

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

ФЁДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ 2023

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

Москва. 15 – 17 ноября 2023 г.

Москва
Издательство МЭИ
2023

УДК 620.9

ББК 31

Ф 33

Ф 33 Фёдоровские чтения – 2023: ЛП Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (с элементами научной школы для молодежи) (Москва, 15–17 ноября 2023 г.) / под общ. ред. Ю.В. Матюниной. – М.: Издательство МЭИ, 2023. – 476 с.

ISBN 978-5-7046-2925-2

Публикуются материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (с элементами научной школы для молодежи) «Фёдоровские чтения – 2023», прошедшей в Национальном исследовательском университете «МЭИ» 15–17 ноября 2023 г.

Научная тематика конференции – энергосбережение и энергоэффективность технологий передачи, распределения и потребления электрической энергии. Публикации характеризуются охватом широкого круга проблем в области энергосбережения и энергоэффективности, электроснабжения и электрооборудования, электробезопасности и использования 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 620.9

ББК 31

Издано в авторской редакции

ISBN 978-5-7046-2925-2

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1

ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

<i>Гнатюк В.И., Кивчун О.Р., Кивчун Т.О.</i> Идентификация объекта управления в техноценозе.....	10
<i>Гнатюк В.И., Кивчун О.Р., Кивчун Т.О.</i> Постановка задачи управления техноценозом.....	22
<i>Войткевич С.В.</i> Метрики для оценки эффективности центров обработки данных в электроэнергетическом комплексе России...	29
<i>Маслеева О.В., Крюков Е.В., Петухов Я.И.</i> Оценка экологичности электромобилей и автомобилей с двигателями внутреннего сгорания на всех этапах жизненного цикла.....	37
<i>Хугаев А.З.</i> Опыт применения процессного подхода к управлению в проектно-исследовательских организациях...	45
<i>Баширов М.Г., Баширова Э.М., Акчурин Д.Ш.</i> Разработка интеллектуальной системы идентификации напряженно-деформированного состояния и поврежденности металла энергетического оборудования.....	49
<i>Цырук С.А.</i> Роль учебно-методической комиссии в развитии образовательной программы «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений»	61
<i>Булатенко М.А., Демидова П.А.</i> Оценка конкурентоспособности отечественных приложений для обучения электротехнического персонала с применением технологий виртуальной и дополненной реальности.....	65

<i>Баширов М.Г., Юсупова И.Г., Акчурин Д.Ш.</i> Особенности подготовки специалистов для интеллектуальных электроэнергетических комплексов	72
<i>Васильева Ю.С., Семикашев В.В.</i> Оценка последствий вхождения Республики Коми и Архангельской области в ценовую зону оптового рынка электрической энергии и мощности (ОРЭМ).....	79
<i>Еришов М.В.</i> Направления развития энергетики предприятий химической промышленности в прогрессивном бизнес-укладе.....	88
<i>Пермяков М.А.</i> Факторы энергоэффективности многоукладных бизнес-структур.....	92

Секция 2

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ МЕТОДЫ, ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ

<i>Горшенин А.Ю., Грицай А.С., Денисова Л.А.</i> Предварительная обработка данных в задаче краткосрочного прогнозирования электропотребления.....	96
<i>Исаев А.С.</i> Прогнозирование графика электрической нагрузки в условиях нестационарности.....	104
<i>Петров А.Р., Грачева Е.И.</i> Алгоритмы и модели оценки основных технических характеристик контактных систем низковольтных электрических аппаратов.....	114
<i>Лепешкин А.Р., Федин М.А., Кувалдин А.Б., Кондрашов С.С., Сулейманов Ф.Р., Данченко А.В.</i> Исследование распределений плотности тока в двухслойной и трехслойной проводящих средах при разных режимах индукционного нагрева защитных покрытий стальных деталей с учетом оплавления покрытий и двух точек Кюри..	124

Федин М.А., Лепёшкин А.Р. Федина С.А., Василенко А.И., Дудочкин Е.Г., Кошкин Д.П., Демидов Ю.А., Чэнь Б.
Разработка и описание математической модели и программы для расчета индукционно-резистивного нагрева промышленных трубопроводов..... 133

Федин М.А., Кондрашов С.С., Василенко А.И., Зотов М.Л., Северин К.В., Кошкин Д.П., Демидов Ю.А.
Разработка метода увеличения длины обогреваемого плеча индукционно-резистивной системы нагрева с использованием градированной изоляции..... 139

Блохин А.В., Грицай А.С.
Прогнозирование потребления электроэнергии городского ресурсоснабжающего предприятия..... 144

Староверов Б.А., Хамитов Р.Н.
Создание подсистемы прогнозирования для системы коммерческого учета электроэнергии на основе ансамбля нейронных сетей..... 149

Мальши М.Е., Матюнина Ю.В.
Планирование графика базовой нагрузки при управлении спросом..... 155

Измайлов Ю.А., Кошарная Ю.В.
Управление нагрузкой предприятия как способ снижения затрат на электроэнергию..... 162

Секция 3

РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ, ОРГАНИЗАЦИЙ И УЧРЕЖДЕНИЙ

Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш., Крюков Е.В., Гусев Д.А.
Разработка физической модели распределительной электрической сети с тиристорными регуляторами напряжения и мощности..... 169

