителем. Функциональная схема проектируемого ИБП показана на рис. 1.



Рис. 1. Функциональная схема проектируемого ИБП

Для анализа рабочих режимов отдельных блоков ИБП, их взаимодействия между собой, проверки алгоритмов управления, а также анализа взаимодействия ИБП с сетью и нагрузкой нами составлена имитационная модель (рис. 2). Она содержит следующие блоки: активный выпрямитель с входным фильтром, буферный преобразователь, аккумуляторную батарею, инвертор напряжения и выходной фильтр [3].

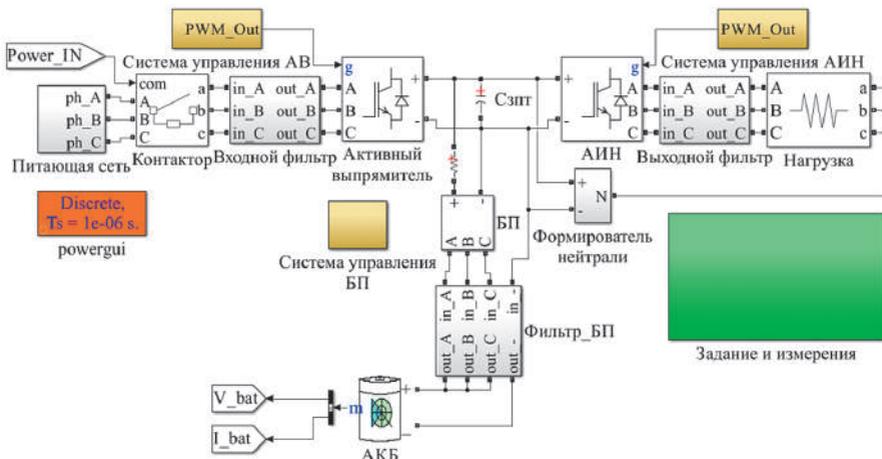


Рис. 2. Блочная структура имитационной модели

Электрическая сеть имитируется блоком «Питающая сеть». Он состоит из трех однофазных источников переменного напряжения (действующее значение напряжения — 220 В, частота 50 Гц), сдвинутых по фазе друг относительно друга на 120 электрических градусов. Для ограничения мощности, отдаваемой сетью, последовательно им установлены RL -цепочки, где $R = 154$ мОм, $L = 0,777$ мГн, что позволяет ограничить отдаваемую мощность на уровне 25 кВА.

При помощи блока «Контактор» производится подключение и отключение питающей сети к источнику бесперебойного питания, задание времени коммутации определяется блоком «Power_Ep», расположенным внутри блока «Задание и измерения».

Блоки «Входной фильтр», «Активный выпрямитель» и «Система управления АВ» совместно реализуют управляемый, синхронизированный с сетью активный выпрямитель напряжения (АВ).

Входной фильтр АВ представляет собой LCL-фильтр с установленным внутри блоком измерения фазных напряжений и токов. Значения индуктивностей фильтра — $L = 6$ мГн, емкостей $C = 3$ мкФ. Также для осла-

бления колебательности фильтра последовательно с емкостями включены демпфирующие резисторы с $R = 30 \text{ Ом}$ [4].

Силовая часть активного выпрямителя построена по схеме трехфазного мостового двухуровневого, ведомого сетью инвертора напряжения. Включение и отключение транзисторов происходит мгновенно, но они имеют внутреннее сопротивление $0,001 \text{ Ом}$ и прямое падение напряжения на обратном диоде $2,35 \text{ В}$, что позволяет учитывать статические потери в инверторе.

АВ в режиме работы ИБП от сети стабилизирует напряжение в ЗПТ на заданном уровне; если это напряжение выше, чем напряжение на выводах АКБ, уровень зарядного тока ограничивается буферным преобразователем (БП). При этом параллельно происходит передача мощности на преобразователь частоты (ПЧ), к которому подключена нагрузка. Если напряжение на АВ выставить ниже, чем текущее напряжение АКБ, то автоматически начнется процесс передачи энергии в питающую сеть, при этом уровень отдаваемой мощности определяется заданием мощности АВ.

Выходной преобразователь для питания нагрузки построен из четырех блоков: «АИН», «Формирователь нейтрали», «Выходной фильтр» и «Система управления АИН». Блок «АИН» имитирует силовую часть выходного преобразователя, который построен по схеме трехфазного мостового преобразователя, параметры ключей идентичны описанным выше для АВ. Этот инвертор напряжения формирует три фазных напряжения. Для формирования напряжения нейтрали установлен блок «Формирователь нейтрали», состоящий из двух транзисторов и индуктивности $L = 6 \text{ мГн}$. Управляя скважностью транзисторов, можно управлять напряжением нейтральной точки нагрузки.

Выходной фильтр преобразователя частоты предназначен для выполнения фильтрации кривых напряжений и токов, подаваемых на нагрузку, от высших гармоник. Он представляет собой трехфазный LC фильтр, индуктивность $L = 6 \text{ мГн}$, емкость $C = 30 \text{ мкФ}$ [5]. Также на выходе фильтра установлены датчики фазных напряжений и токов.

Система управления выходным преобразователем формирует трехфазную систему напряжений по алгоритму синусоидальной ШИМ. Выходное напряжение преобразователя стабилизируется на заданном уровне с помощью регулятора напряжения И-типа.

К выходному преобразователю подключена активная нагрузка сопротивлением $R = 30 \text{ Ом}$. При этом обеспечивается потребление 5 кВт .

Для подключения АКБ к звену постоянного тока используется буферный преобразователь (БП). Он состоит из трех основных блоков: «БП», «Фильтр БП» и «Система управления БП». Блок «БП» имитирует силовую часть преобразователя, которая построена по схеме трехфазного мо-

стового преобразователя. Использование трехфазного преобразователя для работы в схеме с постоянным током позволяет распределить токовую нагрузку между фазами, при этом аппаратно обеспечивается сдвиг между управляющими сигналами транзисторов на 120 электрических градусов, что дополнительно снижает размах пульсаций напряжения и тока.

Блок «Фильтр БП» состоит из трех индуктивностей и датчиков тока и напряжения. Индуктивность $L = 1,5$ мГн требуется для сглаживания пульсации тока, а также работы буферного преобразователя в режиме повышения напряжения.

Система управления БП формирует импульсы управления для транзисторов и определяет режим работы преобразователя. В случае работы ИБП от сети БП переходит в режим заряда АКБ, ограничение тока заряда рассчитывается автоматически в зависимости от задания мощности, передаваемой в аккумулятор. Если сеть отсутствует, БП переходит в режим питания от АКБ и выполняет стабилизацию напряжения на заданном уровне.

На рисунках 3—5 показаны осциллограммы работы устройства в момент переключения режима работы с нормального на автономный.

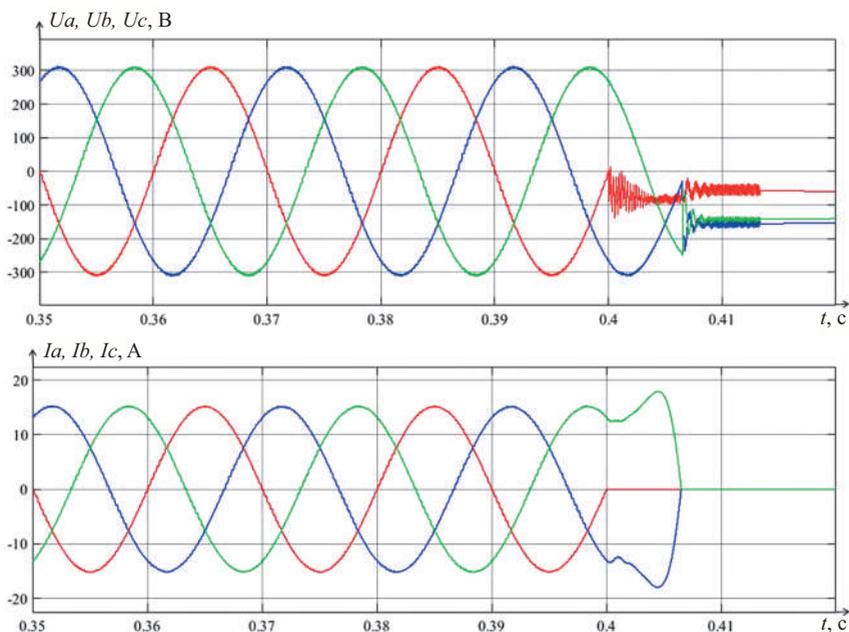


Рис. 3. Осциллограммы мгновенных значений напряжений сети и токов, потребляемых ИБП

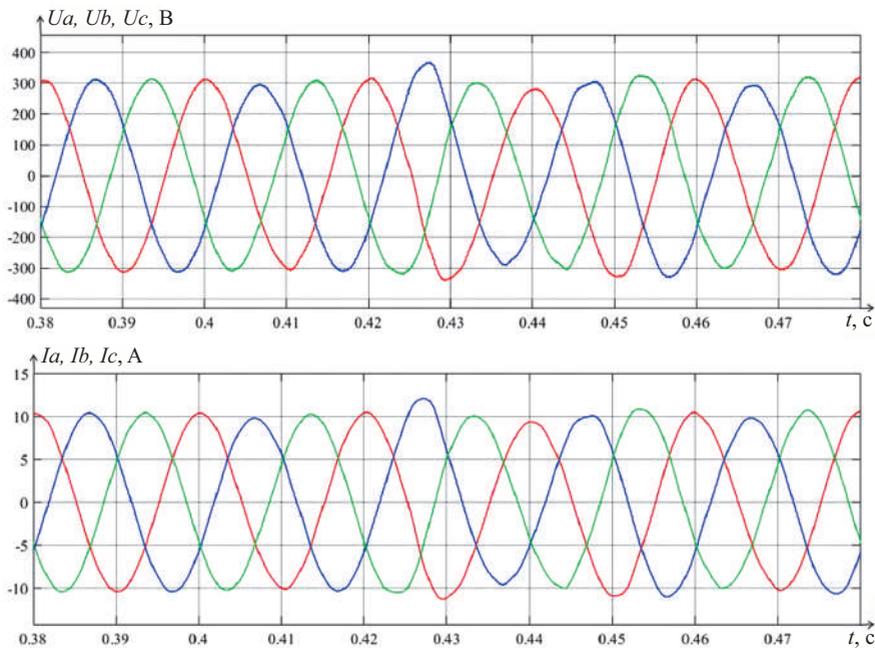


Рис. 4. Осциллограммы мгновенных значений напряжений и токов, выдаваемых ИБП на нагрузку

В начальный момент времени АВ работает в нормальном режиме, поддерживая заданное напряжение 650 В в ЗПТ. Из-за расположения шунта в цепи буферного преобразователя наблюдается только ток заряда АКБ, который равен 3А.

В момент времени 0,4 с происходит отключение питающей сети, при этом АВ практически сразу прекращает свою работу, наблюдается падение напряжения с 650 до 600 В, что соответствует моменту переключения режима работы с нормального на автономный. При этом наблюдается незначительная просадка выходного напряжения инвертора, которая тут же выравнивается регулятором выходного напряжения.

После выдержки времени в 0,01 с БП переходит из режима заряда АКБ в режим поддержания напряжения в ЗПТ (кратковременно энергия шла через обратные диоды БП), и в этот момент наблюдается резкий рост напряжения ЗПТ и потребляемого тока; это связано с тем, что регулятор напряжения БП — ПИ типа. В этот момент мы также видим выброс в выходном напряжении, далее процессы стабилизируются.

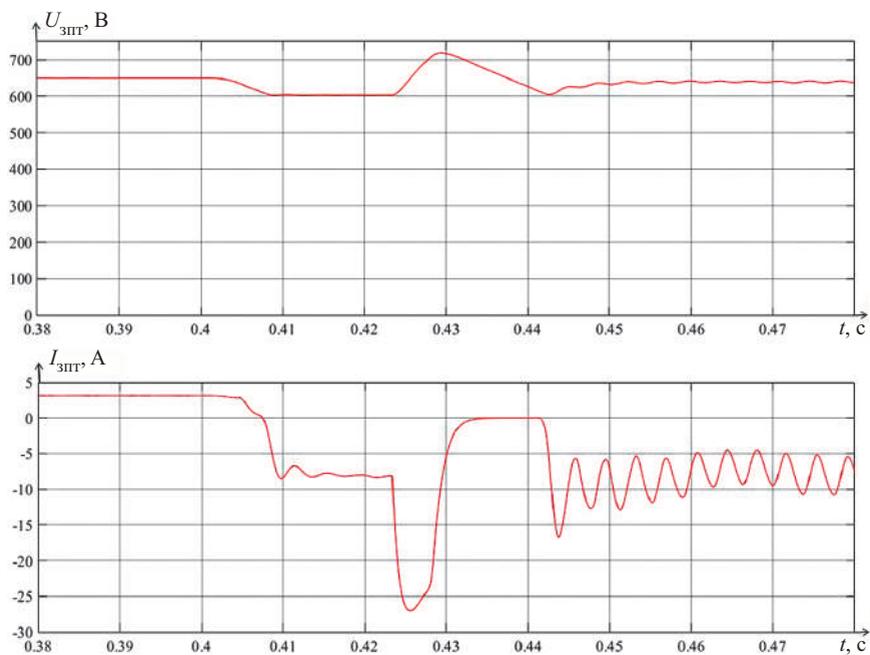


Рис. 5. Осциллограммы мгновенных значений напряжений и токов в звене постоянного тока ИБП

Разработанная имитационная модель позволяет осуществлять анализ рабочих режимов составных частей ИБП, их взаимодействие между собой, а также с сетью и нагрузкой.

Модель позволяет выполнять автоматизированный расчет рабочих режимов ИБП в следующих условиях: при наличии и отсутствии питающей сети, при изменении нагрузки от 0 до 5 кВА, при изменении потребляемой мощности от 0 до 7,5 кВА.

Данная работа выполнена при поддержке АНО «Нижегородский НОЦ» и ОАО «РЖД» в рамках договора от 04.05.2022 г. № 33/22/2572.

Литература

1. **Aamir M., Kalwar K.A., Mekhilef S.** Review: Uninterruptible Power Supply (UPS) system // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. No 58. P. 1395—1410.
2. **Разработка** и создание источников бесперебойного питания систем энергообеспечения морского исполнения / В.К. Самсыгин, Д.В. Соколов, Д.И. Ули-

- товский и др. // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Т. 2. № 388. С. 101—111.
3. **Analysis** and Design of Three-Phase Buck Rectifier Employing UPS to Supply High Reliable DC Power / J.-Y. Lee, K.-W. Heo, K.-T. Kim, J.-H. Jung // *Energies*. 2020. No 13. P. 1704.
 4. **Dai N., Wong M.** Design considerations of coupling inductance for active power filters // 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2011, p. 1370—1375.
 5. **Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А.** Силовая электроника: учебник для вузов. — 2-е изд., стереотипное. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 632 с.

*А.Р. Байбиченков, artur.bajbichenkov@mail.ru,
Москва*

*Г.Р. Тимова, titovagr@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва*

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ВРЕМЕННЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

В настоящее время в России заметна тенденция развития систем электроснабжения на базе возобновляемых источников энергии с целью борьбы с углеродным следом, обусловленным сжиганием ископаемых. Использование установок на базе ВИЭ позволяет в большинстве случаев уменьшить стоимость электроэнергии. В работе оценивалась надежность систем электроснабжения на базе совместного использования ВИЭ и традиционных источников.

В России все больше расширяется нефте- и газодобывающая отрасль. Разрабатывается все больше месторождений, наращиваются мощности по добыче газа и нефти. Для обслуживания и строительства таких месторождений требуются персонал и организация места жительства для этого персонала. Такие объекты обычно носят название вахтовых городков.

Вахтовый городок, рассматриваемый в данной работе, расположен в поселке Усть-Луга и уже имел свою систему электроснабжения, построенную на базе традиционных источников энергии. Система электроснабжения состоит из ВЛ 10 кВ, 2×КТП 630 кВА и ВЛИ 0,4 кВ. Необходимо определить мощность вахтового городка в целом и отдельно каждого объекта. Расчет мощности приведен в табл. 1.

Для определения требуемой мощности и соответственно мощности подстанции, питающей городок, выполним расчет по [1, 2]. Мощность на шинах подстанции определяется по формуле

$$P_{р.л} = P_{зд \max} + \sum K_{y i} P_{зд i} \quad (1)$$

где $P_{р.л}$ — расчетная нагрузка линии до 1 кВ или шин подстанции 10/0,4 кВ; $P_{зд \max}$ — наибольшая нагрузка здания из числа зданий, питаемых по линии или от шин подстанции, кВт; $P_{зд i}$ — расчетные нагрузки других зданий, питаемых по линии или от шин подстанции, кВт; $K_{y i}$ — коэффициент участия в максимуме электрических нагрузок общественных зданий (помещений) или жилых домов (квартир и силовых электроприемников).

Т а б л и ц а 1

Расчет мощности вахтового городка

Наименование здания	Установленная мощность $P_{ном}$, кВт	Коэффициент спроса K_c	Расчетная мощность $P_{расч}$, кВт
Общежитие № 1	264	0,75	198
Общежитие № 2	264	0,75	198
Общежитие № 3	217	0,75	162,75
Общежитие № 4	264	0,75	198
Блок вагончиков (10 шт.)	70	0,7	49
Блок вагончиков (10 шт.)	70	0,7	49
Блок вагончиков (10 шт.)	70	0,7	49
Склады + рефрижераторы	90	0,7	63
КПП	20	0,7	14
Медпункт	24	0,6	14,4
Столовая маленькая	72	0,7	43,2
Столовая большая	350	0,7	245
Прачечная	37	0,8	29,6
Сушилка	25	0,8	20

Коэффициент участия в максимуме электрических нагрузок определяется по [1, 2] исходя из того, какое здание имеет наибольшую мощность и к какому типу относится здание, для которого определяется этот коэффициент.

Тогда расчетная мощность вахтового городка на шинах КТП 10/0,4 кВ будет равна 1017,3 кВт.

Определим объем электроэнергии, потребляемой городком за год:

$$W_{\text{год}} = P_{\text{max}} T_{\text{max}} = 1017,3 \cdot 4100 = 4170930 \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (2)$$

где $W_{\text{год}}$ — объем электроэнергии, потребляемой за год, кВт·ч; P_{max} — максимальная расчетная мощность, кВт; T_{max} — число часов использования максимума в год (из табл. 2 [3]); для поселка без электрических плит $T_{\text{max}} = 4100$ ч.

Далее необходимо оценить потенциал солнечной энергии в регионе, в котором расположен вахтовый городок. Для оценки валового потенциала воспользуемся формулой

$$\mathcal{E}_{\text{вал}}^{\Gamma} = \frac{\sum_{k=1}^d \mathcal{E}_{\text{вал}k}^{\Gamma}}{d}. \quad (3)$$

Однако эта формула актуальна только в случае, если есть данные о непрерывном во времени приходе суммарной солнечной радиации на приемную площадку [4]. Такие данные имеются у многих актинометрических станций. В расчетах использована база данных NASA [5]. Данная база данных предоставляет информацию о размере суммарной солнечной инсоляции, падающей на горизонтальную поверхность, на поверхность земли за определенный час, день или месяц. Также есть информация о среднемесячной солнечной инсоляции. Для расчетов был принят период с 1 января 1981 г. по 31 декабря 2020 г. Данные о солнечной инсоляции являются средним арифметическим трехчасовых значений (табл. 2).

Таблица 2

Многолетние среднемесячные и среднемноголетнее значения инсоляции, падающей на горизонтальную поверхность (кВт·ч)/м²/день

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
$\mathcal{E}_{\text{вал}}^{\Gamma}$	0,76	1,59	3,15	4,49	5,94	5,41	5,29	4,47	3,09	1,64	0,78	0,43	3,09

Тогда валовый потенциал солнечной энергии для вахтового городка будет равен:

$$\mathcal{E}_{\text{вал}}^{\Gamma} = 1129,1275 \cdot 331,97 \cdot 10^6 = 374,8 \cdot 10^9 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{год}.$$

После определения валового потенциала определим количество солнечных панелей и их выработку за год. Количество солнечных панелей вы-

биралось исходя из площади крыш зданий и площади солнечной панели с учетом возможности их обслуживания. Выработка электроэнергии определялась по формуле:

$$W = kEP_w / 1000. \quad (4)$$

В таблице 3 указано количество солнечных панелей на зданиях, их суммарная номинальная мощности и выработка электроэнергии за год:

Т а б л и ц а 3

Количество солнечных панелей

Наименование здания	Количество солнечных панелей, шт.	Суммарная мощность, кВт	Суммарная электроэнергия, кВт·ч
Общежитие № 1	120	45,6	26 855,46
Общежитие № 2	120	45,6	26 855,46
Общежитие № 3	133	50,54	29 768,08
Общежитие № 4	133	50,54	29 768,08
Блок вагончиков (10 шт.)	20	7,6	4476,73
Блок вагончиков (10 шт.)	20	7,6	4476,73
Блок вагончиков (10 шт.)	20	7,6	4476,73
Склады + рефрижераторы	45	17,1	10 070,5
КПП	2	0,76	447,07
Медпункт	8	3,4	1789,47
Столовая маленькая	5	1,9	1119,5
Столовая большая	36	13,7	8055,67
Прачечная	120	45,6	26 855,46
Сушилка	120	45,6	26 855,46

Для оценки надежности систем электроснабжения разработано и используются множество различных методов, но все они в основном позволяют оценить системы электроснабжения, построенные на традиционных источниках энергии и не учитывают стохастический характер выработки электроэнергии, характерный для ВИЭ. По расчету надежности систем электроснабжения с ВИЭ существует множество работ, в частности [7, 8], но они рассматривают электроснабжение либо только от массива фотоэлектрических модулей, либо от ветроэлектростанции.

Ряд работ, например [6, 9], рассматривают совместную работу ВИЭ с традиционными источниками. В этом случае для оценки надежности в [6] использовался метод перебора состояний или мультиматричный метод. При этом учитывается, что выработка электроэнергии на фотоэлектрическом модуле происходит по-разному в зависимости от времени года и суток; также метод позволяет учесть влияние отказа элемента на выходную мощность и отпуск электроэнергии потребителю.

Анализ надежности системы электроснабжения, представленной в нашей работе, будем выполнять при помощи мультиматричного способа, который учитывает все аварии и режимы работы, а также совпадение отказа элемента с каким-то режимом работы.

Выше мы рассчитали величины солнечной инсоляции по актинометрическим данным из базы NASA. Однако для целей расчета надежности полученные ранее данные необходимо сгруппировать по схожести значений среднесуточной инсоляции. Таким образом, получим пять состояний системы электроснабжения с солнечными панелями. Каждое состояние имеет определенную длительность, которую мы также определили.

Необходимо для начала определить все элементы системы электроснабжения и присвоить им порядковые номера от 1 до n . Предположим, что любой элемент системы имеет порядковый номер i , таким образом $i = 1, \dots, n$ [10]. Для каждого элемента определялись значения интенсивности отказов λ_i и среднее время восстановления τ_i . Всем возможным состояниям системы также присваиваются порядковые номера от 0 до m . При этом нормальный режим работы системы, т.е. при полной схеме, имеет порядковый номер $j = 0$, а все остальные режимы $j = 0, \dots, m$ [10].

Помимо режимов работы и элементов системы электроснабжения необходимо также определиться с типом аварий, которые могут возникать в результате отказов элементов в каком-либо режиме работы, например потеря трансформатора, аккумуляторных батарей, ФЭП и др. Всем возможным авариям присваиваются номера или коды от 1 до l [10].

Прежде чем перейти к анализу надежности системы электроснабжения, необходимо составить матрицу логических связей, отказов и режимов, которые фиксируют, какие аварии возникают из-за отказа элемента в определенном режиме. Таким образом, нам необходимо составить матрицу ij , на пересечение строк и столбцов которой указывается тип аварии, т.е. код аварии k . Такие матрицы составляются для каждого состояния системы электроснабжения T_p . На рисунке 1 представлен условный пример матрицы ij для различных состояний объекта.

Таким образом, мы формируем массив конъюнкций $\{i \cap j\}$, а затем каждое пересечение идентифицируем как некую аварию k [10]. Формирование

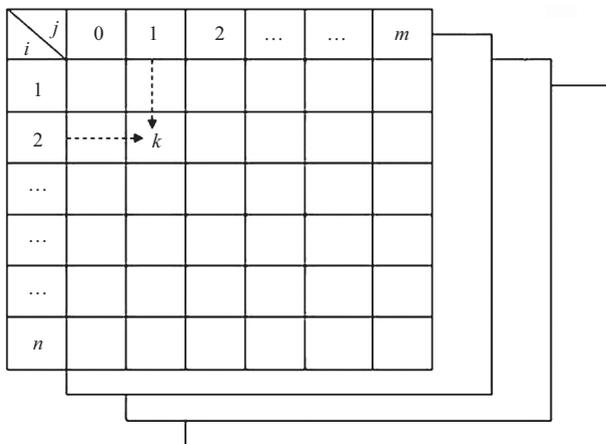


Рис. 1. Матрица ij для различных состояний системы

массива конъюнкций и определение аварий в ходе индуктивного анализа возможно только при помощи анализа схемы системы электроснабжения.

Относительная длительность ремонтных и эксплуатационных режимов определяется по формуле

$$q_j = \lambda_{ij} \tau_{ij} \frac{T_p}{8760}, \quad (5)$$

где λ_{ij} — интенсивность отказов элементов системы электроснабжения, 1/год; τ_{ij} — среднее время восстановления элементов системы электроснабжения, год. Нормальному режиму работы системы присваивается $j = 0$, а его относительная длительность рассчитывается по формуле

$$q_0 = \frac{T_p}{8760} \left(1 - \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} \tau_{ij} \right). \quad (6)$$

Расчет частоты и длительности аварий основан на последовательном применении формулы полной вероятности при рассмотрении всех возможных пересечений матрицы ij [6]. Вероятность возникновения аварии k в режиме j связана с вероятностью отказа элемента i :

$$q_{kj} = \sum_{i=0}^n P(ij) P\left(\frac{k}{ij}\right), \quad (7)$$

где $P(ij)$ — вероятность отказа элемента i в режиме j ; $P\left(\frac{k}{ij}\right)$ — вероятность аварии k при отказе элемента i в режиме j .

В предположении, что вся коммутационная аппаратура работает без отказа, можно получить формулу для определения частоты аварий k -го вида:

$$\Lambda\left(\frac{k_{\text{о, п}}}{k_{\text{в, р}}}\right) = \sum_{j=0}^m \sum_{i=1}^n q_j \lambda_i L(j, i, k);$$

$$L(j, i, k) = \begin{cases} 1, & \text{если } j \cap i = k \\ 0, & \text{если } j \cup i \neq k \end{cases} \quad (8)$$

где q_j — относительная длительность j -го режима; λ_i — частота отказов с коротким замыканием i -го элемента схемы; L — условная вероятность, являющаяся логической функцией для k -й аварии.

Для каждого типа необходимо определить время восстановления, т.е. время, за которое схема вернется к нормальному режиму. Среднее время определяется как математическое ожидание по всей совокупности соответствующих конъюнкций по формуле

$$\tau(k) = \frac{1}{\Lambda(k)} \left(\sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^n \sum_{s=1}^u q_j \lambda_i \tau(j, i, s) L(j, i, s, k) \right), \quad (9)$$

где $\tau(j, i, s)$ — время восстановления нормального функционирования установки после аварии k -го вида в j -м режиме при отказе i -го элемента.

Для определения величины недовыработки электроэнергии в течение длительности состояния T_p при помощи мультиматричного метода используем формулу

$$\Delta W_p = T_p \sum_k^i \Lambda(k) \tau(k) \Delta N(k), \quad (10)$$

где $\Delta N(k)$ — величина аварийных снижений мощности при авариях k -го вида с длительностью их существования $\tau(k)$.

Путем суммирования недоотпусков электроэнергии для каждого объекта в каждом режиме получаем, что суммарный недоотпуск электро-

энергии составит 264 613,1 кВт·ч. Данное значение оценим в соотношении к суммарному потреблению электроэнергии временного городка 4 170 930 кВт·ч. Таким образом, в процентном соотношении недоотпуск электроэнергии составит:

$$\Delta W_p = \frac{264\,613,1}{4\,170\,930} 100\% = 6,34\%.$$

Таким образом, делаем вывод, что показатель надежности системы электроснабжения достаточно высок.

Литература

1. **РД 34.20.185—94.** Инструкция по проектированию городских электрических сетей. М.: Минтопэнерго, 1995. 30 с.
2. **СП 256.1325800.2016.** Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа. АО «ЦНИИПромзданий», 2017. 92 с.
3. **Пособие** по проектированию городских и поселковых электрических сетей (к ВСН 97-83) / Гипрокоммунэнерго, МНИИТЭП. М.: Стройиздат, 1987. 208 с.
4. **Солнечная** энергетика: учебное пособие для вузов / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 317 с.
5. **NASA Surface meteorology and Solar Energy.** Atmospheric science data center. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://eosweb.larc.nasa.gov/>
6. **Кривенко Т.В.** Развитие моделей и методов оценки надежности автономных систем генерации, использующих возобновляемые источники энергии: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Красноярск, 2018. 128 с.
7. **Яковлева Э.В., Батулин С.В.** Расчет надежности электротехнического комплекса с фотоэлектростанцией // Современная техника и технологии. 2015. № 5 (45). С. 53—56.
8. **A framework** for the reliability evaluation of grid-connected photovoltaic systems in the presence of intermittent faults / B. Cai, Y. Liu, Y. Ma et al. // Energy. 2015. V. 93. P. 1308—1320.
9. **Probabilistic** evaluation of the performance of wind-diesel energy systems / A.C. Saramourtsis, A.G. Bakirtzis, P.S. Dokopoulos, E.S. Gavanidou // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1994. V. 9. No. 4. P. 743—752.
10. **Тремясов В.А., Кривенко Т.В.** Мультиматричная модель для оценки надежности автономной энергоустановки на основе фотоэлектрического преобразователя // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. № 1 (23). С. 9—17.

*И.И. Бердышев, BerdyshevII@mpei.ru,
М.В. Бурмейстер, BurmeisterMV@mpei.ru,
А.А. Ильина, IinaAIA@mpei.ru,
Р.В. Булатов, bulatov_rv@inbox.ru,
НИУ «МЭИ», Москва*

ВЫБОР МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПРОГРАММНО-АППАРАТНОМ КОМПЛЕКСЕ СИСТЕМЫ ВИРТУАЛЬНОЙ ИНЕРЦИИ

В настоящее время в мире находят широкое применение возобновляемые источники электроэнергии (ВИЭ). По состоянию на 01.08.2022 г. доля договоров о предоставлении мощности ВИЭ в объеме выработки электроэнергии в ЕЭС России составила 0,7 %. С 2014 по 2022 гг. установленная мощность ВИЭ в энергосистеме (без гидроэнергетики) увеличилась в 3,7 раза до 5,47 ГВт или до 2,2 % общей мощности ЕЭС России [1].

Быстрое развитие ВИЭ приводит к тому, что современная электроэнергетическая система (ЭЭС) переходит из системы с преобладанием синхронных генераторов к системе с преобладанием генерации на основе инверторов. Фотоэлектрические системы и большинство современных ветряных турбин подключены к ЭЭС с помощью инверторов. Хотя это целесообразно с точки зрения эксплуатации ВИЭ, но генерация с инверторным подключением к ЭЭС не обеспечивает механической инерционной реакции и, следовательно, отрицательно влияет на устойчивость ЭЭС [2].

При возникновении в энергосистеме небаланса между выработкой и потреблением активной мощности генераторы не могут мгновенно среагировать, чтобы сбалансировать систему. Кинетическая энергия, запасенная в роторах, отвечает за противодействие этому небалансу за счет инерционного отклика до тех пор, пока не включится первичное регулирование частоты.

По мере вытеснения ВИЭ традиционных генераторов снижается относительная инерция ЭЭС. Это приводит к увеличению скорости изменения частоты и величины провала частоты в ЭЭС. Первичное регулирование частотой не может отреагировать в течение такого короткого промежутка времени (обычно менее 5 с), чтобы остановить изменение частоты системы. Такие ситуации могут привести к срабатыванию реле частоты, вызывая сброс нагрузки при пониженной частоте и, в худшем случае, могут привести к каскадным отключениям [3]. Одним из решений данной проблемы является использование систем виртуальной инерции (СВИ).

Системы виртуальной инерции можно охарактеризовать как комплекс устройств и алгоритмов, выполняющий преобразование постоянного тока в переменный ток промышленной частоты, имитирующий инерционный отклик синхронных машин на ЭЭС [4]. Основой СВИ является алгоритм виртуальной инерции, который представляет различные источники постоянного тока, подключенные к ЭЭС через инверторы в качестве синхронных генераторов (СГ). Большинство современных ветрогенераторов работает с регулировкой скорости, подключаясь через полупроводниковые преобразователи и полностью убирая инерционный отклик. Точно так же фотоэлектрические системы и системы накопления энергии имеют преобразователь постоянного тока и инвертор на входе и не вносят вклад в инерционную реакцию [2]. СВИ, основанные на обратной связи по току и напряжению с выхода инвертора, генерируют сигналы для управления транзисторами для представления ВИЭ как СГ с точки зрения ЭЭС.

Классификация топологий виртуальной инерции. Несмотря на то, что базовые концепции, лежащие в основе различных топологий, описанных в литературе, схожи, реализация их весьма различается в зависимости от применения и желаемого уровня точности модели. Некоторые топологии имитируют практически точное поведение СГ с помощью подробной математической модели, которая представляет их динамику. Другие пытаются упростить описание, используя только уравнение качания для аппроксимации поведения СГ или собственные зависимости, пропорциональные изменению частоты в энергосистеме.

В данной статье производится выбор топологии СВИ для применения в программно-аппаратном комплексе. Сравнение топологий проведено на основе критерия сложности математического описания и требуемой вычислительной сложности микропроцессорных устройств. Выбор такого критерия обусловлен тем, что применение относительно простого аппаратного комплекса позволит проводить опыты исследовательским группам с ограниченным бюджетом, сократить сроки разработки и наладки оборудования.

В результате анализа зарубежной и отечественной литературы были выделены наиболее популярные и разработанные топологии систем виртуальной инерции: синхронвертер, топология лаборатории *Ise*, виртуальный синхронный генератор и регулятор на основе статизма по частоте [4, 5].

Синхронвертеры: топология на основе модели синхронного генератора. Синхронвертер управляет инвертором как СГ, имеющий такой же динамический отклик с точки зрения сети [6]. Данный способ позволяет эксплуатировать ЭЭС без существенных изменений в правилах эксплуа-

тации. Следующие основные уравнения используются для описания динамики СГ:

$$T_e = M_f i_f(i, \widetilde{\sin \theta}); \quad (1)$$

$$e = \dot{\theta} M_f i_f \widetilde{\sin \theta}; \quad (2)$$

$$Q = -\dot{\theta} M_f i_f(i, \widetilde{\cos \theta}), \quad (3)$$

где T_e — электромагнитный момент синхронвертера; M_f — величина взаимной индуктивности между обмоткой возбуждения и обмоткой статора; i_f — ток возбуждения; θ — угол между осью ротора и одной из фаз обмотки статора; e — генерируемое напряжение без нагрузки; Q — генерируемая реактивная мощность.

Уравнения (1)—(3) сначала дискретизируются, а затем решаются в каждом цикле управления в контроллере для генерации управляющих сигналов инвертора. На рисунке 1 показана принципиальная схема синхронвертера [4]. Выходной ток инвертора i и напряжение сети u являются сигналами обратной связи. Выбор момента инерции J и коэффициента демпфирования D_p имеет решающее значение с точки зрения устойчивости системы, как показано в [7].

Топология синхронвертера позволяет синхронизироваться с сетью [6]. Тот факт, что для реализации не требуется производная по частоте, является большим преимуществом, поскольку производная часто вызывает шумы в системе управления. Хотя синхронвертер способен точно воспроизвести динамику СГ, сложность используемых дифференциальных уравнения может привести к неустойчивости численных методов.