<i>Лансберг А.А., Виноградов А.В.</i> Обзор математической модели электрической сети 6–10/0,4 кВ..	175
<i>Пудовинников Р.Н., Вахнина В.В.</i> Модифицированная модель линии электропередачи.....	185
<i>Гагарин С.А.</i> Причины неправильной работы устройств релейной защиты на Ростовской АЭС. Остаточная намагниченность трансформаторов тока.....	194
<i>Стариков А.В., Костюков В.Д.</i> Анализ работоспособности электромагнитного подшипника при снижении напряжения питания и рациональном смещении центра магнитной системы.....	202
<i>Вахнина В.В., Марков Е.В.</i> Разработка программы графического определения дефектов силовых масляных трансформаторов на основе метода треугольника Дюваля.....	209
<i>Дюдяков А.А., Янченко С.А.</i> Алгоритм управления гибридным фильтром, устойчивый к искажениям напряжения сети.....	217
<i>Денисова А.Р., Семенова О.Д.</i> Исследование влияния высших гармоник напряжения и тока на электрооборудование электроэнергетических систем..	227
<i>Петрова Р.М., Грачева Е.И., Абдуллин Л.И.</i> Параметры надежности кабельных линий систем внутривзаводского электроснабжения.....	235
<i>Романов Л.Р., Крюков О.В.</i> Разработка усовершенствованных алгоритмов токовых за- щит для повышения надежности электрических сетей...	243
<i>Кронгауз Д.Э.</i> Особенности релейной и технологической защит электрооборудования.....	254

<i>Кулешова Г.С., Михеев Д.В., Кулешов А.О.</i> Алгоритм определения интегральных параметров фильтрокомпенсирующих устройств на основе индуктивно-емкостных элементов.....	262
<i>Немчинов Н.А., Михеев Д.В.</i> Моделирование резонансного токоограничивающего устройства на базе катушки-конденсатора.....	268
<i>Галимова А.В., Белогловский А.А., Белоусов С.В., Лебедева Н.А.</i> К вопросу об уточнении критерия лавинно-стримерных переходов в воздухе.....	276
<i>Бухтилова М.А., Белогловский А.А., Тимофеев Е.М., Тарасова Т.П.</i> Применение методов математической оптимизации для ограничения воздействия электрических полей на персонал объектов электроэнергетики.....	282
<i>Захаров Ю.Ю., Михеев Д.В.</i> Анализ первичных параметров воздушной коаксиальной линии при передаче электроэнергии повышенной частоты...	289
<i>Латушкина В.К., Рашевская М.А.</i> Определение оптимальных конструктивных параметров систем наружного освещения завода.....	298
<i>Сериков В.А., Сычев Ю.А., Костин В.Н.</i> Анализ несинусоидальных режимов работы типовых промышленных систем электроснабжения горно-обогачительных предприятий.....	306
<i>Balametov A.B., Abdullayeva G.K., Agakhanova K.A.</i> Regression dependencies for operational modeling of regimes OHL taking into account atmospheric factors.....	319

Секция 4
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ
В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.
НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ
ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

Кожемякин В.Е.

К оценке надежности системы генерации малой ГЭС
с учетом гидрологического режима реки..... 328

Шалухо А.В., Литужин И.А., Шувалова Ю.Н., Алексеева Р.Е.

Разработка системы управления энергоустановкой
на основе водородных топливных элементов..... 338

Подшивалов Е.С., Сергеев П.С., Крюков О.В.

Выбор основных параметров и определение логической
схемы работы гибридных накопителей электроэнергии.... 345

Хорьков С. А., Бизяев А.Д., Чукавин Ю.Б.

Разработка автоматизированного рабочего места
энергоцентра на базе ПАЭС-2500
с помощью операторных панелей..... 352

Чижов А.С., Вихров М.Е.

Трехфазный источник бесперебойного питания,
его особенности и схемы реализации..... 359

Алешин Д.А., Ульянов Д.А., Шалухо А.В.

Система активной балансировки аккумуляторных
батареи с многокоординатной передачей энергии..... 365

Сорогин А.С., Хамитов Р.Н.

Жидкостное охлаждение фотоэлектрических модулей
при эксплуатации в весенне-летнее время года..... 375

Алешин П.А., Серебряков А.В., Серебряков Н.А.

Разработка структурной схемы дизель-генераторной
установки переменной скорости вращения на основе
многообмоточного синхронного генератора..... 383

Ростовский В.В., Серебряков А.В.
Разработка алгоритмов работы и диагностирования
автономного генераторного комплекса
на базе многообмоточного синхронного генератора..... 390

Афанасьев К.М., Титова Г.Р.
Активно-адаптивные сети в применении
к системам распределенной генерации малой мощности 398

Секция 5

ОБЩАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ЦЕНОЛОГИЯ

Луценко Д.В.
Программная реализация методики
структурно-параметрического прогнозирования
ресурсопотребления организационных систем..... 404

Гнатюк В.И., Олейник В.С., Жукова М.С.
Анализ номенклатуры программного обеспечения
организационной системы..... 422

Гнатюк В.И., Олейник В.С., Жукова М.С.
Расчетно-параметрический комплекс
организационной системы..... 434

Хорьков С. А., Маврикиди Ф.И.
Причинность ценозов и систем..... 442

Гурина Р.В., Лизяева В.В.
Ценологическая самоорганизация образовательных систем.. 451

Ковалёв А.А., Шушарина Н.Н., Зайцев А.А.
Нормирование двигательной активности человека
на основе теории рангового анализа..... 460

Лепехо Д.В.
Однопараметрический цифровой двойник
организационно-технической системы по электропотреблению.... 466

ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

*В.И. Гнатюк, mail@gnatukvi.ru, О.Р. Кивчун,
oleg_kivchun@mail.ru, БФУ им. Канта, г. Калининград
Т.О. Кивчун, tkivchun@mail.ru, НИУ «МЭИ», г. Москва*

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ В ТЕХНОЦЕНОЗЕ

Объектом исследований является региональный электротехнический комплекс (РЭК), который рассматривается как ограниченная в пространстве и времени, обладающая техноценологическими свойствами взаимосвязанная совокупность потребителей электроэнергии, реализующая в единой системе управления и всестороннего обеспечения цель оптимального управления электропотреблением. Он выступает в качестве подсистемы вышестоящей организационно-технической системы (ОТС) – регионального электроэнергетического комплекса (рис. 1) [1–8].



Рис. 1. Региональный электротехнический комплекс в составе регионального электроэнергетического комплекса

С методологической точки зрения, рассматривая региональный электроэнергетический комплекс, в котором, как и в любой электрической цепи, реализуется единый процесс производства, передачи и потребления электроэнергии, мы имеем дело с двумя разными предметными областями. Первая рассматривает объект исследования как систему электроснабжения, где в качестве базовой выступает теория электрических цепей. Вторая предметная область изучает объект исследования как взаимосвязанную совокупность потребителей электроэнергии – РЭК. Научная проблема, связанная с нашим многолетним практическим воплощением закона оптимального построения техноценозов в области исследования РЭК, заключается в разработке теории оптимального управления электропотреблением, в основе которой лежит методология рангового анализа [7].

С целью теоретического обобщения в области ранговой топологии рассмотрим процедуры интервального оценивания и дифлекс-анализа, являющиеся частью статической модели электропотребления (рис. 2). Однако прежде обсудим еще один не менее важный аспект, касающийся понятий электроснабжения и электропотребления в РЭК [1, 3–10].

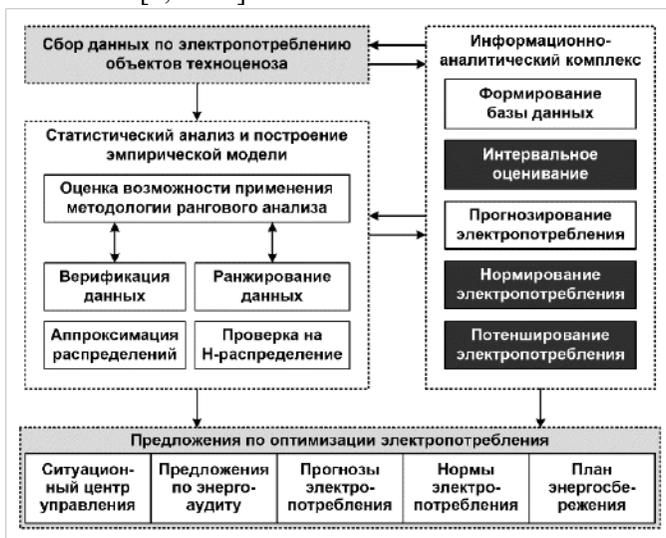


Рис. 2. Статическая модель электропотребления техноценоза

Электроснабжение – обеспечение потребителей электроэнергией в необходимом количестве и требуемого качества. Оно осуществляется с целью поддержания в точках раздела с потребителями договорных количественно-качественных показателей электроэнергии, при условии выполнения требований надежности. Очевидно, что показатели качества электроснабжения не отражают качество процесса электропотребления, под которым понимается управляемый (фиксируемый в базе данных, дифлексируемый, прогнозируемый, нормируемый и потенцируемый) процесс потребления электроэнергии приемниками и/или потребителями, осуществляемый в составе РЭК (рис. 2). Управление электропотреблением осуществляется с целью обеспечения приемников или потребителей электроэнергией в необходимом количестве и требуемого качества с максимальной экономией электроэнергии и минимизацией затрат на всестороннее обеспечение данного процесса. Таким образом, электропотребление как процесс должно описываться комплексным показателем, характеризующим как количественную, так и качественную стороны. Очевидно, что собственно электропотребление как показатель этому требованию не отвечает, так как отражает только количественную сторону процесса.

Ранее нами в рамках процедуры дифлекс-анализа (рис. 3) был предложен параметр, описывающий качество электропотребления [1, 3–10].



Рис. 3. Стандартные и тонкие процедуры в общем процедурном комплексе рангового анализа

Напомним, что дифлекс-анализ – тонкая процедура рангового анализа РЭК, осуществляемая на этапе интервального оценивания с целью разработки плана углубленных обследований «аномальных» объектов на среднесрочную перспективу (до 5–7 лет). Предполагается, что в качестве источника данных используется база данных по электропотреблению за 10–15 лет, а интервальное оценивание проводится с целью определения границ области допустимых значений. Нижняя граница области допустимых значений – гиперболическая кривая, полученная в результате аппроксимации нижних границ доверительных интервалов, рассчитанных для каждого из рангов рангового параметрического распределения.

После расчета для каждого из рангов границ доверительных интервалов осуществляется аппроксимация нижней и верхней границ области допустимых значений электропотребления РЭК (рис. 4).

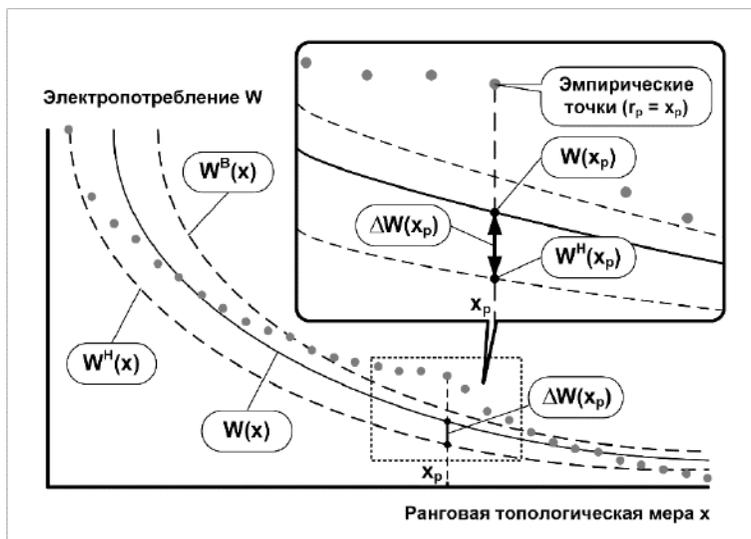


Рис. 4. К понятию топологического дифлекс-параметра РЭК (x_p – расчетное значение ранговой топологической меры)