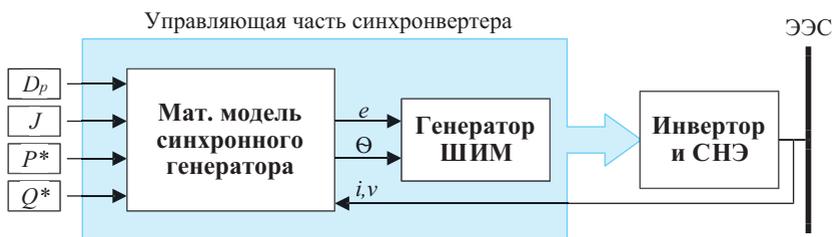


Рис 1. Принципиальная схема синхронвертера [4]

Топология лаборатории *Ise* на основе уравнения качания. Топология, разработанная лабораторией *Ise* для реализации виртуальной инерции, аналогична описанному ранее подходу синхронвертера, но вместо исполь-

зования полной подробной модели СГ используется уравнение качания для имитации инерции [8]. Принципиальная схема, иллюстрирующая принцип работы, представлена на рис. 2 [4]. Контроллер определяет выходной ток инвертора i и напряжение точки в точке подключения к сети u , вычисляет частоту сети ω_c и выходную активную мощность инвертора $P_{\text{ВЫХ}}$. В рамках алгоритма управления уравнение качания (4) решается каждый цикл управления. Уравнение качания СГ:

$$P_{\text{ВХОД}} - P_{\text{ВЫХ}} = J\omega_m \left(\frac{d\omega_m}{dt} \right) + K_D \Delta\omega; \quad (4)$$

$$\Delta\omega = \omega_m - \omega_c, \quad (5)$$

где $P_{\text{ВХОД}}$ — входная мощность (аналогична уставке номинальной мощности в СГ); $P_{\text{ВЫХ}}$ — выходная мощность инвертора; ω_m — виртуальная угловая частота; ω_c — угловая частота в сети; J — момент инерции; K_D — коэффициент демпфирования.

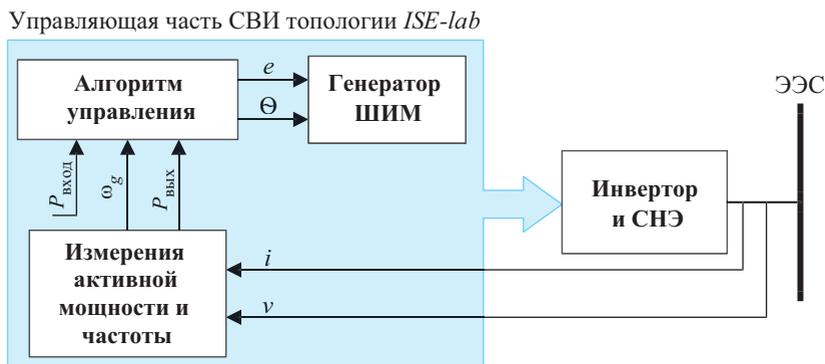


Рис. 2. Принципиальная схема топологии лаборатории Ise [4]

Как и в случае с синхронвертером, для реализации алгоритма управления не требуется производная по частоте. Это очень полезно, поскольку известно, что производные по частоте создают шумы в системе управления, что ухудшает управление. Кроме того, эта топология может использоваться для работы блоков СГ в качестве блоков формирования сети. Однако по-прежнему остаются проблемы, связанные с неустойчивостью численных методов расчета дифференциальных уравнений, которые наряду с неправильной настройкой параметров J и K_D могут привести к самораскачиванию системы [9].

Виртуальные синхронные генераторы: топология на основе связи частоты и мощности. Основная идея виртуальных синхронных генераторов (ВСГ) состоит в том, чтобы имитировать характеристики инерционного отклика СГ в системе распределенной генерации, в частности способность реагировать на изменения частоты [10]. Это эмулирует высвобождение и поглощение кинетической энергии, подобное тому, которое имеет СГ, тем самым представляя блоки распределенной генерации в качестве управляемого источника тока, регулирующего свою мощность на основе изменений частоты в системе [11]. Это один из самых простых подходов к реализации виртуальной инерции в системах распределенной генерации, поскольку он не включает подробные уравнения, используемые в СГ. Выходная мощность ВСГ регулируется уравнением

$$P_{VSG} = K_D \Delta\omega + K_I \frac{d\Delta\omega}{dt}. \quad (6)$$

Здесь $\Delta\omega$ — изменение угловой частоты и $\frac{d\Delta\omega}{dt}$ — скорость изменения; K_D и K_I также представляют демпфирование и инерционную постоянную соответственно.

Топология ВСГ показана на рис. 3 [4]. ФАПЧ используется для измерения изменения частоты системы и скорости изменения частоты [11]. Затем, используя уравнение (6), вычисляют опорное значение активной мощности для инвертора. В контроллере тока генерируется опорное значение тока на основе опорного значения активной мощности. Проиллюстрированная здесь топология предполагает подход к управлению током на основе преобразования из трехфазных в d - q —координаты, но могут быть использованы любые другие методы управления током, как описано в [12].

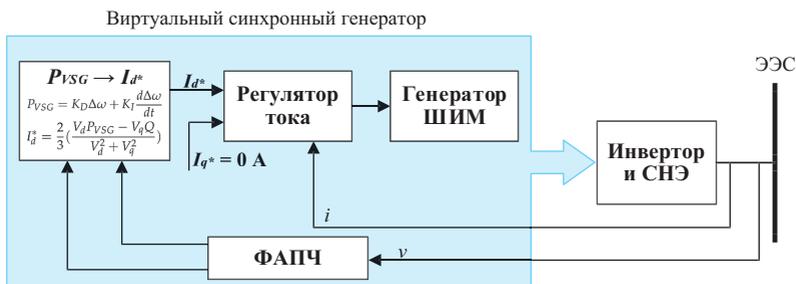


Рис. 3. Топология виртуального синхронного генератора (ВСГ) [4]

Ток по оси qI_q^* и реактивная мощность Q устанавливаются равными нулю, так как предполагается, что регулируется только активная мощность. Контроллер тока на основе обратной связи по току сети генерирует управляющие сигналы для управления инвертором.

Топология на основе контроля статизма по частоте. Описанные выше подходы пытаются имитировать поведение СГ для улучшения инерционной реакции энергосистем с преобладанием инверторов. В отличие вышеприведенных методов контроллеры на основе контроля статизма по частоте разработаны для автономной работы в изолированных микросетях [13]. Исходя из предположения, что полное сопротивление сети является индуктивным, статизм по частоте можно записать как

$$\omega_{\Gamma} = \omega^* - m_p (P_{\text{оп}} - P_{\text{и}}), \quad (7)$$

где ω^* — опорная частота; ω_{Γ} — частота сети; $P_{\text{оп}}$ — заданная активная мощность; $P_{\text{и}}$ — измеренная активная выходная мощность блока распределенной генерации; m_p — регулировочный коэффициент по активной мощности.

Схема регулятора статизма по частоте на основе уравнения (7) показана на рис. 4.

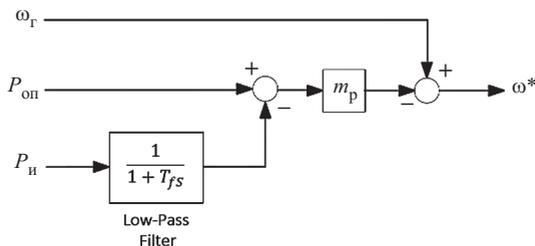


Рис. 4. Схема контроллера падения частоты

Часто для фильтрации высокочастотных составляющих при измерении выходной мощности инвертора используют фильтр низких частот с постоянной времени T_f . На основе схемы, представленной на рис. 4, получаем

$$P_{\text{оп}} - P_{\text{и}} = \frac{1}{m_p} (\omega^* - \omega_g) + T_f \frac{1}{m_p} s \omega^*. \quad (8)$$

Фильтры, используемые для измерения мощности в этих контроллерах, создают задержку, которая математически эквивалентна виртуальной

инерции, в то время как усиление статизма эквивалентно демпфированию. Однако традиционные системы на основе статизма, описываемые уравнением (8), имеют медленную реакцию. Кроме того, предположение об индуктивном сопротивлении сети не всегда может быть верным.

В таблицу сведены ключевые особенности и недостатки вышеперечисленных топологий систем виртуальной инерции. Системы виртуальной инерции являются управляющим элементом для инверторов, установленных на электростанциях на основе ВИЭ, и технологически выполняются на основе микроконтроллеров. Поэтому при выборе математического описания СГ для реализации системы виртуальной инерции в виде программно-аппаратного комплекса необходимо принимать во внимание вычислительную мощность микропроцессорных устройств. Система виртуальной инерции для промышленного применения должна осуществлять управление в темпе процесса, т.е. за один период управления должны быть решены все уравнения и передана информация на исполняющие устройства.

Т а б л и ц а

Краткое описание топологий виртуального инерционного управления

Топология модели	Ключевые особенности	Недостатки
Модель на основе синхронного генератора	<ul style="list-style-type: none"> • Точное воспроизведение динамики СГ • Отсутствие канала управления по производной частоты • ФАПЧ используется только для синхронизации 	<ul style="list-style-type: none"> • Сходимость численных методов • Обычная реализация источника напряжения; отсутствуют защиты от перегрузки по току
Модель на основе уравнения качания	<ul style="list-style-type: none"> • Более простая модель по сравнению с моделью на основе СГ • Производная частоты не требуется • ФАПЧ используется только для синхронизации 	<ul style="list-style-type: none"> • Колебания частоты и мощности • Обычная реализация источника напряжения; отсутствуют защиты от перегрузки по току
Модель на основе связи частоты и мощности	<ul style="list-style-type: none"> • Простая реализация • Обычная реализация источника, встроенная защита от перегрузки по току 	<ul style="list-style-type: none"> • Нестабильность из-за наличия ФАПЧ, особенно в слабых сетях • Требуется производная частоты, система восприимчива к шумам
Модель на основе контроля статизма по частоте	<ul style="list-style-type: none"> • Концепции, аналогичные традиционному контролю статизма по частоте в СГ 	<ul style="list-style-type: none"> • Медленный переходный отклик • Неправильный переходный процесс распределения активной мощности

Модели на основе синхронного генератора и на основе уравнения качания хорошо описывают поведение СГ, однако требуют высокой вычислительной мощности микроконтроллера. Модели на основе связи частоты и мощности и на основе контроля статизма по частоте имеют более простое математическое описание, поэтому требуют меньших вычислительных мощностей. При этом моделям на основе контроля статизма по частоте присущ медленный динамический отклик и несоответствие поведения при переходных процессах модели СГ.

Таким образом, для создания программно-аппаратного комплекса СВИ целесообразно использовать модель на основе связи частоты и мощности. Имитационное моделирование СВИ на основе синхронного генератора и на основе связи частоты и мощности в *MatLabSimulink* показало, что для первой модели время моделирования одной секунды в среднем составило 4 мин, а для второй модели — около 6 с. Это подтверждает сделанные выше выводы. Для того, чтобы СВИ работали в темпе процесса, необходимо произвести оптимизацию исполняемого кода.

Литература

1. **Ассоциация** развития возобновляемой энергетики. Статистика по объему ВИЭ в РФ на 01.08.2022 г. https://ireda.ru/statistics_of_renewable_energy_in_russia.
2. **Achieving** a 100 % Renewable Grid: Operating Electric Power Systems with Extremely High Levels of Variable Renewable Energy / B. Kroposki, B. Johnson, Y. Zhang et al. // IEEE Power Energy Mag. 2017. 15. 61—73.
3. **Improving** transient stability of photovoltaic-hydro microgrids using virtual synchronous machines / U. Tamrakar, D. Galipeau, R. Tonkoski, I. Tamrakar // Proceedings of the IEEE Eindhoven PowerTech, Eindhoven, The Netherlands, 29 June—2 July 2015, pp. 1—6.
4. **Бурмейстер М.В., Булатов Р.В., Блинова К.А.** Применение систем виртуальной инерции для улучшения качества переходных процессов в электроэнергетических системах» // Фёдоровские чтения — 2021: LI международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2021.
5. **Virtual Inertia: Current Trends and Future Directions** / U. Tamrakar, D. Shrestha, M. Maharjan et al. // Applied Sciences. 2017. 7(7): 654.
6. **Zhong Q.C., Weiss G. Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators** // IEEE Trans. Ind. Electron. 2011. 58. 1259—1267.
7. **Piya P., Karimi-Ghartemani M.** A stability analysis and efficiency improvement of synchronverter // Proceedings of the IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, USA, 20—24 March 2016, pp. 3165—3171.
8. **Sakimoto K., Miura Y., Ise T.** Stabilization of a power system with a distributed generator by a Virtual Synchronous Generator function // Proceedings of the 8th

- International Conference on Power Electronics (ECCE Asia), Jeju, Korea, 30 May—3 June 2011, pp. 1498—1505.
9. **Alipoor J., Miura Y., Ise T.** Power System Stabilization Using Virtual Synchronous Generator With Alternating Moment of Inertia // IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron. 2015. 3. 451—458.
 10. **Torres M., Lopes L.A.C.** Virtual synchronous generator control in autonomous wind-diesel power systems // Proceedings of the IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC), Montreal, QC, Canada, 22—23 October 2009, pp. 1—6.
 11. **Virtual synchronous generator: An element of future grids / T.V. Van, K. Visscher, J. Diaz et al.** // Proceedings of the IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), Gothenberg, Sweden, 11—13 October 2010, pp. 1—7.
 12. **Current control techniques for applications in virtual synchronous machines / U. Tamrakar, R. Tonkoski, Z. Ni et al.** // Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Power Systems (ICPS), New Delhi, India, 4—6 March 2016, pp. 1—6.
 13. **Pogaku N., Prodanovic M., Green T.C.** Modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter-Based Microgrid // IEEE Trans. Power Electron. 2007. 22. 613—625.

*И.И. Бердышев, BerdyshvII@mpei.ru,
М.В. Бурмейстер, BurmeysterMV@mpei.ru,
А.А. Ильина, IinaAIA@mpei.ru,
А.Е. Феднов, FednovAY@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва*

СОЗДАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ВИРТУАЛЬНОЙ ИНЕРЦИИ НА ОСНОВЕ СВЯЗИ ЧАСТОТЫ И МОЩНОСТИ

Ветровая и солнечная генерация являются самыми быстрорастущими источниками электроэнергии благодаря снижению цен на силовые электронные компоненты технологий возобновляемых источников энергии в настоящее время [1]. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ), подключенные с помощью инверторов (конверторов), становятся значительной частью современных энергосистем. Согласно отчетам Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (*IRENA*), установленная мощность электростанций на основе ВИЭ увеличилась с 77,5 ГВт в 2000 г. до 1225 ГВт в 2018 г. [1].

Однако широкое внедрение ВИЭ приводит к таким техническим проблемам, как проблемы неустойчивости, большие отклонения частоты и

проблемы синхронизации в энергосистеме из-за малоинерционных характеристик ВИЭ. Инверторы, которые применяют для подключений ВИЭ к энергосистеме, не обладают механической инерцией. Поэтому подключение электростанций с генерацией на основе инверторов с нулевой инерцией создает проблемы с точки зрения регулирования частоты и напряжения, а также устойчивости энергосистемы. Малая инерция приводит к более значительному изменению частоты и напряжения в энергосистеме при различных возмущениях. Механическая инерция синхронных генераторов и паровых турбин замедляет изменение частоты в первые секунды после возмущения в сети, после этого первичные регуляторы начинают восстанавливать баланс нагрузки и генерации. При этом ВИЭ, подключенные через инверторы, не обеспечивают инерционный отклик. Поэтому большой небаланс в соотношении генерации и нагрузки или возмущение в системе могут привести к значительным отклонениям частоты и напряжения, что в свою очередь может привести к сбросу нагрузки или неустойчивости в энергосистеме, а в худшем случае может возникнуть лавина частоты [2].

Одно из решений для сохранения устойчивости системы заключается в виртуальном (искусственном) обеспечении дополнительной инерции. Виртуальная инерция может быть обеспечена ВИЭ, использующими накопители энергии вместе с инверторами и соответствующей системой управления. Такой комплекс устройств и алгоритмов называют системами виртуальной инерции (СВИ). Инерция также может быть эмулирована непосредственно от ВИЭ за счет эксплуатации на мощности меньше максимальной [3].

В докладе описан процесс имитационного моделирования системы виртуальной инерции на основе связи частоты и мощности, также называемой виртуальным синхронным генератором (ВСГ) (рис. 1) [4]. Данная модель относится к классу «следящих за сетью». Основной частью является блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), который определяет мгновенный угол синусоидального напряжения в сети. Если в сети присутствуют колебания частоты, несинусоидальность и колебания напряжения, то ФАПЧ демонстрируют установившиеся ошибки и неустойчивость, особенно в слабых сетях. Точное измерение производной частоты с помощью ФАПЧ также может быть сложной задачей [5, 6]. С другой стороны, ВСГ — это один из самых простых подходов к реализации виртуальной инерции в системах распределенной генерации, поскольку он не включает все подробные уравнения, используемые в синхронном генераторе.

Имитационное моделирование выполняли в программном комплексе *MatLab/Simulink*. Данное ПО позволяет моделировать электрические цепи во времени, обладает большой библиотекой электротехнических элемен-

тов и функционалом для решения дифференциальных уравнений, имеет широкий набор наблюдаемых электрических величин, моделирование электромагнитных и электромеханических переходных процессов разной сложности, является единой средой для моделирования электроэнергетических объектов и управления ими без стороннего ПО.



Рис. 1. Модель СВИ на основе связи частоты и мощности [4]

Конвертор постоянного тока в переменный работает как источник тока, управляемый напряжением. Контур с ФАПЧ используется для измерения частоты в системе. В управляющем блоке вычисляется активная мощность ВСГ и ток на основе значения отклонения частоты и ее первой производной. Регулятор тока построен на основе dq -преобразования и ПИ-контроллера, за его основу была взята модель из [7]. На выходе регулятора тока получается трехфазное напряжение, которое преобразуется в управляющие сигналы для $IGBT$ -транзисторов конвертора. Подробная схема управления ВСГ представлена на рис. 2.

В качестве источника постоянного тока в ВСГ могут выступать фотоэлектрическая станция, ветроэнергетическая установка IV типа, аккумуляторные батареи и другие системы накопления энергии (СНЭ). ВСГ эмулирует инерционные и демпфирующие свойства синхронного генератора, выдавая активную мощность при снижении частоты и поглощая активную мощность при избытке частоты. Выходная мощность эмулирует поведение СГ на основе следующего уравнения [8]:

$$P_{\text{ВСГ}} = P_{\text{ВСГ.ном}} + K_I \frac{d\Delta f}{dt} + K_D \Delta f, \quad (1)$$

где $\Delta f = f_{\text{ном}} - f_{\text{факт}}$; K_I — коэффициент инерции, эмулирует инерцию ротора реального генератора; K_D — коэффициент демпфирования, эмулирует эффект демпферных обмоток реального синхронного генератора.