Как мы полагаем, область допустимых значений охватывает, условно говоря, зону «физически нормального» разброса значений электропотребления для данного РЭК на данном интервале времени (с учетом возможных труднопредсказуемых колебаний значительного количества объективных факторов, влияющих на процесс электропотребления). Учитывая, что расчеты осуществляются на эмпирических данных самого РЭК, можно сделать вывод, что подобный уровень электропотребления одновременно является и достаточным для объектов (с технологической точки зрения). Если исходить из цели минимизации расходования энергетических ресурсов, то логично предположить, что нижняя граница области допустимых значений показывает уровень наилучшего электропотребления. Отклонение же от нижней границы (как в большую, так и в меньшую стороны) можно считать показателем качества процесса электропотребления, который предлагается описывать дифлекс-показателем [1, 3, 8].

Итак, дифлекс-показатель – это мера, отражающая свойство объектов РЭК (приемников и/или потребителей) осуществлять процесс электропотребления с большей или меньшей степенью энергоэффективности. Количественно он представлен ранговым дифлекс-параметром, под которым понимается измеряемое в $\text{kВт}\cdot\text{ч}$, отнесенных к временному интервалу ($\text{kВт}\cdot\text{ч}/\text{T}$), абсолютное отклонение эмпирического значения электропотребления объекта РЭК от нижней границы области допустимых значений [7] (рис. 4).

Как показано в работах [1, 8, 9], аппроксимация рангового параметрического распределения по электропотреблению позволяет перейти от частной эмпирической выборки к вероятностному распределению генеральной совокупности. Это позволяет ввести понятие ранговой топологической меры и определить топологический дифлекс-параметр. Подобное континуальное представление позволяет установить важное функциональное соответствие между

областью значений топологического дифлекс-параметра и множеством значений ранговой топологической меры (рис. 4):

$$\Delta W(x) = W(x) - W^H(x), \quad x \in [0, +\infty), \quad (1)$$

где $\Delta W(x)$ – гиперболическая зависимость топологического дифлекс-параметра от ранговой топологической меры; $W(x)$ – аппроксимационная кривая рангового распределения; $W^H(x)$ – аппроксимационная кривая нижней границы области допустимых значений техноценоза.

Остается задача полноценной характеристики процесса электропотребления одновременно как с количественной, так и с качественной точек зрения, которая в [7–9] впервые решается введением принципиально новых понятий. Первое из них – ранговая гиперпараметрическая поверхность РЭК, под которой понимается заданная в трехмерном ранговом параметрическом пространстве функция двух переменных, ставящая в однозначное соответствие множеству значений топологического дифлекс-параметра множество значений электропотребления и ранговой топологической меры. Второе – ранговое гиперпараметрическое распределение РЭК, под которым понимается заданная в трехмерном ранговом параметрическом пространстве функция трех переменных, ставящая в соответствие множеству значений дифлекс-параметра множество значений электропотребления, ранговой топологической меры, а также дифлекс-угла. Обе функции могут быть получены в результате аппроксимации:

$$\left\{ \begin{array}{l} \{ \Delta W \}_0^{+\infty} \xrightarrow{f: \Delta W \rightarrow W, X} \{ W, X \}_0^{+\infty} \xrightarrow{Approx} \Delta W(W, x); \\ \{ \Delta W \}_0^{+\infty} \xrightarrow{f: \Delta W \rightarrow W, X, A} \{ W, X, A \}_0^{+\infty} \xrightarrow{Approx} \Delta W(W, x, \alpha), \end{array} \right. \quad (2)$$

где $\{ \Delta W \}_0^{+\infty}$ – множество значений дифлекс-параметра; $\{ W, X \}_0^{+\infty}$ – множество пар значений электропотребления и ранговой топологической меры; $\{ W, X, A \}_0^{+\infty}$ – множество троек значений электропотребления, ранговой топологической меры и дифлекс-угла α ; *Approx* – обозначение процедуры аппроксимации.

Ранговая гиперпараметрическая поверхность РЭК описывается уравнением аффинной поверхности второго порядка, а ранговое гиперпараметрическое распределение – уравнением рациональной кривой второго порядка (о дифлекс-угле α будет сказано ниже) (рис. 5):

$$\begin{cases} \Delta W = f(W, x); \\ \Delta W = f(W, x, \alpha). \end{cases} \quad (3)$$