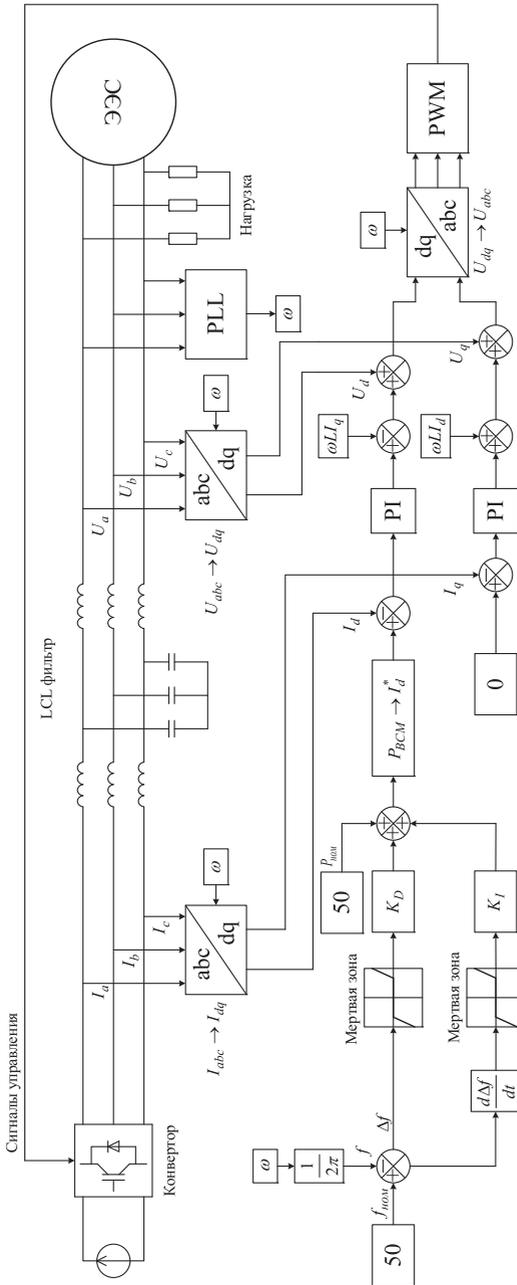


Рис. 2. Подробная схема управления ВСГ

Эти коэффициенты рассчитываются, как

$$K_I = \frac{P_{\text{ВСГ.ном}}}{\left(\frac{d\Delta f}{dt}\right)_{\text{max}}}, \quad (2)$$

$$K_D = \frac{P_{\text{ВСГ.ном}}}{\Delta f_{\text{max}}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{ВСГ.ном}}$ — номинальная мощность ВСГ; Δf_{max} — максимальное изменение частоты в системе; $\left(\frac{d\Delta f}{dt}\right)_{\text{max}}$ — максимальная скорость изменения частоты в системе.

Также в модели используется блок мертвой зоны для предотвращения влияния случайного шума в канале измерения частоты на роту ВСГ, его значение выбрано равным $\pm 0,1$ Гц. Мощность ВСГ вычисляют по формуле (1), затем она преобразуется в ток по формулам

$$I_{d_баз} = \frac{2}{3} \left(\frac{U_d P_{\text{ВСМ}} - U_q Q}{U_d^2 + U_q^2} \right), \quad (4)$$

$$I_{q_баз} = \frac{2}{3} \left(\frac{U_d Q - U_q P_{\text{ВСМ}}}{U_d^2 + U_q^2} \right). \quad (5)$$

Для данной модели СВИ контролируется только активная мощность, поэтому $I_{q_баз}$ равно нулю.

Номинальная мощность ВСМ $P_{\text{ВСМ.ном}}$ была выбрана равной 50 кВт. Значения Δf_{max} — ± 1 Гц, $\left(\frac{d\Delta f}{dt}\right)_{\text{max}}$ — $\pm 0,1$ Гц/с выбраны на основе измерения колебаний частоты в тестовой схеме при подключении нагрузки 100 кВА. Таким образом, коэффициент инерции и демпфирования рассчитывают как

$$K_I = \frac{P_{\text{ВСГ.ном}}}{\left(\frac{d\Delta f}{dt}\right)_{\text{max}}} = \frac{50 \cdot 10^3}{0,1} = 5 \cdot 10^5 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{Гц}}, \quad (6)$$

$$K_D = \frac{P_{\text{ВСГ.ном}}}{\Delta f_{\text{max}}} = \frac{50 \cdot 10^3}{1} = 5 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}. \quad (7)$$

Для изучения влияния ВСГ на работу электрической сети во время переходных процессов в ПК *MatLabSimulink* была собрана тестовая схема электроснабжения (рис. 3), содержащая: электроэнергетическую систему (ЭЭС), понижающий трансформатор, воздушную линию, две нагрузки, ВСГ, три выключателя и элемент короткого замыкания. В качестве допущения принято, что ВСГ питается от идеального источника ЭДС. Параметры элементов представлены в табл. 1. Модель тестовой схемы, созданная в ПК *MatLab/Simulink*, показана на рис. 4.

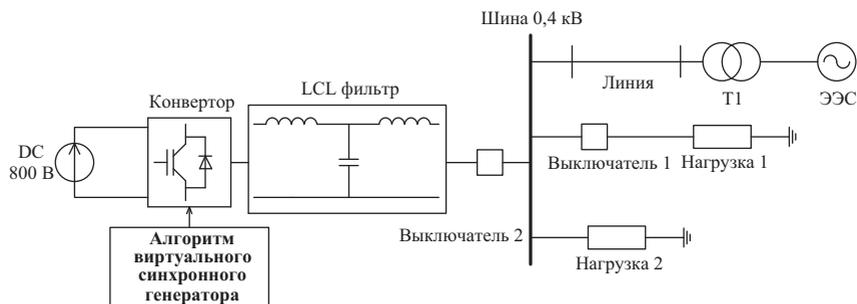


Рис. 3. Тестовая схема электроснабжения

Таблица 1

Параметры элементов тестовой схемы

Элемент	Параметр	Значение
Трансформатор	Модель	ТМ-630/10
	Номинальная мощность	630 кВт
	Номинальное напряжение ВН	10 кВ
	Номинальное напряжение НН	0,4 кВ
	Потери холостого хода	940 Вт
	Потери короткого замыкания	7600 Вт
	Ток холостого хода	0,8 %
	Напряжение короткого замыкания	5,5 %
Линия	Марка провода	2 × АС 240
	Активное сопротивление	0,375 Ом
	Реактивное сопротивление	1,2 Ом
	Длина	3 км
Нагрузка 2	Полная мощность	100 кВА
	Коэффициент мощности $\cos \varphi$	0,8

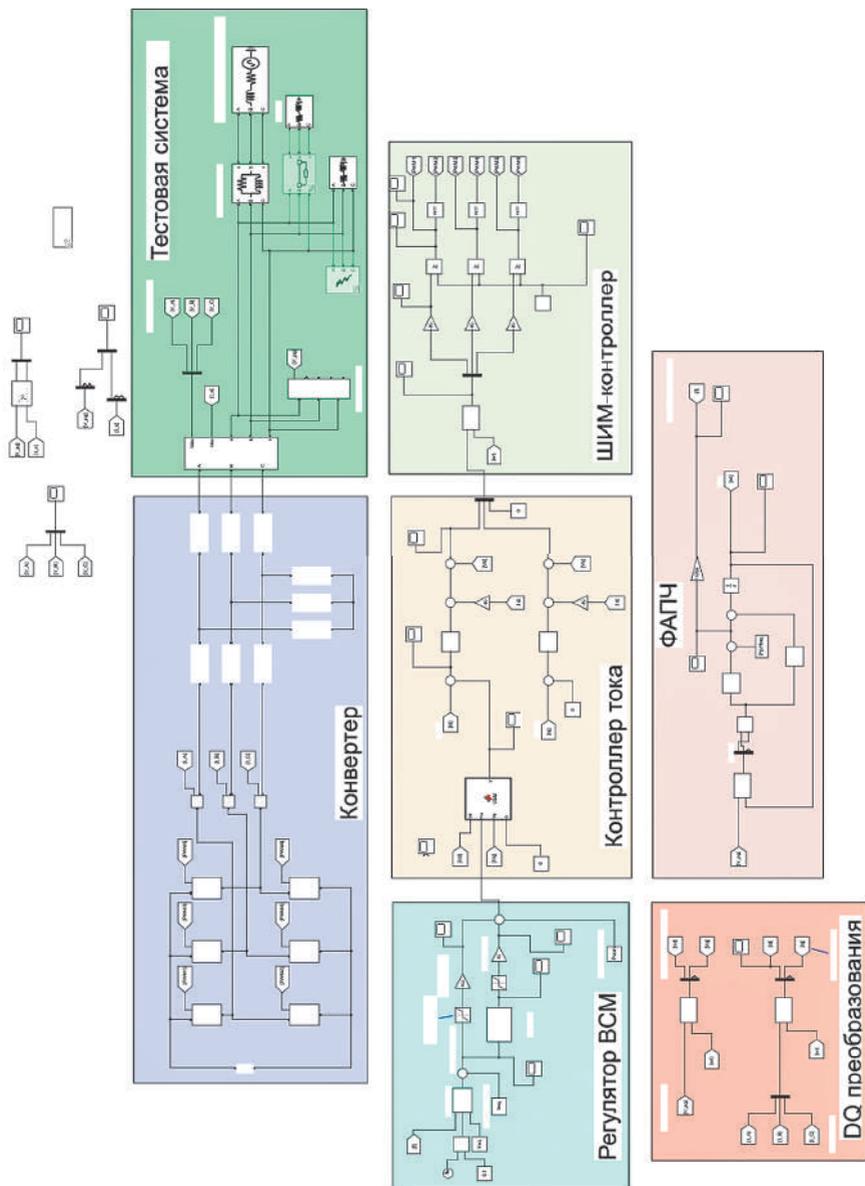


Рис. 4. Модель тестовой схемы в ПК MatLab/Simulink

Окончание табл. 1

Элемент	Параметр	Значение
ВСМ	Полная мощность	50 кВт
	Коэффициент инерции	$5 \cdot 10^5$ Вт/Гц
	Коэффициент демпфирования	$5 \cdot 10^4$ Вт·с/Гц

Для изучения влияния ВСГ на работу сети был проведен опыт по набросу нагрузки в сети 0,4 кВ. Для этого производили подключение нагрузки 1 через выключатель 1 в момент времени 0,3 с. Значение нагрузки менялось от 10 кВА до 200 кВА при $\cos \varphi = 0,8$ с подключением ВСГ и без, результаты опытов приведены в табл. 2. В таблицу также внесено относительное изменение частоты от применения ВСГ, рассчитанное по формуле

$$\delta \Delta f_{\max} = \left(\frac{\Delta f_{\max} \text{ с ВСГ}}{\Delta f_{\max} \text{ без ВСГ}} - 1 \right) 100 \% \quad (8)$$

Таблица 2

Значения максимальных отклонений частоты

Наброс нагрузки S, кВА	С ВСГ, Δf_{\max} , Гц	Без ВСГ, Δf_{\max} , Гц	Относительное изменение частоты $\delta \Delta f_{\max}$, %
10	0,0090	0,0088	2,27
20	0,016	0,018	-11,11
30	0,022	0,027	-18,52
40	0,027	0,036	-25,00
50	0,033	0,045	-26,67
60	0,039	0,053	-26,42
70	0,045	0,062	-27,42
80	0,050	0,070	-28,57
90	0,057	0,080	-28,75
100	0,062	0,088	-29,55
150	0,090	0,130	-30,77
200	0,110	0,170	-35,29

На рисунке 5 изображен график зависимости частоты в системе при подключении нагрузки 100 кВА в момент времени 0,3 с до применения ВСГ, а на рис. 6 — аналогичная зависимость с применением ВСГ. На основании графиков можно сделать вывод, что величина максимального

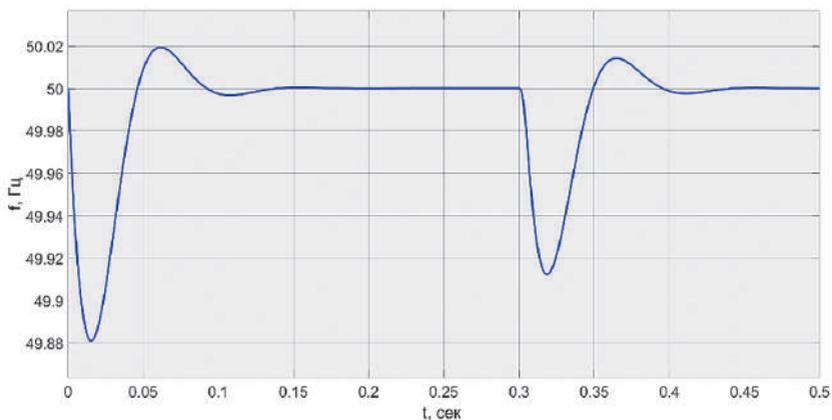


Рис. 5. График частоты в системе при подключении нагрузки 100 кВА в момент времени 0,3 с без ВСГ

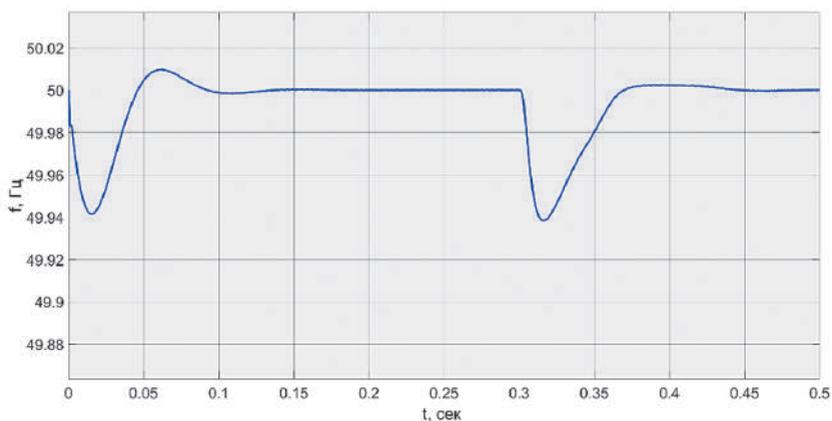


Рис. 6. График частоты в системе при подключении нагрузки 100 кВА в момент времени 0,3 с применением ВСГ

изменения частоты снижается, также снижается и величина перерегулирования. Это означает, что ВСГ выполняет свою функцию корректно. По данным из табл. 2 построена зависимость максимального изменения частоты в системе от мощности наброса мощности до применения ВСГ и при его применении (рис. 7). Из графика зависимости видно, что без применения ВСГ максимальное отклонение частоты от увеличения величины наброса мощности меняется линейно, а при применении ВСГ — логарифми-

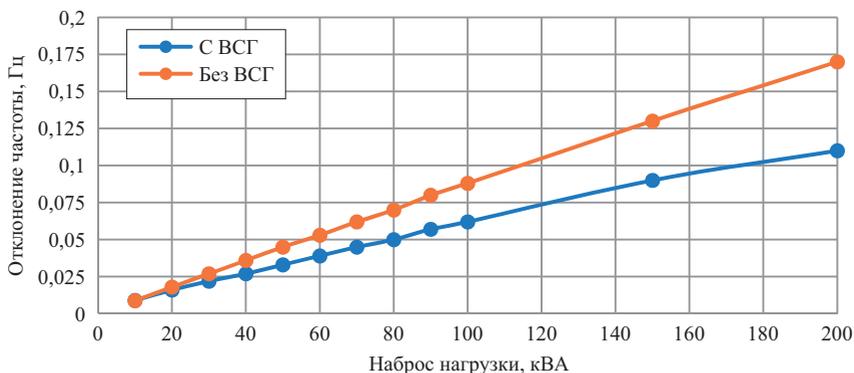


Рис. 7. График зависимости максимального изменения частоты в системе от мощности наброса мощности с применением ВСГ и без ВСГ

чески, т.е. эффективность применения ВСГ будет расти при дальнейшем увеличении наброса нагрузки.

В рамках исследования была разработана модель системы виртуальной инерции на основе связи частоты и мощности (виртуальный синхронный генератор), которая состоит из блока ФАПЧ, регулятора тока, генератора ШИМ, конвертора и тестовой схемы электроснабжения в ПК *MatLab/Simulink*. По результатам опыта по набросу нагрузки можно сделать вывод, что применение ВСГ позволяет снизить колебания частоты при переходных процессах в сети до 35 % относительно частоты сети без применения ВСГ, что подтверждает концепцию применения систем виртуальной инерции.

Литература

1. **International** renewable energy agency (IRENA), Trends in Renewable Energy. [Online]. URL: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>. (Accessed 08 April 2022).
2. **Heydari R., Savaghebi M., Blaabjerg F.** Control of Power Electronic Converters and Systems. Blaabjerg, F. (ed.) // Academic Press. 2021. V. 3. P. 523—540.
3. **VSM converter** controller implemented for RMS simulation studies of electrical power systems / R. Heydari, N. Johansson, L. Harnefors, F.A. Blaabjerg // 18th Wind Integration Workshop, 2019, pp. 1—6.
4. **Бурмейстер М.В., Булатов Р.В., Блинова К.А.** Применение систем виртуальной инерции для улучшения качества переходных процессов в электроэнергетических системах // Фёдоровские чтения — 2021: LI международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2021.

5. **Overview** of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems / F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, A.V. Timbus // IEEE Trans. Ind. Electron. 2006. 53. 1398—1409.
6. **European** Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E). Need for Synthetic Inertia (SI) for Frequency Regulation; ENTSO-E: Brussels, Belgium, 2017. URL: https://consultations.entsoe.eu/system-development/entso-e-connection-codes-implementationguidance-d-3/user_uploads/jgd-need-for-synthetic-inertia.pdf (accessed on 21 June 2022).
7. **Improving** transient stability of photovoltaic-hydro microgrids using virtual synchronous machines / U. Tamrakar, D. Galipeau, R. Tonkoski, I. Tamrakar // In Proceedings of the IEEE Eindhoven PowerTech, Eindhoven, The Netherlands, 29 June—2 July 2015; pp. 1—6.
8. **Grid** tied converter with virtual kinetic storage / M.P.N. Van Wesenbeeck, S.W.H. de Haan, P. Varela, K. Visscher // In Proceedings of the IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest, Romania, 28 June—2 July 2009, pp. 1—7.

*Ю.Ю. Захаров, zaharov.uu@mail.ru,
А.Р. Лепешкин, lepeskin.ar@gmail.ru,
НИУ «МЭИ», Москва*

АНАЛИЗ КРУПНЫХ АГРЕГАТОВ ВЭС ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ЗОН

На сегодняшний день большие территории Российской Федерации остаются вне зон централизованного электроснабжения. Наличие большого количества рассредоточенных удаленных потребителей, электроснабжение которых на данный момент осуществляется только от автономных энергоисточников, формируют децентрализованные зоны (ДЗ) (рис. 1). Удаленный потребитель — это потребитель электроэнергии, расположенный в тех районах страны, в которые дорого поставлять электроэнергию от централизованной зоны электроснабжения, например малонаселенный поселок, остров, полуостров или удаленный труднодоступный район. Такие зоны характерны для областей Сибири и Дальнего Востока, а также горных районов Средней Азии, Кавказа и других регионов [1].

Основными проблемами электроснабжения ДЗ являются неудовлетворительное техническое состояние в связи с большим износом оборудования, энергетических объектов и линий электропередачи. Эти два фактора приводят к недостаточной надежности электроснабжения ДЗ в целом. Следует также отметить ограниченность процесса сезонного завоза топлива в труднодоступные районы, низкую экономичность энер-



Рис. 1. Централизованное и автономное электроснабжение на территории РФ

гетических объектов (проведенный анализ показал, что удельный расход топлива на дизельных электростанциях в отдельных районах РФ достигает 500–600 г у.т./кВт·ч при КПД 20–25 %), а также удаленность потребителей малой мощности от децентрализованной зоны. Авторы предлагают следующее определение: удаленный потребитель малой мощности — это потребитель, для которого строительство системы электроснабжения промышленной частоты (50/60 Гц) от централизованной, децентрализованной или комбинированной зоны электроснабжения экономически невыгодно.

Совокупность рассмотренных проблем приводит к неоправданно высоким финансовым затратам и многократному удорожанию выработки электроэнергии. Очевидным путем повышения энергоэффективности таких зон является максимальное использование местных возобновляемых энергоресурсов [2–9].

Внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергобаланс децентрализованных зон при разумном использовании позволит частично или полностью заменить повсеместно используемые автономные дизельные электростанции, добиться экономии дорогостоящего топлива и обеспечить устойчивое электроснабжение населения и производств в зонах децентрализованного электроснабжения (преимущественно предприятия горнодобывающего, сельскохозяйственного и сырьевого использования — оленеводство, пушное звероводство, животноводство, промысел, рыболовство, очаговое земледелие, лесозаготовки и деревообработка, добыча руды, драгметаллов и др.).

Проведенный анализ распределения ресурсов ВИЭ показывает, что в децентрализованных зонах преобладают ресурсы малой гидроэнергетики и ветроэнергетики (рис. 2) [5–9]. В ветрогенераторах большой мощности возможно применение сверхпроводящих устройств [4], а в ветрогенераторах малой мощности можно использовать постоянные магниты, в том числе и для создания теплогенераторов [10–14].

В данной работе мы остановимся на возможности использования ветроэлектростанций (ВЭС). Возведение крупных агрегатов ВЭС в децентрализованных зонах позволило бы решить ряд проблем существующих удаленных потребителей и дать стимул развитию регионов РФ. Представим обзор крупных агрегатов ВЭС с небольшой историей и краткой характеристикой.

1. Adwen AD 5-135. Модель агрегата AD 5-116 была разработана германской компанией «Aerodyn» еще в конце 1990-х гг. Первый прототип был установлен в 2004 г. компанией «Multibrid GmbH». Высоко оценивается инновационный дизайн агрегата ВЭС — гибридная трансмиссия, обеспечивающая компромисс между прямым приводом и высокой скоростью, позволившая значительно облегчить гондолу и повысить надежность установки. Первоначально установка работала с ветровым колесом диаметром 116 м, в дальнейшем диаметр ветрового колеса был увеличен до 135 м.

В 2007 г. французская компания «Areva», специализирующаяся на ядерной и возобновляемой энергетике, приобрела «Multibrid». Позднее был проведен ребрендинг данного агрегата — установка была переименована в Adwen AD-135 после запуска совместного предприятия «Adwen» между компаниями «Gamesa» и «Areva» (в 2015 г.). Агрегаты AD-135 установлены на ВЭС «Wikinget» на германском шельфе Балтийского моря.

Совместное предприятие «Adwen» выпускает продукцию на базе «Areva Wind», включая агрегат «Areva» M5000-135 и разрабатываемую агрегатную платформу мощностью 8 МВт. Компания «Gamesa» представила свою технологию морского агрегата G132-5.0 МВт. В 2017 г. «Areva» продала свою долю в «Adwen» компании «Gamesa» после того, как было объявлено о слиянии «Gamesa» и «Siemens Wind Power». Реструктуризация «Adwen» была завершена к сентябрю 2020 г., производство агрегатов ВЭС было прекращено, и «Adwen» сосредоточилась только на обслуживании установленных агрегатов [15].

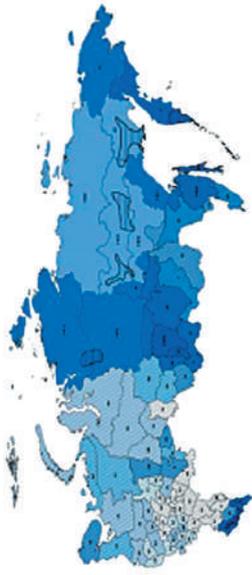
Параметры агрегата ВЭС: номинальная мощность 5 МВт; диаметр ветрового колеса 135 м; трансмиссия спиральная, ступенчатая планетарная передача.

2. Dongfang/Hyundai Heavy Industries 5.5 MW. Эти компании подписали лицензионные соглашения с американским разработчиком «AMSC Windtec Solutions» для производства данной модели агрегата ВЭС. Про-

Распределение ресурсов солнечной энергии
от 1000 до 1600 млн кВт·ч на км²



Распределение ресурсов малой гидроэнергетики
от 10 до 1000 тыс. кВт·ч на км²



Распределение ветроэнергетических ресурсов
на высоте 100 м от 130 до 550 Вт/м²



Распределение ресурсов расчетной лесосеки
от 1 до 230 т/км²

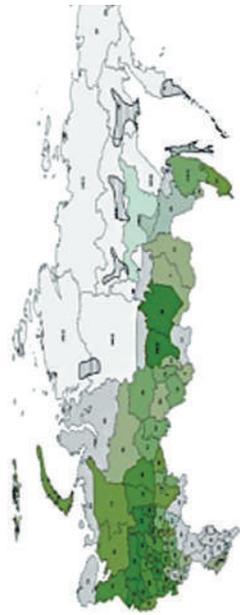


Рис. 2. Распределение ресурсов ВИЭ на территории РФ

тотип, выпущенный «Dongfang» и имеющий оснащенное 68-метровыми лопастями ветровое колесо, был установлен на промежуточном испытательном полигоне «Rudong» в Китае летом 2013 г. Прототип, выпущенный «Hyundai», был установлен на суше на острове Чеджу в Южной Корее в феврале 2014 г. «AMSC Windtec Solutions» предлагает варианты установки генератора на постоянных магнитах и асинхронного генератора двойного питания. Оба варианта выпускаются серийно.

Параметры агрегата ВЭС: номинальная мощность 5,5 МВт; диаметр ветрового колеса 140 м; трансмиссия высокоскоростная.

3. General Electric Haliade 6 MW. В конце 2016 г. агрегат ВЭС мощностью 6 МВт, спроектированный французской компанией «Alstom», был запущен в эксплуатацию у восточного побережья США в рамках коммерческого проекта «Block Island» [16]. Данная модель использована в трех из четырех проектов первого французского тендера по ВЭС. Кроме того, модель GE Haliade 6 MW была выбрана для проекта ВЭС «Mercur» в Северном море на германском шельфе.

Параметры агрегата ВЭС: номинальная мощность — 6 МВт; диаметр ветроколеса — 151 м; трансмиссия — прямоприводная.

4. Sinovel SL6000. Несколько лет назад компания «Sinovel» представила ветроэлектрическую установку мощностью 5 МВт. Через некоторое время мощность была увеличена до 6 МВт, однако данная модель на сегодняшний день нашла использование лишь в одном коммерческом проекте — демонстрационной ВЭС «Shanghai Lingang», принадлежащей компании «Huaneng Renewables».

Прототип шестимегаваттного ветроагрегата имел такой же 128-метровый диаметр ветрового колеса, что и ранняя пятимегаваттная модификация, но на данный момент компания «Sinovel» предлагает ветроэлектрическую установку с диаметром ветрового колеса 155 м [17]. Компания «Sinovel» приступила к разработке ветроустановки мощностью 10 МВт, прототип которой ожидался в конце 2016 г. Однако компания сократила финансирование, и будущее проекта на данный момент неясно.

Параметры агрегата ВЭС: номинальная мощность 6 МВт; диаметр ветроколеса 128/155 м; трансмиссия высокоскоростная.

5. Senvion 6.2M152. Агрегат мощностью 5 МВт, выпущенный в 2004 г. под брендом «Repower» компанией «Senvion», приобретенной индийским производителем ветроэнергетического оборудования «Suzlon Energy Ltd», продолжает совершенствоваться. Номинальная мощность агрегата Senvion 6.2M152 была увеличена до 6,15 МВт; новый вариант агрегата — с диаметром ветрового колеса 152 м вместо 126 м в предыдущей модификации — был установлен в качестве прототипа в декабре 2014 г. По словам произво-

дителя, большая длина лопасти обеспечивает 20 % прирост мощности при скорости ветра 9,5 м/с, в то время как другие модификации обеспечивают увеличение срока службы установки с 20 до 25 лет.

«Senvion» является первым производителем, презентовавшим агрегат ветроэлектрической установки мощностью более 5 МВт, однако финансовые трудности материнской компании «Suzlon» не позволяли интенсифицировать развитие агрегата. В июле 2021 г. компания «Alfanar» из Саудовской Аравии приобрела производителя ветряных агрегатов «Senvion». Амит Кансал, генеральный директор и управляющий директор «Senvion», сказал: «Senvion является полностью действующим OEM-производителем ветроэнергетики в Индии. Теперь, с «Alfanar», мы уверены, что сможем расширить масштабы деятельности для достижения амбициозных целей правительства Индии в отношении возобновляемых источников энергии» [18].

Параметры агрегата ВЭС: номинальная мощность 6,15 МВт; диаметр ветроколеса — 126/152 м; трансмиссия планетарная.

6. Enercon E-126 7.5 MW. Модель Enercon E-126 разработана на базе шестимегаваттного агрегата ВЭС, представленного в 2007 г. Размер и стоимость этой модели с прямым приводом значительно ограничивают ее использование, но в настоящее время в эксплуатации находятся 87 агрегатов мощностью 6 и 7,5 МВт, в том числе 38 агрегатов установлены на площадке ВЭС «Noordoostpolder» в Нидерландах.

Готовый модульный агрегат ВЭС состоит из 35 сужающихся бетонных колец диаметром от 14,5 до 4,1 м и стального подшипника с рысканием. Данная башня позволяет агрегату ВЭС достичь высоты ступицы 135 м и высоты конца лопасти 198,5 м. [19]. Сегментированные стальные композитные лопасти имеют небольшую для имеющихся масштабов агрегатов ВЭС длину — диаметр ветрового колеса составляет всего 127 м. Хотя существовали проекты установки предшествующей модели E-112 на шельфе, но разработка сегментированных лопастей для E-126 значительно облегчила береговую транспортную и монтажную логистику.

Параметры агрегата ВЭС: номинальная мощность 7,58 МВт; диаметр ветроколеса 127 м; трансмиссия прямоприводная.

7. Siemens-Gamesa Renewable Energy SWT-8.0-154. Агрегат ВЭС мощностью 6 МВт с диаметром ветрового колеса 120 м впервые был представлен в 2011 г. Эксплуатация модели началась в 2015 г. с пуском ВЭС «Westermost Rough», принадлежащей компании «Dong». Данный агрегат с прямым приводом был дважды модернизирован фирмой «Siemens» с увеличением мощности до 8 МВт и диаметра ветрового колеса до 154 м. Модификация рассматривалась для нескольких крупных проектов, в том числе для проекта ВЭС «Hornsea» у восточного побережья Англии. Кроме

того, модель в данной модификации была заказана для восточной части ВЭС «Walney».

Параметры агрегата ВЭС: номинальная мощность 8 МВт; диаметр ветроколеса 154 м; трансмиссия прямоточная.

8. Adwen AD 8-180. Партнеры «Gamesa» и «Areva» по совместному предприятию, о которых говорилось ранее, смогли использовать накопленный опыт разработки агрегатов ВЭС. Multibrid M5000-116, разработанная компанией «Areva» и в данный момент переименованная в Adwen AD-5-116, установлена на трех германских ВЭС, включая проект «Global Tech 1» в Северном море. Пятимегаваттная модель агрегата ВЭС от «Gamesa» так и не смогла продвинуться дальше прототипа, установленного на берегу острова Гран-Канария. Тем не менее модель ВЭС мощностью 8 МВт была выбрана для трех из шести французских проектов ВЭС. В настоящее время «Adwen» является частью производителя «Siemens-Gamesa Renewable Energy», так что будущее восьмимегаваттной модели за пределами уже намеченных проектов остается неясным.

Параметры агрегата ВЭС: номинальная мощность 8 МВт; диаметр ветроколеса 180 м; трансмиссия планетарная.

9. MHI Vestas V164-10 MW. Первоначально модель была анонсирована «Vestas» в сентябре 2018 г. на «Global Wind Summit». Развитие проекта V164 совпало со сложным периодом в истории датской компании, отмеченным крупными финансовыми потерями, крупными сокращениями штатов и сменой руководства. Объединение же с «Mitsubishi Heavy Industries» сыграло решающую роль в продолжении разработки и реализации проекта V164.



Рис. 1. Агрегат ВЭС Vestas V164-10 MW

В основном лопасти, имеющие длину 80 м и вес 33 т, производят на предприятиях компании «Isle of Wight» в Великобритании. Повышение производительности было достигнуто за счет небольшого изменения конструкции для улучшения воздушного потока и улучшения охлаждения преобразователя уже известного и проверенного агрегата «Vestas» V164-9.5 MW. В декабре 2021 г. агрегат впервые установили на ВЭС «Seagreen» в Шотландии (рис. 1) [20]. Параметры агрегата ВЭС: номинальная мощность 10 МВт; диаметр ветроколеса 164 м; трансмиссия планетарная.

10. Siemens-Gamesa SG 11.0-200 DD. Компания «Siemens-Gamesa» постоянно разрабатывает и внедряет новые технологии для агрегатов ВЭС. В данной модели появилась система High Wind Ride Through (HWRT) — это прорыв в стабилизации работы генератора. Когда скорость ветра превышает 25 м/с, ветряные турбины обычно отключаются в целях самозащиты. Вместо этого агрегаты, оснащенные системой HWRT, будут постепенно снижать выходную мощность, обеспечивая более плавное снижение производительности генератора и, следовательно, более надежную систему электроснабжения.

Разработка технологии IntegralBlade позволяет отливать каждую лопасть агрегата ВЭС из эпоксидной смолы, армированной стекловолокном, как единое целое. Этот процесс устраняет слабые места в клеевых соединениях и позволяет получить лопасть оптимального качества, прочности и надежности [21].

Параметры агрегата ВЭС: номинальная мощность 11 МВт; диаметр ветроколеса 200 м; трансмиссия прямоприводная.

11. MySE 12MW. 1 июня 2022 г. компания «Mingyang Smart Energy» отпраздновала ввод в эксплуатацию морской ветряной турбины с гибридным приводом MySE мощностью 12 МВт на своей производственной базе в Шаньэй (провинция Гуандун) [22]. Агрегат MySE 12 MW — это обновленная версия платформы 11 MW, которая объединяет множество инновационных технологий для эффективной и надежной работы. Во-первых, система смазки оптимизирована и используется совместно с коробкой передач и генератором. Во-вторых, технология управления шагом с двумя приводами подходит для всех видов экстремальных условий эксплуатации. В-третьих, мультисенсорная система измерения ветра обеспечивает интеллектуальное и точное управление рысканием, снижая нагрузку на агрегат и повышая выходную мощность. В-четвертых, система передачи данных с несколькими источниками поддерживает более быстрый прогноз отказа системы.

Агрегат MySE 12 MW (рис. 2) разработан, чтобы противостоять супер-тайфунам со скоростью 78,82 м/с, и применим для более чем 98 % морских районов Китая, включая провинции Фуцзянь и Гуандун, а также для зарубежных рынков, таких как Европа. Параметры агрегата ВЭС: номинальная мощность 12 МВт; диаметр ветроколеса 203 м; трансмиссия гибридные диски.



Рис. 2. Агрегат ВЭС MySE 12 MW

12. Haliade-X 14 MW. Портовый город Роттердам, находящийся в Нидерландах, недавно стал рекордсменом — там построили самый мощный морской ветрогенератор. Его назвали Haliade-X 14 MW (рис. 3). Этот агрегат ВЭС сделали на предприятии «GE Renewable Energy». На французском предприятии компании в г. Шербур завершен процесс отливки 107-метровой лопасти из композиционного материала (рис. 4). Это одна из самых больших когда-либо созданных однокомпонентных деталей. Это невероятное достижение не только для «LM Wind Power» и «GE Renewable Energy», но и для всей ветроэнергетики. Менее года назад «GE Renewable Energy» уже объявляла о собственных намерениях построить самый мощный в мире ветрогенератор и озвучивала цифру в 13 МВт, но сейчас к производительности агрегата ВЭС добавился мегаватт из-за модернизации версии ветряной турбины [23].