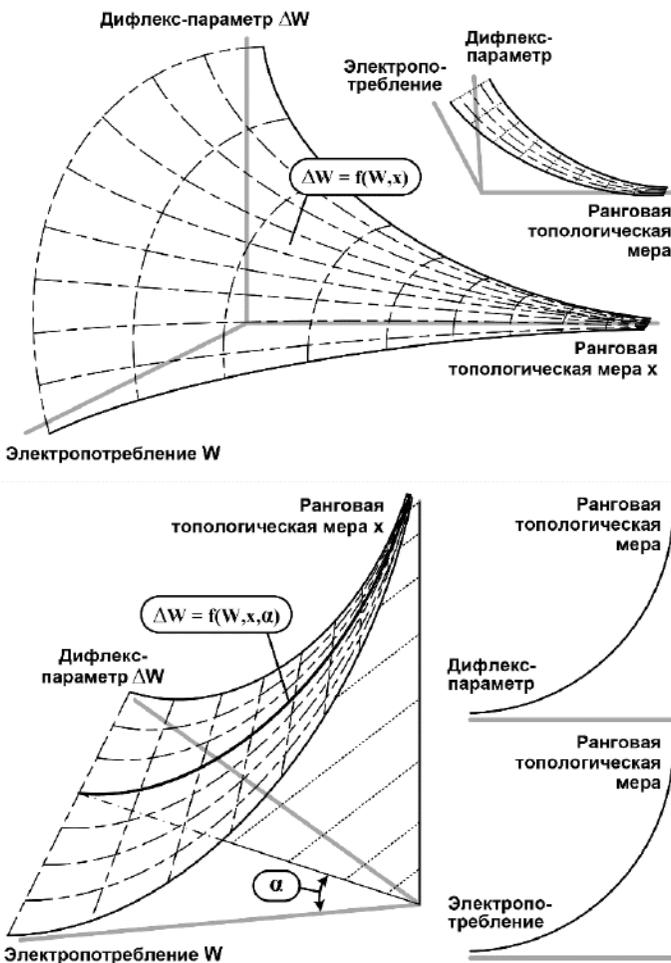


Рис. 5. Ранговые гиперпараметрические поверхность и распределение

Из рисунка видно, что мы имеем дело с гиперболическими аффинной поверхностью и кривой второго порядка. Они асимптотически приближаются, с одной стороны, к координатной оси ранговой топологической меры $\langle x \rangle$, а с другой – к координатной плоскости $\langle \Delta W \circ W \rangle$.

Ранговая гиперпараметрическая поверхность, изображенная на рис. 5 штриховыми линиями, показывает своего рода спектр теоретически возможных форм рангового гиперпараметрического распределения техноценоза, определяемых его электропотреблением за обозримый промежуток времени. Поверхность возможных форм гиперпараметрического распределения ограничена сектором положительных значений осей дифлекс-параметра, электропотребления и ранговой топологической меры. С координатными плоскостями $\langle W \circ x \rangle$ и $\langle \Delta W \circ x \rangle$ она имеет пересечения, которые являются гиперболическими кривыми первого порядка рангового параметрического распределения: в первом случае – по электропотреблению, а во втором – по дифлекс-параметру.

Кривая рангового гиперпараметрического распределения техноценоза является пересечением ранговой гиперпараметрической поверхности с секущей плоскостью, проходящей через координатную прямую $\langle x \rangle$. Континуум возможных положений секущей плоскости образует пучок в положительном секторе между координатными осями $\langle W \rangle$ и $\langle \Delta W \rangle$. Очевидно, что форма рангового гиперпараметрического распределения зависит от угла поворота секущей плоскости по отношению к координатной плоскости $\langle W \circ x \rangle$, который обозначен на рисунке как α . Именно его предлагается называть дифлекс-углом рангового гиперпараметрического распределения техноценоза [2, 8, 9].

Как представляется, положение секущей плоскости и, соответственно, угол α зависят от состояния техноценоза, а также внешних управляющих воздействий в рассматриваемый момент времени. Примечательно, что крайние («вырожденные») состояния техноценоза соответствуют следующим дифлекс-углам (в градусах): $\alpha = 0$ – состояние с нулевым дифлекс-параметром во

всем диапазоне значений электропотребления; $\alpha = 90$ – состояние с нулевым электропотреблением во всем диапазоне значений дифлекс-параметров. Состояние с $\alpha = 0$ соответствует техноценозу, все приемники и потребители которого потребляют электроэнергию на нижней границе области допустимых значений, однако его интегральное электропотребление в этом случае будет максимальным. Это состояние можно считать изначальным в общем процессе управления электропотреблением.

Состояние с $\alpha = 90$ соответствует техноценозу, интегральное электропотребление которого равно нулю, что, по сути, означает полное прекращение процесса электропотребления. Очевидно, что реальный техноценоз всегда будет соответствовать некоторому промежуточному значению дифлекс-угла, который в процессе оптимального управления электропотреблением должен последовательно увеличиваться от своего начального значения α^b до целевого α^c . При этом мы получаем состояние, своего рода, минимакса: минимальный интегральный дифлекс-параметр при максимальном значении дифлекс-угла, т.е. минимуме интегрального электропотребления техноценоза. Другими словами, именно в этом состоянии техноценоз достигает своей наивысшей энергоэффективности, что, в известном смысле, можно считать целью процесса управления электропотреблением.

Что же нам дают описанные здесь инструменты рангового анализа? Как представляется, именно ранговые гиперпараметрические поверхность и распределение позволяют корректно решить поставленную выше задачу количественно-качественного описания процесса электропотребления РЭК. Прежде всего, рассмотрим поверхностный интеграл вида:

$$\int_s \Delta W(W, x) ds, \quad (4)$$

где $\Delta W(W, x)$ – скалярная функция ранговой гиперпараметрической поверхности техноценоза по электропотреблению; ds – элемент поверхности интегрирования.

В данном случае мы имеем дело с поверхностным интегралом первого рода на скалярном поле $\{\mathfrak{R}\}$, вычисляемым по аффинной поверхности второго порядка $\Delta W(W, x)$ в трехмерном пространстве $\langle \Delta W \circ W \circ x \rangle$. Рассчитав интеграл в бесконечных пределах, получаем интегральный дифлекс-параметр техноценоза по электропотреблению ΔW_Σ , который характеризует процесс электропотребления с качественной точки зрения.