Сама серия агрегатов Haliade начала использоваться в ноябре 2019 г. с модели Haliade-X 12 MW. По словам Винсента Шеллингса (Технического директора «GE Renewable Energy»), когда его фирма в первый раз начала использовать прототип Haliade-X, для индустрии это был громадный шаг

вперед. Но за последние два года компания многое узнала об обслуживании и оптимизации производительности ветряков Haliade-X, что и дало возможность обновить ее до 14 МВт.

Первый коммерческий дебют агрегатов ВЭС Haliade-X мощностью 14 МВт состоится у северо-восточного побережья Англии (в составе ВЭС «Wind Farm Dogger Bank C»). Совместно с «Dogger Bank A» и «Dogger Bank B» этот парк агрегатов ВЭС станет самым крупным в своей категории, когда будет достроен. Это должно произойти в 2026 г.

Параметры агрегата ВЭС: номинальная мощность 14 МВт; диаметр ветроколеса 220 м; трансмиссия прямоточная.



Рис. 3. Агрегат ВЭС Haliade-X 14 MW



Рис. 4. Крупнейшая в мире лопасть ветроустановки — первая, превзошедшая длину 100 м

Перспективные агрегаты. В докладе мы представили самые крупные агрегаты ВЭС, существующие на данный момент в мире. Но уже сегодня ведущие компании по разработке и строительству агрегатов ВЭС анонсируют проекты с более мощными генераторами электроэнергии.

В феврале 2021 г. компания «Vestas» представила новый проект агрегата V236-15.0 MW с генерирующей мощностью 15 МВт [24]. Работа по разработке прототипа V236-15.0 MW идет, как и планировалось, на научно-исследовательских и производственных площадках «Vestas». Прототип V236-15.0 MW будет установлен во второй половине 2022 г. в Национальном испытательном центре больших ветряных турбин «Østerild» в Западной Ютландии (Дания). В течение начального периода эксплуатации «Vestas» соберет данные, необходимые для получения сертификата, что является ключевым шагом на пути к серийному производству турбины в 2024 г. Заявленные параметры агрегата ВЭС: номинальная мощность 15 МВт; диаметр ветроколеса 236 м; трансмиссия среднескоростная.

10 октября 2022 г. прототип агрегата ВЭС «Siemens Gamesa» 14-222 DD, по данным испанско-немецкого гиганта ветроэнергетики, установил мировой рекорд по наибольшей выходной мощности одной ветряной турбины за 24-часовой период: 359 МВт·ч [25]. Огромная ветряная турбина «Siemens Gamesa» достигла этого рубежа по выходной мощности всего через 10 месяцев после того, как произвела первую электроэнергию и передала ее в сеть в испытательном центре в «Østerild» в Западной Ютландии (Дания).

SG 14-222 DD — это морской агрегат ВЭС мощностью 14 МВт и максимальной мощностью до 15 МВт с функцией «Power Boost» (рис. 5). Он оснащен ротором диаметром 222 м, лопастями длиной 108 м.



Рис. 5. Агрегат ВЭС SG 14-222 DD

«Siemens Gamesa» пишет: «За счет увеличения диаметра ротора до 222 м с лопастями длиной 108 м SG 14-222 DD обеспечивает более чем 25 % годового прироста производства энергии по сравнению с его предшественником. С каждым новым поколением наших морских турбин с прямым приводом, в которых используется меньше движущихся частей, чем в турбинах с редуктором, усовершенствование компонентов обеспечивает более высокую производительность при сохранении надежности. Серийное производство запланировано на 2024 г.».

В июне «Siemens Gamesa» получила заказ на 60 морских агрегатов SG 14-222 DD, которые будут установлены на ВЭС «Moray West» мощностью 882 МВт в Шотландии. Это будет первая установка данной модели. Параметры агрегата ВЭС: номинальная мощность 14 МВт; диаметр ветроколеса 222 м; трансмиссия прямоприводная.

В августе 2021 г. компания «Mingyang Smart Energy» анонсировала амбициозный проект MySE 16.0-242 с генерирующей мощностью агрегата ВЭС 16 МВт (рис. 6) [26].

С запуском проекта MySE 16.0-242 компания «MingYang» установила новый эталон технологий и масштабов агрегатов ВЭС. Компания планирует создать и установить прототип агрегата ВЭС в первой половине 2023 г. и наладить коммерческое производство в первой половине 2024 г. Заявленные параметры агрегата ВЭС: номинальная мощность 16 МВт; диаметр ветроколеса 242 м; трансмиссия планетарная.



Рис. 6. Планируемый агрегат ВЭС MySE 16.0-242

Выводы. Наличие множества негативных факторов в существующих зонах децентрализованного электроснабжения требует решения актуальных вопросов развития и совершенствования ДЗ. Решение проблемы де-

централизованного потребителя требует проведения ресурсных, технико-экономических, экологических и других исследований целесообразности и масштабов внедрения ВИЭ в систему электроснабжения. Правильное решение об использовании того или иного вида ВИЭ может повлиять на сокращение затрат покупки дизельного топлива, дотационные расходы по северным тарифам на электроэнергию, на периодическую реновацию устаревшего дизельного оборудования, а также обеспечить устойчивое электроснабжение населения и производств в децентрализованных зонах.

Проведенный анализ показывает, что мировая практика использования крупных агрегатов ВЭС имеет положительный технико-экономический результат. Безусловно необходимо учитывать, что мощность агрегатов ВЭС нельзя рассматривать как нечто постоянное и неизменное. Она целиком зависит от скорости и направления ветра, который существует по своим законам. Поэтому общая выработка энергии меньше, чем максимальные значения, полученные для определения возможностей агрегатов ВЭС. И тем не менее ветроэлектростанции, состоящие из нескольких крупных агрегатов, объединенных в единую систему, способны обеспечивать электроэнергией потребителей в масштабах достаточно большого района.

Литература

1. **Суржикова О.А.** Региональные энергетические программы и электроснабжение удаленных, малонаселенных поселений // Инженерные науки. 2014. № 4 (14). С. 85—89.
2. **Применение ВИЭ в России: от оптового рынка до электроснабжения изолированных территорий.** [Электронный ресурс] // Российская энергетическая неделя. URL: <https://roscongress.org/sessions/rew-2018-primenenie-vie-v-rossii-ot-optovogo-rynka-do-energostonabzheniya-izolirovannykh-territoriy/discussion>. (Дата обращения: 03.09.2022).
3. **Марченко О.В., Соломин С.В.** Комплексное использование возобновляемых источников энергии разных типов для совместного производства электричества и тепла // Промышленная энергетика. 2018. № 5. С. 52—57.
4. **Лепешкин А.Р., Качанов А.Н.** Перспективы развития возобновляемой энергетики для повышения эффективности и надежности децентрализованного электроснабжения в России // Энерго- и ресурсосбережение — XXI век.: Сборник материалов VIII международной научно-практической конференции. Орел: Издательский дом «Орлик и К», 2011. С. 29—32.
5. **Лепешкин А.Р., Качанов А.Н.** Применение микроГЭС различных конструкций для повышения эффективности электроснабжения малых потребителей // Энерго- и ресурсосбережение — XXI век.: Сборник материалов VIII международной научно-практической конференции. Орел: Издательский дом «Орлик и К», 2011. С. 54—57.

6. **Захаров Ю.Ю., Лепешкин А.Р.** Исследование систем электропередачи для удаленных потребителей малой мощности от микрогидроэлектростанций // Фёдоровские чтения — 2021: LI международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2021. С. 299—305.
7. **Захаров Ю.Ю., Лепешкин А.Р.** Исследование распределений тока повышенной частоты при различной конфигурации проводников линии передачи // Промышленная энергетика. 2022. № 9. С. 2—11.
8. **Захаров Ю.Ю., Лепешкин А.Р.** Анализ конструкций микро-гидроэлектростанций для электроснабжения потребителей малой мощности // Энерго- и ресурсосбережение — XXI век: Материалы XIX международной научно-практической конференции. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2021. С. 16—18.
9. **Zakharov Y.Y., Lepeshkin A.R.** Method of calculation of water-diverting structures of low-head hydroelectric power plant for power supply of small power consumers // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 1211. 012012. 2022.
10. **Simulation** of Heating of Rotating Discs in an Electromagnetic Field Using Permanent Magnets / A.R. Lepeshkin, A.B. Kuvaldin, M.A. Fedin et al. // Bulletin of the Russian Academy of sciences: Physics. 2021. V. 85. No 11. P. 1195—1197.
11. **Studying** the EMF in Rotating Disks in the Electromagnetic Field of Permanent Magnets / A.R. Lepeshkin, A.B. Kuvaldin, Y.Y. Zakharov et al. // Bulletin of the Russian Academy of sciences: Physics. 2022. V. 86. No 9. P. 1050—1053.
12. **Kuvaldin A., Lepeshkin S., Lepeshkin A.** Modelling of heating of rotating disks in electromagnetic field using special inductors // 2014 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2014 — Proceedings. 2014.
13. **Kuvaldin A.B., Lepeshkin S.A., Lepeshkin A.R.** Dual-frequency Power Supply System and Inductors for Heating of Rotating Disks in an Electromagnetic Field // Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved). 2014. V. 59. No 3. P. 279—290.
14. **Исследование** нагрева вращающихся дисков турбин в электромагнитном поле, созданном с использованием специальных индукторов и сильных постоянных магнитов / А.Р. Лепешкин, А.Б. Кувалдин, О.И. Ильинская, С.А. Лепешкин // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2020. № 2. С. 112—122.
15. **Adwen** agrees German restructuring with workers' bodies: [Электронный ресурс] // ReCharge. URL: <https://www.rechargenews.com/wind/adwen-agrees-german-restructuring-with-workers-bodies/2-1-443808>. (Дата обращения: 12.09.2022).
16. **Alstom Haliade 150** — 6.00 MW — Wind turbine. [Электронный ресурс] // Bauer, Lucas. URL: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/139-alstom-haliade-150>. (Дата обращения: 05.08.2022).
17. **SL6000** series wind turbine. [Электронный ресурс] // Sinovel. URL: <http://www.sinovel.com/english/content/?109.html>. (Дата обращения: 10.08.2022).
18. **Saudi** firm Alfanar acquires wind turbine maker Servion India. [Электронный ресурс] // The Economic Times. 8 July 2021. URL: <https://economictimes.indiatimes.com/industry/renewables/saudi-firm-alfanar-acquires-wind-turbine-maker-servion-india/articleshow/84234894.cms?from=mdr>. (Дата обращения: 02.09.2022).

19. **ENERCON-126**. [Электронный ресурс] // Enercon. URL: <https://www.enercon.de/en/products/ep-8/e-126>. (Дата обращения: 30.08.2022).
20. **Europe's First 10 MW Wind Turbine Stands Offshore Scotland**. [Электронный ресурс] // Offshore Wind. 8 December 2021. URL: <https://www.offshorewind.biz/2021/12/08/europes-first-10-mw-wind-turbine-stands-offshore-scotland>. (Дата обращения: 03.09.2022).
21. **Wind turbine SG 11.0-200 DD**. [Электронный ресурс] // Siemens-Gamesa. URL: <https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/offshore/wind-turbine-sg-11-0-200-dd>. (Дата обращения: 09.09.2022).
22. **MySe 12MW typhoon-resistant hybrid drive offshore wind turbine rolled off the production line**. [Электронный ресурс] // Energyfacts. URL: <https://www.energyfacts.eu/myse-12mw-typhoon-resistant-hybrid-drive-offshore-wind-turbine-rolled-off-the-production-line>. (Дата обращения: 04.09.2022).
23. **GE Renewable Energy's Haliade-X prototype starts operating at 14 MW**. [Электронный ресурс] // General Electric. URL: <https://www.ge.com/news/press-releases/ge-renewable-energy-haliade-x-prototype-starts-operating-at-14-mw>. (Дата обращения: 05.09.2022).
24. **Follow the journey V236-15.0 MW Prototype**. [Электронный ресурс] // Vestas. URL: <https://www.vestas.com/en/products/offshore/V236-15MW/prototype>. (Дата обращения: 06.09.2022).
25. **A turbine prototype just broke a 24-hour wind power world record**. [Электронный ресурс] // Electrek. URL: <https://electrek.co/2022/10/10/wind-turbine-24-hour-power-world-record>. (Дата обращения: 11.10.2022).
26. **Leading innovation: MingYang Smart Energy launches MySE 16.0-242, the world's largest offshore Hybrid Drive wind turbine**. [Электронный ресурс] // MINGYANG SMART ENERGY. URL: <http://www.myse.com.cn/en/jtxw/info.aspx?itemid=825>. (Дата обращения: 07.09.2022).

*В.Д. Костюков, kostyukovvlad@yandex.ru,
СамГТУ, г. Самара*

КРАТКОСРОЧНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЗАГРУЗКИ ЭНЕРГОБЛОКОВ ТЭС С УЧЕТОМ ГЕНЕРАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В СИСТЕМЕ

Одной из фундаментальных отраслей энергетики является электроэнергетика, характеризующаяся быстротечностью протекающих переходных явлений, значительной протяженностью магистральных и распределительных электросетей, применением технологически сложного оборудования и автоматики, а также потреблением топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) для выработки электрической энергии (ЭЭ) и тепла [1].

Развитие отраслей экономики страны обуславливает постоянный поиск решений по электроснабжению вновь введенных потребителей, повышению надежности систем электроснабжения и эффективному использованию ТЭР [1].

За 2021 г. электростанциями ЕЭС России было сгенерировано 1 114 548,0 млн кВт·ч (что на 6,4 % больше, чем в 2020 г., когда объем генерации составил 1 047 029,9 млн кВт·ч). Ввиду роста потребительских нагрузок [2] повысилась генерация электроэнергии: ТЭС — на 9,1 %; ГЭС — на 1,0 %; АЭС — на 3,0 %; ВЭС — на 161,7 %; СЭС — на 13,7 %. На рис. 1 представлена доля выработки ЭЭ каждым типом электростанций от общей выработки по стране.

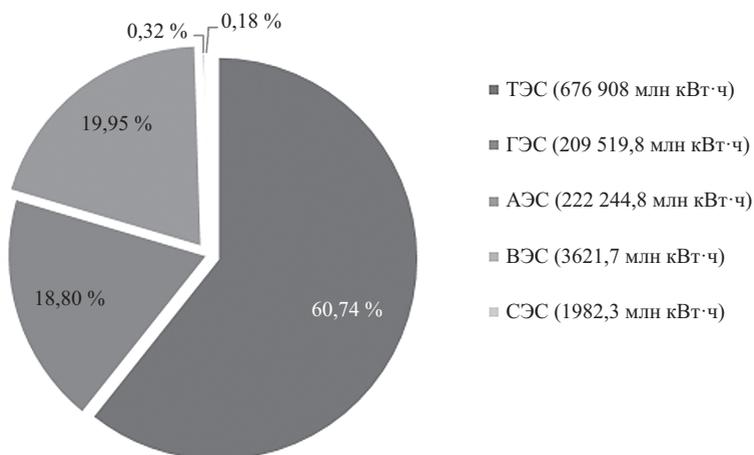


Рис. 1. Выработка электроэнергии электростанциями ЕЭС РФ в 2021 г.

Принимая во внимание изложенное, было принято решение рассматривать планирование загрузки традиционных генерирующих мощностей на примере тепловых электростанций (ТЭС). ТЭС — ключевой производитель ЭЭ в стране. Возможна их разгрузка путем введения дополнительных мощностей (за счет увеличения установленных мощностей солнечных и ветровых ЭС) [3], что позволит снизить потребление ТЭР и благоприятно скажется на экологической обстановке. Наличие в системе дополнительного резерва активной мощности окажет стимулирующее действие на развитие отраслей народного хозяйства и экономики страны.

Разработан алгоритм краткосрочного планирования энергоблоков ТЭС с учетом генерации солнечных электростанций в системе. Планирование

загрузки генерирующих агрегатов электростанций — открытая оптимизационная задача, результатом решения которой является минимальное потребление топлива (за счет оптимального распределения потребительских нагрузок между работающими агрегатами электростанций, а также их отключения/включения в зависимости от той или иной величины нагрузки) [4, 5]. Ключевым параметром управления является активная мощность, изменяемая в зависимости от состава включенных агрегатов электростанций (исходя из потребительских нагрузок).

Данная задача относится к перечню важнейших задач энергетики, решаемых при краткосрочном планировании развития и загрузки генерации любой электроэнергетической системы (ЭЭС) [5]. Ее трудоемкость обусловлена разнообразием технико-экономических, режимных и технологических характеристик отдельных элементов энергетических систем, протяженностью линий электропередачи (ЛЭП) и масштабами ЭЭС РФ, влиянием энергетики на развитие отраслей народного хозяйства, экономики и страны в целом.

В настоящее время ежедневные расчеты выполняются для оптимизации распределения активных нагрузок. Режим по реактивной мощности и напряжению рассчитывается чаще всего только для характерных условий (месяц, квартал). Полученные рекомендации используются диспетчерским персоналом для ведения режима электрической сети, регулирования напряжения, коэффициентов трансформации и др.

При планировании загрузки агрегатов электростанций возникают три ключевые проблемы [4, 5]:

- формирование критерия оптимальности;
- адекватное представление объекта или процесса (формализация расчетного алгоритма);
- реализация расчетного алгоритма.

Первая проблема решается путем определения целевой функции, ее характера (min или max), переменных величин (при изменении которых будет меняться целевая функция), нахождением вспомогательных значений и введением ограничений.

При решении второй проблемы необходим расчет расхода топлива, учет минимальной/максимальной нагрузок энергоблоков, пусковых расходов и времени запуска; определение зависимости КПД агрегата от мощности, подключенной к нему нагрузки; учет технологических особенностей и маневренности (все перечисленное закладывается в основу расчетного алгоритма).

Трудности при решении третьей проблемы возникают в процессе программной реализации разработанного расчетного алгоритма (связаны с

уровнем знаний пользователя в сфере программирования, необходимостью введения допущений и поправочных коэффициентов, невнимательностью при написании программного кода, адекватностью выводимых результатов, а также возможностью дальнейшего применения разработанной программы к планированию загрузки различных энергоблоков).

При планировании загрузки конкретно рассматриваемой ТЭС необходимо:

1) составить расчетные выражения, описывающие расход топлива для каждого агрегата электростанции в зависимости от мощности, подключенной к нему потребительской нагрузки;

2) знать минимально допустимую мощность загрузки энергоблоков, мощность всей электростанции (находится как сумма номинальных мощностей всех генерирующих электроустановок), минимально/максимально возможную величину потребительской нагрузки;

3) учитывать технологические требования конкретной электростанции (например, состав агрегатов, которые должны быть всегда в работе/резерве, или выводимые в ремонт ЭУ);

4) соблюдать условие надежности электроснабжения (регулирующего диапазона находящихся в работе генерирующих электроустановок должно быть достаточно для покрытия нагрузки в случае внезапного выхода из работы любого из включенных агрегатов; отказ агрегата может произойти в любой момент);

5) принимая во внимание п. 4, рассмотреть все возможные варианты компоновки работающих агрегатов с учетом вероятности их выхода из строя (при этом для каждого случая определять мощность всей энергосистемы);

6) на основании систематизации полученных вариантов выделить первичную компоновку работающих агрегатов при определенных диапазонах изменения потребительской нагрузки;

7) рассчитать распределение нагрузок между работающими агрегатами для каждого значения из выделенного диапазона, по результатам расчета сформировать сводные ведомости (расчет можно выполнить, например, с помощью базовой надстройки МО Excel «Поиск решения»);

8) на основании полученных результатов выбрать окончательный состав работающих агрегатов в зависимости от величины мощности нагрузки (сравнить между собой анализируемые комбинации работающих установок при определенных диапазонах мощности нагрузки; критерий выбора — минимальное потребление топлива);

9) систематизировать полученные данные, сформировать первичную ведомость планирования загрузки;

10) скорректировать первичную ведомость, сформировать итоговую.

Таким образом, блок-схема универсального расчетного алгоритма для планирования загрузки ТЭС любой мощности и состава агрегатов будет иметь вид, представленный на рис. 2.

Алгоритм реализован в МО Excel. Принцип действия следующий:

1. При вводе пользователем мощности нагрузки потребителей автоматически определяется, к какому диапазону принадлежит это значение: $P_1 \dots P_2, \dots, P_{n-1} \dots P_n$.

2. Для каждого из представленных диапазонов мощностей заранее определяется состав работающих энергоблоков (по условиям надежности электроснабжения потребителей) и находится оптимальная загрузка каждого из них.

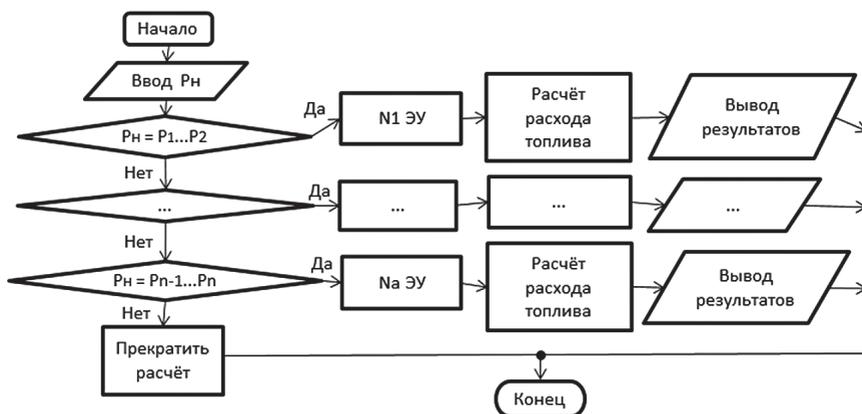


Рис. 2. Блок-схема универсального расчетного алгоритма для планирования загрузки ТЭС

3. Определив принадлежность значения нагрузки потребителей к тому или иному диапазону, МО Excel автоматически «загружает» требуемые ЭУ ($N_1 \dots N_a$; $a = 1, 2, \dots$), находит потребление топлива каждой из них и режим работы (проставляется только буква P; алгоритм не учитывает пуски и отключения агрегатов; определяет только работающий состав энергоблоков в зависимости от графика нагрузки). Если указанное значение нагрузки не принадлежит ни к одному из интервалов, расчет не производится.

4. Далее полученная первичная сводная ведомость посуточно корректируется пользователем, после чего отредактированная таблица является итоговым результатом.

Планирование загрузки ТЭС при наличии в системе мощного солнечного энергопарка усложняется, так как СЭС являются дублированной

мощностью объединенной энергосистемы (работают по критерию максимальной выработки ЭЭ с целью получения максимальной экономии органического топлива) [6]. СЭС в этом случае никак не влияют на надежность работы всей объединенной энергосистемы (ОЭС).

Количество выработанной ЭЭ на СЭС — величина непостоянная и зависит от множества факторов, которые необходимо учитывать при проведении расчетов. Ключевыми из них являются [6]:

- погодные условия;
- климат;
- время года;
- характеристики солнечных модулей (габариты; установленная мощность; КПД и др.);
- оптимальный угол наклона солнечных панелей относительно поверхности земли;
- интенсивность потока солнечного излучения на 1 м^2 приемной площадки, Вт/м^2 ;
- продолжительность солнечного сияния в регионе (ч/год);
- долгота дня (зависит от времени года);
- время восхода и захода солнца.

Таким образом, при наличии СЭС в ЭЭС алгоритм планирования загрузки агрегатов ТЭС, будет следующим.

1. Распределение загрузки между энергоблоками без учета генерации СЭС (расчеты проводятся по методике, представленной на рис. 2), полученные результаты заносятся в сводную ведомость.

2. Проведение гелиоэнергетического расчета (определение почасовой выработки ЭЭ солнечной электростанцией за рассматриваемые сутки с учетом всех вышеперечисленных параметров и метеорологических данных).

3. Перераспределение нагрузки потребителей на промежутке времени, соответствующем долготе дня (разность между восходом и заходом солнца) с учетом почасовой генерации СЭС в данном диапазоне. Ввиду подключения к СЭС нагрузки, соответствующей мощности ее генерации за определенный час, изменится и загрузка работающих агрегатов ТЭС. СЭС при работе не потребляет топлива; целевая функция складывается только из суммарного потребления работающих электроустановок ТЭС. Новое перераспределение потребительской нагрузки позволит минимизировать суточный расход топлива (за счет компенсации части пусковых расходов; агрегаты ТЭС имеют разную маневренность и время пуска, которое напрямую зависит от величины простоя; при пуске они потребляют ТЭР, но не выдают в сеть ЭЭ — это нерациональные неизбежные расходы). Чем

больше установленная мощность солнечного энергопарка, тем значительнее результат.

4. Составление итоговой ведомости планирования загрузки.

Все сказанное наглядно демонстрирует блок-схема, представленная на рис. 3.

С целью оптимизации и упрощения вычислений разработанные алгоритмы могут быть программно реализованы (посредством ПК и средств АСУ ТП) под конкретную ТЭС.

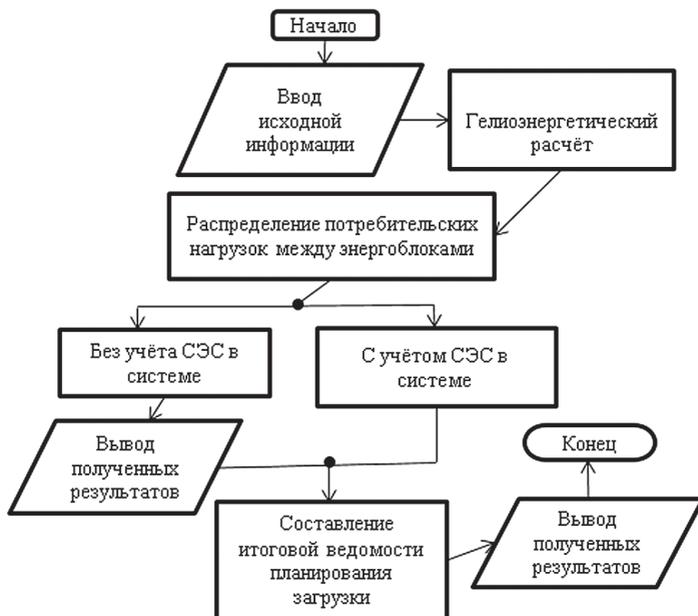


Рис. 3. Блок-схема алгоритма планирования загрузки ТЭС при наличии в системе СЭС

Литература

1. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики: Учебник. — 3-е изд. М.: КНОРУС, 2012. 352 с.
2. Системный оператор единой энергетической системы. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2021 году. [Электронный ресурс]. URL:so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2022/ups_rep2021.pdf (дата обращения: 18.06.2022).
3. Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 года. [Электронный ресурс]. URL:https://www.npkks.ru/fileadmin/f/documents/energ-strat-2035.pdf (дата обращения: 20.06.2022).

4. **Козлов А.Н., Наумов И.В.** Методы оптимизации в задачах электроэнергетики: сборник учебно-методических материалов для направления подготовки 13.06.01. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2017. 67 с.
5. **Медведева С.Н.** Оптимизация энергосистем: учебное пособие. Пенза: Пензенский государственный университет, 2005. 26 с.
6. **Солнечная энергетика: учебное пособие для вузов / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин.** М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 317 с.

*М.Р. Королёв, maxkor42@gmail.com,
Д.В. Переверзев, danupwf@gmail.com,
А.Н. Дорошин, doroshinan@yandex.ru,
НИУ «МЭИ», Москва*

ЗАРЯДНАЯ СТАНЦИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАКОПИТЕЛЕЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Использование возобновляемых источников энергии неразрывно связано с применением систем накопления энергии. Активное развитие ВИЭ во всем мире влечет за собой появление новых, более совершенных накопителей энергии. На сегодняшний день существует огромное множество различных накопителей, каждый из которых имеет свои особенности и применяется в различных отраслях [1].

Одним из перспективных видов накопителей является накопитель кинетической энергии, который сохраняет энергию в виде кинетической энергии вращающегося маховика (НЭМ). Он обладает высокими удельными энергетическими показателями, срок службы составляет 20 лет, а КПД может достигать 95 %.

Эффективно использовать маховик можно для питания потребителей, которым требуется получить большой объем энергии в короткий промежуток времени. Одним из таких потребителей является зарядная станция для электромобилей (ЭС). Использование маховика на ЭС обеспечит быструю зарядку электромобилей и большое число циклов заряда и разряда, а утилизация маховика не наносит вреда планете в отличие от электрохимических аккумуляторов.

Использование в качестве источника энергии ветроэнергетических установок (ВЭУ) сделает ЭС еще более экологичной, а также позволит устанавливать зарядные станции в местах, где подключение к энергосети

невозможно или затруднено. Кроме того, растущее число зарядных станций создает дополнительную нагрузку на энергетическую систему в виде непродолжительных скачков потребляемой мощности. Причем с развитием технологии зарядки эта нагрузка становится все более значительной. Использование ВИЭ совместно с эффективным накопителем энергии может сгладить пиковое энергопотребление.

Супермаховик — один из типов маховика, применяемый в маховичных накопителях кинетической энергии. Он способен сохранять больше кинетической энергии по сравнению с обычными маховиками и безопасен в использовании. Супермаховик изготавливается из композитных материалов, что позволяет повысить скорость вращения. Для уменьшения потерь в маховиках используются магнитные подвесы, а сам маховик помещается в вакуум. Сравнительный анализ энергетических и экономических показателей обычных маховиков и супермаховиков приведен в табл. 1. Значения мощности и энергетической емкости сопоставимы. Однако стоимость супермаховиков примерно в 4 раза выше. Безопасность при использовании маховика со стальным ротором можно обеспечить, погрузив его в землю на глубину до 5 м. Таким образом, для ЭЭС обычный маховик предпочтительнее.

Т а б л и ц а 1

Сравнение типов маховиков

Показатель	Маховик	Супермаховик
Мощность, МВт	0,1—10	0,1—10
Запас энергии, кВт·ч	1—10	1—50
Стабилизация напряжения	Хорошая	Средняя
Срок службы, лет	20	до 10
КПД, %	> 90	90
Капитальная стоимость, \$/кВт·ч	300—800	800—1200
Операционная стоимость, \$/кВт·ч	< 50	80

Важным фактором при работе маховика является его саморазряд, т.е. постепенное замедление маховика под воздействием трения. На рис. 1 представлен график саморазряда маховика НКЭ-3Г компании «Кинемак». Данный накопитель теряет энергию со 100 до 20 % в течение суток.

Для заряда и разряда КНЭ к валу маховика должна быть подключена электрическая машина, которая могла бы эффективно работать как в режиме генератора (разряд), так и в режиме двигателя (заряд) [2].

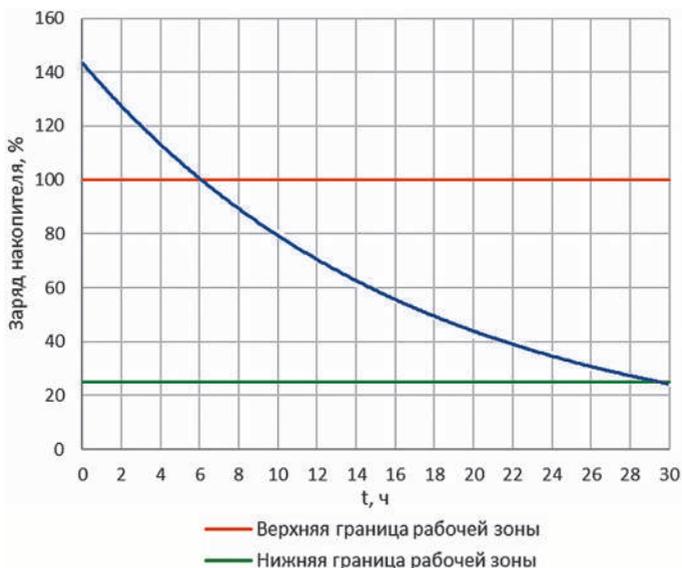


Рис. 1. График саморазряда НКЭ-3Г

Асинхронные машины применяются для маховиков большой мощности из-за их прочности, высокого крутящего момента и низкой стоимости. Недостатки: ограничения скорости, сложное управление и высокие требования к техническому обслуживанию. Совместно со стальными маховиками обычно используются именно эти электрические машины [3].

Реактивный электродвигатель имеет низкие потери на холостом ходу и широкий диапазон скоростей. С другой стороны, у него низкий коэффициент мощности и низкая удельная мощность, а также высокая пульсация крутящего момента.

Иногда используются бесщеточные машины постоянного тока. Совместно с супермаховиками чаще всего используется синхронная машина на постоянных магнитах благодаря высокой эффективности и удельной мощности [3].

Поскольку при выработке энергии маховик замедляется, частота напряжения на выходе генератора будет отлична от 50 Гц. Решить эту проблему можно с использованием силовой электроники. Выходной сигнал маховика сначала преобразовывается в постоянный ток, а затем обратно в переменный ток нужной частоты.

Регулирование ЭДС генератора осуществляется двумя способами: изменением частоты вращения или изменением магнитного потока возбуж-

дения. Для изменения потока возбуждения в цепь обмотки возбуждения включается регулировочный реостат или автоматически действующий регулятор напряжения, которые позволяют изменить ток возбуждения, поступающий в обмотку, а следовательно, и создаваемый ею поток. Регуляторы напряжения широко применяют для регулирования возбуждения генераторов, работающих при переменной частоте вращения [4].

Внедрение ВИЭ может негативно сказываться на качестве электроэнергетики. Компания Weason Power использует маховики для стабилизации изменений напряжения и частоты в сети [5].

Компания Stornetic предлагает решения для различных областей с использованием маховиков, в том числе совместно с ветроэнергетическими установками. Энергоемкость одного кинетического накопителя составляет 3,6 кВт·ч. Комплексным решением является контейнер, в котором помещены маховики совместно с системами охлаждения и контроля заряда. В различных исполнениях это позволяет получить емкости 57 и 100 кВт·ч при номинальных мощностях 1000 и 420 кВт соответственно [6]. Таким образом, более мощный накопитель имеет меньший запас энергии и наоборот.

В 2019 г. Skoda представила зарядную станцию, интегрированную с кинетическим накопителем компании Chakratec, предназначенную для стабилизации нагрузки на электросеть. Быстрая зарядка электромобилей обеспечивается системой маховиков мощностью до 350 кВт [7].

Среди российских производителей маховиков стоит выделить компанию «Кинемак» и их модель маховика НКЭ-3Г. В основном их предлагается использовать в качестве источника бесперебойного питания или для накопления рекуперированной энергии при торможении городского электротранспорта.

Отпускная цена единичного накопителя НКЭ-3Г ЭТ будет составлять (предварительно) 10,4 млн руб. Время выдачи пиковой энергии 2—4 мин. Время зарядки 2—5 мин.

О накопителе НКЭ-3Г доступна наиболее полная информация; кроме того, он выпускается на территории России, поэтому в дальнейшем будет рассмотрено применение именно этого маховика.

Маховики получают питание от ветрогенераторов. Подключение к сети необходимо для заряда маховиков при длительном отсутствии ветра, а также для поддержания минимальной частоты вращения маховиков. При снижении частоты вращения ниже критической (примерно 2000 об/мин) возможны попадание в зону резонансной частоты и, как следствие, поломка маховика.

Установка дизель-генератора исключает перерывы в питании при одновременном отсутствии ветра и отказе сети. При установке зарядных

станций, где подключение к общей сети отсутствует, дизель-генератор особенно актуален. В таблице 2 представлены основные параметры для различных типов зарядных станций [8].

Таблица 2

Параметры зарядных станций

Показатель	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Ток, А	16 AC	32 AC	63 AC	400 DC
Напряжение, В	220—240	220—240	690	600
Мощность, кВт	2—4	7—8	43	250
Время заряда, ч	12	6—8	1—5	0,5

Системы силовой электроники позволяют регулировать выходное напряжение и частоту генераторов, подключенных к маховикам. Тип заряда Mode 4 не требует установки инвертора, так как получает питание постоянным напряжением (рис. 2).

В рамках данного исследования принимается, что средняя емкость батареи электромобилей E_{cp} равняется 40 кВт·ч. Для расчета необходимого количества НЭМ рассматриваются три условия, которые должны обеспечить зарядная станция.