Дополним параметр (4) количественным условием, построим целевые функции, определим полную систему ограничений для всех ключевых параметров и введем комплексный критерий оценки вида [8, 9]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta W_\Sigma = \int_S \Delta W(W, x) ds \xrightarrow{[0; +\infty) \subset \{R\}} \min; \\ \alpha = \frac{\{ \alpha^b \rightarrow \alpha^e \} \equiv \left\{ \left[W_\Sigma^b = \int_0^{+\infty} W(x) dx \right] \rightarrow W_\Sigma^e \right\}}{\{ \alpha^b \rightarrow \alpha^e \}} \rightarrow \max; \\ \Delta W \geq 0; W \geq 0; x \geq 0; W_\Sigma^b \geq W_\Sigma^e; \\ 0 \leq \alpha \leq 90^\circ, \alpha = \arctg(\Delta W/W), \end{array} \right. \quad (5)$$

где W_Σ^b и W_Σ^e – начальное и конечное электропотребление.

Интегральный дифлекс-параметр на фиксированной стадии управления ($\alpha = \text{const}$) может быть определен как криволинейный интеграл:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta W_\Sigma = \int_\ell \Delta W(W, x, \alpha) d\ell; \\ \alpha = \text{const}, \end{array} \right. \quad (6)$$

где $\Delta W(W, x, \alpha)$ – скалярная функция, определенная на ранговом гиперпараметрическом распределении; $d\ell$ – элемент кривой интегрирования.

Представляется, что аналитическая форма рангового гиперпараметрического распределения РЭК может быть определена теоретически – методами дифференциальной геометрии, либо эмпирически – аппроксимацией имеющихся данных по электропотреблению [8, 9–11].

Таким образом, наилучшим можно считать процесс электропотребления РЭК, минимизирующий интегральный дифлекс-параметр при максимизации дифлекс-угла. Если же сравнивать текущее значение интегрального дифлекс-параметра РЭК с его значением в оптимальном состоянии, то можно получить параметр, который правомерно интерпретировать как количественную меру ущерба, наносимого РЭК за счет недостаточной энергоэффективности процесса электропотребления. Его предлагается называть интегральным дамадж-параметром (от англ. «damage»). С учетом текущего тарифа sc^t можно записать:

$$\begin{cases} D_{\Sigma}^w = \Delta W_{\Sigma}^t - \Delta W_{\Sigma}^e; \\ D_{\Sigma}^f = (\Delta W_{\Sigma}^t - \Delta W_{\Sigma}^e) \cdot sc^t, \end{cases} \quad (7)$$

где D_{Σ}^w – интегральный дамадж-параметр техноценоза, кВт·ч/Т; D_{Σ}^f – интегральный дамадж-параметр техноценоза, пересчитанный в соответствии с текущим тарифом sc^t ; ΔW_{Σ}^t – текущий интегральный дифлекс-параметр, кВт·ч/Т; ΔW_{Σ}^e – интегральный дифлекс-параметр, соответствующий конечному электропотреблению техноценоза.

Существенные перспективы таит в себе переход к динамической оценке, что потребует введения динамических дифлекс-функционалов:

$$\begin{cases} \Delta W(t) = F^w(W(t), x); \\ \alpha(t) = F^{\alpha}(W(t), x). \end{cases} \quad (8)$$

Таким образом, объектом наших исследований является региональный электротехнический комплекс, который рассматривается как ограниченная в пространстве и времени обладающая техноценологическими свойствами взаимосвязанная совокупность потребителей электроэнергии, реализующая в единой системе управления и всестороннего обеспечения цель оптимального управления электропотреблением.

Аналитическая форма рангового гиперпараметрического распределения РЭК может быть определена теоретически методами дифференциальной геометрии либо эмпирически путем аппроксимации имеющихся данных по электропотреблению.

Литература

1. **Техника**, техносфера, энергосбережение [Сайт] / В.И. Гнатюк. Электронные текстовые данные. М.: [б.и.], [2000]. Режим доступа: <http://www.gnatukvi.ru>, свободный, [рег. от 23.11.2005 № 5409].

2. **Петухов Г.Б., Якунин В.И.** Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем [Монография]. М.: Изд-во «АСТ», 2006. 504 с.

3. **Гнатюк В.И.** Потенциал энергосбережения техноценоза [Трактат] / Электронные текстовые данные. Калининград: Изд-во КИЦ «Техноценоз», 2013. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/index.files/potential.pdf>, свободный.

4. **Гнатюк В.И.** Философские основания техноценологического подхода [Монография] / Электронные текстовые данные. Калининград: Изд-во КИЦ «Техноценоз», 2014. Режим доступа: http://gnatukvi.ru/mono_pdf/text.pdf.

5. **Луценко Д.В.** Комбинаторная теория ранговой динамики [Трактат] / Первое издание. Электронные текстовые данные. Калининград: Изд-во КИЦ «Техноценоз», 2018. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/ktrd.pdf>, свободный.

6. **Кивчун О.Р.** Векторный ранговый анализ [Трактат] / Первое издание. Электронные текстовые данные. Калининград: Изд-во КИЦ «Техноценоз», 2019. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/vran.pdf>, свободный.

7. **Гнатюк В.И.** Критерий оценки качества электропотребления техноценоза [Статья] // Новые перспективы рангового анализа. Электронные текстовые данные. Калининград: [б.и.], [2019]. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/index.files/giperkache.pdf>, свободный.

8. **Гнатюк В.И.** Закон оптимального построения техноценозов [Монография] / 3-е изд., перераб. и доп. Электронные текстовые данные. Калининград: Изд-во КИЦ «Техноценоз», 2019. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/ind.html>, свободный.

9. **Гнатюк В.И.** Цифровой двойник техноценоза по электропотреблению [Трактат]. Электронные данные. Калининград: [б.и.], [2021]. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/index.files/cifrodvoyin.pdf>.

10. **Гнатюк В.И.** Знания, информация, данные в управлении СЭТ-систем [Основные понятия, термины и определения] / Электронные текстовые данные. Калининград: [б.и.], [2022]. Режим доступа: http://gnatukvi.ru/index.files/inf_dann_upr.pdf, свободный.