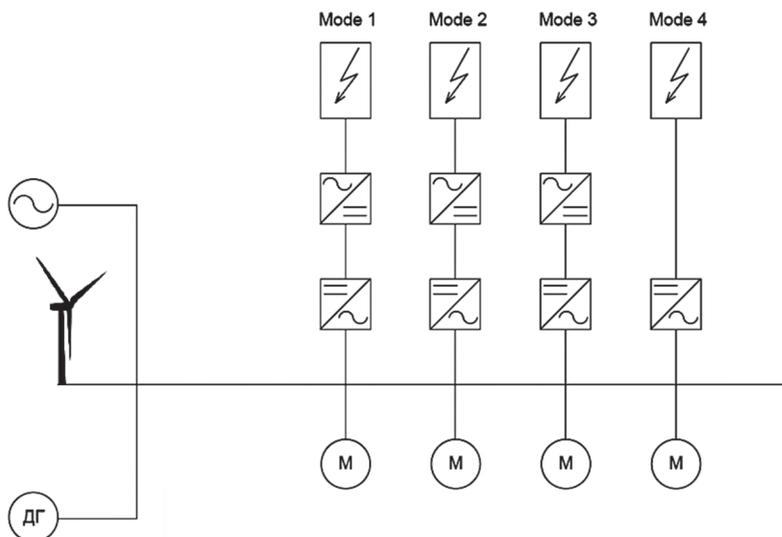


Рис. 2. Схема электрических соединений

1. Заряд 200 электромобилей в сутки. Нужно учесть, что заряд осуществляется до 80 % емкости, а электромобили в начале заряда имеют уже заполненную емкость (20 %). Таким образом, в процессе заряда необходимо восполнить 60 % емкости батареи. Тогда выдача энергии зарядной станцией в течение суток составит

$$E_{\text{сутки}} = E_{\text{ср}} \cdot 200 \cdot 0,6 = 4800 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

2. Одновременный заряд 10 электромобилей:

$$E_{10} = E_{\text{ср}} \cdot 10 \cdot 0,6 = 240 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

3. Одновременный заряд четырех электромобилей на одном типе заряда. Данное условие обуславливает требование не по энергии, а по мощности зарядной станции. Необходимо рассмотреть заряд четырех электромобилей на самом мощном типе заряда — Mode 4:

$$P_4 = P_{\text{mode 4}} \cdot 4 = 250 \cdot 4 = 1000 \text{ кВт}.$$

Определим количество маховиков. Наиболее важными являются условия 2 и 3. При выполнении условия 2, условие 1 будет также выполняться за счет быстрой скорости разряда и заряда маховиков.

Число маховиков по условию 2

$$n = \frac{E_{10}}{E_{\text{НЭМ}}} = \frac{240}{4} = 60;$$

число маховиков по условию 3

$$n = \frac{P_{\text{mode 4}}}{P_{\text{НЭМ}}} = \frac{1000}{100} = 10.$$

Установка 60 маховиков требует серьезных капиталовложений. Оптимальным решением является установка 10 маховиков, а также некоторого количества других накопителей энергии, которые смогут более эффективно хранить энергию на протяжении долгого времени.

Для каждого типа зарядной станции необходимо подобрать инвертор и выпрямитель для реализации системы контроля частоты напряжения. В рамках данной работы предполагается, что одним типом зарядной станции могут воспользоваться одновременно четыре электромобилей.

Выбор инвертора осуществляется в первую очередь по необходимой мощности с помощью интернет-ресурса «Умная энергия» [9]. Выпрямители подбираются аналогичным образом на сайте «Новые энергетические технологии» [10].

Для того, чтобы выбрать подходящее место для расположения зарядных станций, использующих энергию ветра, необходимо подобрать регион, в котором среднемноголетняя скорость ветра составляет не менее 6 м/с. Исходя из этого был выбран полуостров Крым. Для определения конкретного расположения необходимо провести анализ карты распределения среднемноголетней скорости ветра на территории Крыма [11]. Выявлено, что наиболее благоприятны ветровые условия на южном берегу полуострова.

Важным фактором является не только среднемноголетняя скорость, но и скорость ветра в наименее ветренный период года. Согласно данным интернет-ресурса «meteoblue», наименее ветренным месяцем в году является июнь. Проанализировав скорости ветра в этом месяце в различных городах, можно сделать вывод, что наиболее подходящими городами являются Судак и Феодосия [12].

В рамках данного исследования сделано допущение, что в течение всего периода времени в выбранном месте скорость ветра равна среднемноголетней — 6 м/с.

Расчет мощности ветропарка, необходимой для обеспечения накопления энергии для заряда 200 электромобилей в сутки:

$$P_{ВП} = \frac{E_{сутки}}{t} = \frac{4800}{24} = 200 \text{ кВт.}$$

Среди ветрогенераторов российского производства был выбран ветрогенератор Condor Air 60 компании Green Technology group. Он разработан для эксплуатации в регионах со средним и слабым ветром. Старт ветрогенератора мощностью 60 кВт осуществляется при скорости ветра от 2,5 м/с, а номинальная мощность обеспечивается при скорости ветра 9 м/с. Класс безопасности и климатическое исполнение соответствуют условиям выбранной местности. Стоимость составляет 3,15 млн руб. В стоимость также входит контроллер заряда и мачта [13].

При скорости ветра 6 м/с данный ветрогенератор развивает мощность $P_{ВЭУ} = 20$ кВт. Тогда количество ветрогенераторов в ветропарке

$$n = \frac{P_{ВП}}{P_{ВЭУ}} = \frac{200}{20} = 10.$$

Стоимость ветропарка составит 31,5 млн руб.

Исследована возможность использования маховичных накопителей для питания этой зарядных станций электромобилей. Рассмотрены различные существующие варианты применения маховиков, том числе аналогичный

проект компаний Chakratec и Skoda. Заряд маховиков осуществляется от ветрогенераторов.

Капитальные затраты на проект составят (млн руб.):

- маховики: 104;
- силовая электроника: 9,1;
- ветропарк: 31,5.

Общая стоимость реализации проекта: 144,6 млн. руб.

Высокая скорость саморазряда выбранных кинетических накопителей и относительная малая энергоёмкость делает неэффективным их использование в качестве накопителей энергии. Однако они могут применяться как источники большой мощности для быстрого заряда электромобилей. Быстрый заряд требует больших значений мощности и высоких токов. Возможность получить такую мощность из энергосистемы присутствует не всегда, а другие накопители энергии не смогут обеспечить необходимые токи. В целях длительного хранения энергии совместно с маховиком необходимо использовать электрохимические аккумуляторы.

Литература

1. **Kale V., Secanell M.** A comparative study between optimal metal and composite rotors for flywheel energy storage systems // *Energy Reports*. 2018. No 4. P. 576—585.
2. **Mustafa E. Amiryar** A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications // *Appl. Sci*. 2017. 7. 286; doi:10.3390/app7030286.
3. **Ефремов В.Г.** Исследование возможности и разработка способов применения накопителей энергии различного типа для противоаварийного управления при больших возмущениях в энергосистеме: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», 2018.
4. **Режимы** работы синхронного генератора и его характеристики // *Электротехника*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://electrono.ru/electricheskie-mashiny-peremennogo-toka/88-rezhimy-raboty-sinxronnogo-generatora-i-ego-xarakteristiki>.
5. **Beacon** Power brochure Flywheel Energy Storage Systems. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://beaconpower.com/wp-content/themes/beaconpower/inc/beacon_power_brochure_032514.pdf.
6. **STORNETIC** Powerful Storage System for Grid Services // 2018 STORNETIC GmbH. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://d3pcsg2wj9izr.cloudfront.net/files/92540/download/702398/1-stornetic_general_presentation.pdf
7. **CHAKRATEC BOOSTING eMOBILITY ANYWHERE**. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://chakratec.com/>
8. **Заряжаем** электромобиль — основные типы зарядных станций и разъемов зарядных устройств. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://hevcars.com.ua/reviews/zaryazhaem-elektromobil-osnovnyie-tipy-zaryadnyih-stantsiy-i-razemov/>

9. **Умная энергия** / Сетевые инверторы. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://clever-energy.ru/product-category/grid-inverters/>
10. **Новые** энергетические технологии / Выпрямители и выпрямительные системы. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://newet.ru/catalog/vypryamiteli-i-vypryamitelnye-sistemy-forpost-s-reguliruemyimi-vyhodnymi-parametrami-15-750-v/vypryamitel'naya-sistema-ips-36000-380-750v-60a-r>
11. **Гелио-Крым**. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gelio-krim.ru/vetrogenerator>
12. **Meteoblue**. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.meteoblue.com/ru/%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0/historyclimate/>
13. **Green Technology Group**. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://greentec-group.ru/catalog/vetrogenerator/vetrogenerator-condor-air/vetro-generator-60-kvt/>

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

<i>Луценко Д.В.</i> Структурно-параметрическое прогнозирование электропотребления регионального электротехнического комплекса	3
<i>Гнатюк В.И., Лепехо Д.В., Кивчун О.Р.</i> Об определении индивидуальных динамических норм электропотребления с учетом статистических особенностей отдельных объектов электротехнического комплекса	12
<i>Гнатюк В.И., Кивчун О.Р., Луценко Д.В., Жукова М.С.</i> Построение гиперпараметрической поверхности в виде трехмерного графика	21
<i>Баширов М.Г., Юсупова И.Г., Баширова Э.М.</i> Повышение информативности электромагнитно-акустических средств диагностики энергетического оборудования	27
<i>Погодина С.А., Крюков О.В., Гуляев И.В.</i> Нейронные сети мониторинга и прогнозирования технического состояния электроустановок	35
<i>Кандауров А.В.</i> Применение экспертного опроса для обоснования параметров систем электроснабжения автономных объектов	43
<i>Шеин С.А., Баширов М.Г., Юсупова И.Г.</i> Вопросы применения законодательной и нормативной базы электроснабжения	48
<i>Маханбетов К.К., Цырук С.А.</i> Разработка стратегии управления активами предприятий в сфере обслуживания и ремонта оборудования до 1000 В	55
<i>Баширова Э.М., Нуритдинов М.Р., Нуритдинова К.Р.</i> Анализ ключевых показателей ЭС 2035 В энергетической отрасли РФ	62
<i>Булатенко М.А.</i> Инструменты стратегического анализа предприятий ТЭК для идентификаций направлений обеспечения их экономической безопасности	65
<i>Ефименко А.Е., Ефимов А.Р.</i> Трансакционные издержки при проектировании и сборке низковольтных комплектных устройств	72
<i>Маслеева О.В., Голицын Ю.Д.</i> Экологическое сравнение автомобиля с ДВС и электромобиля	79

Секция 2. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ МЕТОДЫ, ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ

- Гапонова Д.А., Щербаков А.В.* Особенности построения системы управления температурным режимом при электронно-лучевом аддитивном формообразовании 86
- Кручинин А.М., Погребиский М.Я., Рязанова Е.С., Чурсин А.Ю.* Определение граничных режимов дуговых сталеплавильных печей заданного типа конструкции для повышения энергоэффективности. 93
- Крутянский М.М., Нехамин С.М.* Метод расчета параметров процесса сварки электрической дугой постоянного тока с нерасходуемым электродом 100
- Кондрашов С.С., Федин М.А., Кувалдин А.Б., Федина С.А., Чень Б.* Моделирование процесса индукционного нагрева для оплавления защитных покрытий, обеспечивающих защиту деталей механизмов от воздействия агрессивных сред, высоких температур и давлений в программном комплексе Comsol Multiphysics 117
- Немировский А.Е., Кичигина Г.А., Сергеевская И.Ю., Никифорова О.М.* Новый способ интенсификации электроосмотической сушки изоляции обмоток электродвигателей 125
- Грачева Е.И., Ибатуллин Э.Э.* Прогнозирование и анализ электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах средней мощности. 129
- Ионова Л.Г., Исаев А.С.* Выбор метода формализации зависимостей в технической системе. 137
- Ошурков М.Г.* Моделирование профиля мощности уличного освещения 145

Секция 3. РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ, ОРГАНИЗАЦИЙ И УЧРЕЖДЕНИЙ

- Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Пудовинников Р.Н.* Оценка симметричной перегрузки статора и ротора синхронного генератора при насыщении магнитной системы блочного трансформатора 154
- Бычков А.В., Федяй О.В.* Компьютерная модель устройства защиты от воздействия квазипостоянных токов на силовые трансформаторы 159
- Чистяков Д.С., Самолина О.В.* Способы снижения влияния высших гармоник на функционирование электрических сетей промышленных предприятий 161

<i>Дюдяков А.А., Янченко С.А.</i> Анализ эффективности работы гибридного фильтра в условиях ухудшенного качества электроэнергии питающей сети . . .	167
<i>Иванов А.А., Крюков О.В., Подшивалов Е.С.</i> Исследование систем электроснабжения с нелинейными нагрузками	175
<i>Назаров М.А., Хренников А.Ю.</i> Применение преобразователей частоты для снижения расхода энергии на собственные нужды подстанций	184
<i>Виноградов А.В., Лансберг А.А.</i> Определение показателей надежности реклоузеров и управляемых разъединителей	187
<i>Жигадло А.А., Немчинов Н.А., Рыжкова Е.Н.</i> Разработка алгоритма для выбора режима нейтрали промышленного объекта	195
<i>Харабурова М.Д., Рыжкова Е.Н.</i> Технические решения по повышению надежности сетей с компенсацией емкостных токов замыкания на землю	199
<i>Вагапов Г.В., Абдуллин Л.И., Нуртдинов И.Г.</i> Автоматизация распределительной сети 6—10 кВ на основе систем автоматического восстановления электроснабжения	205
<i>Литужин И.А., Сеницын Н.А.</i> Исследование устойчивости напряжения в распределительных сетях низкого и среднего напряжения	208
<i>Соколов А.П., Морцакин А.Э., Курбанов А.Р.</i> Влияние закона автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов на статическую устойчивость при выходе на раздельную работу	216
<i>Соснина Е.Н., Крюков Е.В., Гусев Д.А.</i> Интеллектуальный регулятор потока мощности для активно-адаптивной электрической сети	224
<i>Петрова Р.М., Грачева Е.И.</i> Надежность и перегрузочная способность силовых трансформаторов	233
<i>Петров А.Р., Грачева Е.И.</i> Моделирование функциональных характеристик низковольтных коммутационных аппаратов на примере автоматических выключателей	240
<i>Хорьков С.А.</i> Метрика и ультраметрика пространства сопротивлений системы электроснабжения промышленного предприятия	247
<i>Черепанов В.В., Торопова А.К.</i> Исследование электрической нагрузки главного привода лущильного станка	251
<i>Галимова А.В., Белогловский А.А.</i> Изучение взаимодействия катодонаправленных стримеров с электронными лавинами (обзор)	256

<i>Галимова А.В., Белогловский А.А., Белоусов С.В., Савельев И.О.</i> Изучение в вычислительных экспериментах электронных лавин и катодонаправленных стримеров (обзор)	260
<i>Бережнов Д.А.</i> Спектральное разложение выходных сигналов четырёхуровневого автономного инвертора	267
<i>Дубровский Б.В., Вихров М.Е.</i> Особенности электроснабжения центров обработки данных для обеспечения необходимых надёжности и качества электрической энергии	271
<i>Сычев Т.А., Титова Г.Р.</i> Особенности электроснабжения концертных залов	278
<i>Андреева Е.Г., Карев А.С.</i> Исследование влияния состава электроприемников домохозяйства на его энергопотребление	284
<i>Дарьенков А.Б., Шалухо А.В., Шувалова Ю.Н.</i> Анализ процессов деградации в мембраноэлектродном блоке топливного элемента с полимерной протонообменной мембраной	288
<i>Туйчиев З.З., Юсупов Д.Т.</i> Результаты экспериментальных исследований симметрирующего силового трансформатора	294
<i>Туйчиев З.З., Юсупов Д.Т.</i> Проведение экспериментов по снижению несимметричных напряжений	298
<i>Кулешова Г.С., Михеев Д.В.</i> Экспериментальное исследование переходных процессов при подключении к электрической сети фильтрокомпенсирующего устройства на основе гибридного индуктивно-емкостного элемента	302
<i>Камалов Д.М., Баширова Э.М.</i> Обзор отечественных контроллеров систем управления	308
<i>Гуцан В.А., Белогловский А.А., Лебедева Н.А., Бухтилова М.А.</i> Применение методов безусловной математической оптимизации к решению задач регулирования электрических полей в установках высокого напряжения: влияние формулировки задачи	311
Секция 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ. НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ	
<i>Вилявин А.Е., Зайнутдинова Л.Х., Зайнутдинов Р.А., Курьлев А.С.</i> Разработка ретробного электропривода солнечного катамарана	319

<i>Переверзев Д.В., Кабанов В.А., Сычев Н.В., Королёв М.Р.</i> Применение водородных накопителей энергии на заправочной станции для водородных и электрических автомобилей	326
<i>Дорошин А.Н., Сычев Н.В., Кабанов В.А.</i> Гибридная система автономного электроснабжения гостиничного комплекса	333
<i>Зограф Я.Е., Кривенко Т.В.</i> Оценка риска пожара на автономной гибридной солнечно-дизельной электростанции	338
<i>Плехов А.С., Крюков Е.В., Петухов Я.И.</i> Имитационная модель системы электрогенерации плавучей волновой электростанции	346
<i>Ковалёв А.А., Панченко В.А.</i> Разработка и создание системы «анаэробная биоконверсия — микробная электролизная ячейка» с использованием преобразователей солнечной энергии	352
<i>Слузов А.П., Бердников И.Е., Дарьенков А.Б.</i> Имитационное моделирование режимов работы источника бесперебойного питания	360
<i>Байбиченков А.Р., Титова Г.Р.</i> Анализ надежности систем электроснабжения с применением возобновляемых источников энергии для временных зданий и сооружений	367
<i>Бердышев И.И., Бурмейстер М.В., Ильина А.А., Булатов Р.В.</i> Выбор математического описания синхронного генератора для применения в программно-аппаратном комплексе системы виртуальной инерции	375
<i>Бердышев И.И., Бурмейстер М.В., Ильина А.А., Феднов А.Е.</i> Создание имитационной модели системы виртуальной инерции на основе связи частоты и мощности	383
<i>Захаров Ю.Ю., Лепешкин А.Р.</i> Анализ крупных агрегатов ВЭС для электроснабжения децентрализованных зон	393
<i>Костюков М.Р.</i> Краткосрочное планирование загрузки энергоблоков ТЭС с учетом генерации солнечных электростанций в системе	407
<i>Королёв М.Р., Переверзев Д.В., Дорошин А.Н.</i> Зарядная станция электромобилей с использованием накопителей кинетической энергии	414