11. **Типикин А.А., Пуха Г.П.** Способ пространственно-временного кодирования в радиолиниях ВМФ // Морской сборник. 2020. № 6 (2079). С. 85–88.

*В.И. Гнатюк, mail@gnatukvi.ru, О.Р. Кивчун, oleg_kivchun@mail.ru, БФУ им. Канта, г. Калининград
Т.О. Кивчун, tkivchun@mail.ru, НИУ «МЭИ», г. Москва*

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЦЕНОЗОМ

В докладе рассмотрен важный вопрос постановки задачи управления электропотреблением объектов организационно-технических систем. Суть задачи управления заключается в получении на каждом этапе управленческого процесса целевой аппроксимационной кривой рангового распределения. Это позволяет на данной кривой зафиксировать положение каждого из объектов с целью формирования детального управляющего воздействия. Главная цель процесса управления электропотреблением – приведение системы в конечное состояние, заданное планом повышения энергоэффективности, что требует пошагового управления. На каждом шагу требуется снижение совокупного электропотребления объектов на определен-

ную величину. В конечном итоге система должна быть гарантированно переведена в целевое состояние с наименьшими операционными затратами на управленческий процесс.

Если говорить о современном состоянии теории управления организационно-техническими системами (ОТС), то наименее разработанной представляется область идентификации ОТС как объекта управления, а также постановки задачи управления. Остаются нерешенными ряд ключевых задач, касающихся методологии определения статистических характеристик параметров ранговых гиперпараметрических распределений. Кроме того, недостаточно исследованы закономерности ранговой динамики в топологическом пространстве, что не позволяет считать решенной проблему моделирования положения точек, соответствующих объектам ОТС на ранговых гиперпараметрических распределениях.

Возникает вопрос, как на каждом этапе управленческого процесса получать целевую аппроксимационную кривую рангового распределения. Для разработки детального управляющего воздействия необходимо на данной кривой зафиксировать положение каждого из объектов. Проявляющийся при исследовании ОТС феномен негауссовости дисконтинуальных фракталоподобных сред делает невозможным непосредственное применение статистических методов, предназначенных для работы с выборками данных, имеющими устойчивые моменты [6]. Более того, дисконтинуальность и фракталоподобность порождает случайные явления, лежащие за пределами колмогоровской теории вероятностей и математической статистики. Исследуя поведение объектов ОТС, мы находим различные проявления некоего аналога корпускулярно-волнового дуализма [1]. Как показали многолетние исследования, положение объектов в ранговом топологическом пространстве лучше описывается волновыми функциями, связанными с континуальной ранговой топологической мерой. В то же время, гораздо худшие результаты дает их привязка к целочисленным рангам, выполняемая на основе имитационного моделирования. Математическое описа-

ние этих явлений находится в области квантовой теории вероятностей – некоммутативного аналога классической (колмогоровской) теории вероятности [1].

Следует отметить, что очень многие из создателей классической квантовой теории неоднократно отмечали, что квантовые эффекты присущи не только микро-, но и макрообъектам. В подтверждение этого к настоящему времени создан целый ряд приложений квантовой теории в таких областях, как астрофизика, электроника, оптика, минералогия, информатика, биология, экономика, психология и др. Мы полагаем, что квантовая теория применима и в области ранговой динамики техноценозов. В частности, здесь наблюдается квантовый эффект и, как следствие, выполняется принцип неопределенности. Квантовый эффект в техноценозе проявляется в том, что скачкообразное перемещение объекта из одного ранга в другой становится возможным лишь когда его параметр изменяется на определенное значение, задаваемое формой рангового гиперпараметрического распределения техноценоза в данный момент времени и пропорциональное минимальному значению параметра (параметрическому «кванту»).

Принцип неопределенности заключается в следующем. Объект ОТС находится в определенном ранге лишь с некоторой вероятностью. Другими словами, он в своем состоянии как бы «размазан» в окрестности ранга. В то же время, ранговое гиперпараметрическое распределение фиксируется на ранговой гиперпараметрической поверхности под определенным дифлекс-углом тоже с определенной вероятностью («размазано» в окрестностях аппроксимационной кривой). Однако форма рангового гиперпараметрического распределения зависит от положения точек объектов в топологическом пространстве. Это приводит к тому, что в заданный момент времени невозможно одновременно точно определить координаты точки объекта в ранговом топологическом пространстве, с одной стороны, и координаты точки на ранговом гиперпараметрическом распределении, соответствующей данному объекту, с другой стороны.

Однако остается до конца не конкретизирован вопрос постановки задачи управления электропотреблением объектов ОТС. Процесс управления электропотреблением, имеющий целью приведения системы в конечное состояние, заданное планом повышения энергоэффективности, требует пошагового управления [3, 9]. На каждом шагу требуется снижение совокупного электропотребления объектов техноценоза на определенную величину. В конечном итоге техноценоз должен быть гарантированно переведен в целевое состояние с наименьшими операционными затратами на управленческий процесс (рис. 1). При планировании задаются начальное и конечное ранговые гиперпараметрические распределения $\Delta W(W, x, \alpha)$, а также начальное и конечное значения дифлекс-функционала $F^W(W(t), x)$. Следовательно, промежуточные состояния техноценоза однозначно характеризуются дифлекс-функционалом $F^a(W(t), x)$, определяющим соответствующие значения дифлекс-угла.

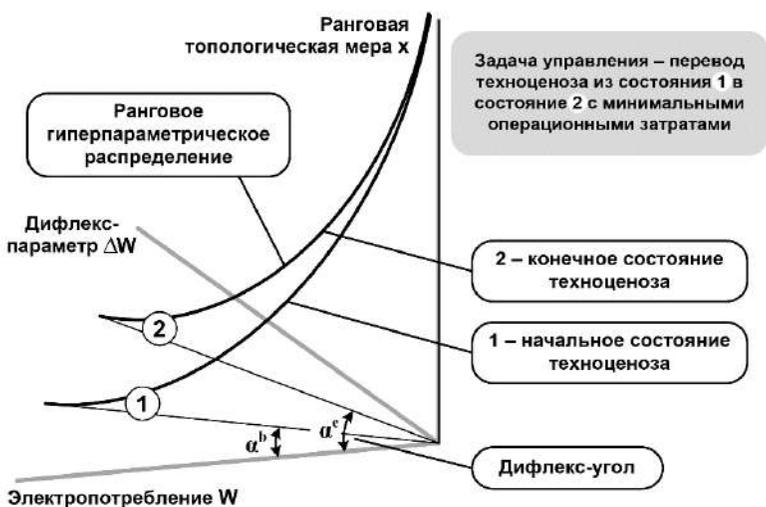


Рис. 1. К постановке задачи управления электропотреблением с помощью ранговых гиперпараметрических распределений

Введем понятие операционной функции процесса управления электропотреблением ОТС как соотношения, описывающего зависимость между положительным эффектом и операционными затратам [3, 9]:

$$f(\Delta W, W) = \delta(\Delta W(\alpha), W(\alpha)) = \delta(\alpha), \quad (1)$$

где $\delta(\alpha)$ – дифлекс-функция процесса управления электропотреблением объектов техноценоза; $\Delta W(\alpha)$ – дифлекс-параметр рангового гиперпараметрического распределения, рассчитанный для состояния, соответствующего дифлекс-углу α ; $W(\alpha)$ – электропотребление на ранговом гиперпараметрическом распределении, рассчитанное для состояния, соответствующего дифлекс-углу α ; α – дифлекс-угол рангового гиперпараметрического распределения техноценоза.

Будем исходить из того, что дифлекс-параметр количественно характеризует операционные затраты (ресурсов, времени и др.) техноценоза на реализацию управленческих процедур, а электропотребление – положительный эффект, получаемый в процессе управления, что делает возможным рассматривать зависимость (1) как операционную функцию.

При фиксированном значении дифлекс-угла, дифлекс-функция превращается в константу, имеющую смысл относительного дифлекс-параметра техноценоза, будучи взятого в целом. Учитывая строгую тригонометрическую форму зависимости от дифлекс-угла, данную константу предлагается называть тангенс-фактором δ^α :

$$\delta^\alpha = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta W^\alpha(x_k)}{W^\alpha(x_k)}, \quad \alpha = \operatorname{const}; x_k \in [0, \infty), \quad (2)$$

где $\Delta W^\alpha(x_k)$ – дифлекс-параметр, соответствующий углу α и значению ранговой топологической меры x_k ; $W^\alpha(x_k)$ – электропотребление, соответствующее α и x_k .

Как представляется, впервые вводимый здесь тангенс-фактор рангового гиперпараметрического распределения по электропотреблению может иметь существенное значение в теории рангового анализа

ОТС по двум основным причинам (рис. 2). Во-первых, он однозначно характеризует фиксируемый этап управленческого процесса в ОТС, а во-вторых, является устойчивой во времени случайной величиной. Это открывает перспективы использования тангенс-фактора в качестве еще одного детерминированного инварианта при имитационном моделировании в контуре управления электропотреблением ОТС [2, 4–8].

Таким образом, управление электропотреблением, имеющее целью приведение системы из состояния 1 в состояние 2 (рис. 1 и 2), должно осуществляться по траектории, близкой к линейной. Аналитически траекторию можно записать следующим образом:

$$\partial\alpha(t) / \partial t \rightarrow const. \quad (3)$$

Выражение (3) основывается на общих требованиях к операционным функциям организационных систем [3].

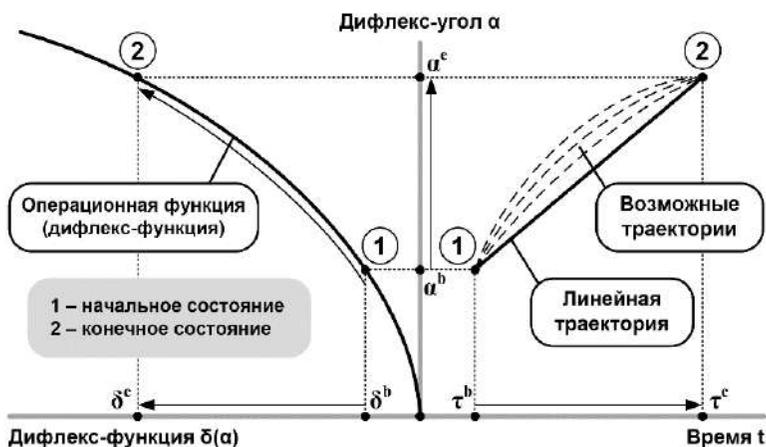


Рис. 2. Операционная функция управления электропотреблением

Литература

1. **Физический** энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. Ред. кол. Д.М. Алексеев, А.М. Бонч-Бруевич, А.С. Боровик-Романов и др. М.: Советская Энциклопедия», 1984. 944 с.
2. **Техника**, техносфера, энергосбережение [Сайт] / В.И. Гнатюк. Электронные текстовые данные. М.: [б.и.], [2000]. Режим доступа: <http://www.gnatukvi.ru>, свободный, [рег. от 23.11.2005 № 5409].
3. **Петухов Г.Б., Якунин В.И.** Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целенаправленных систем [Монография]. М.: Изд-во «АСТ», 2006. 504 с.
4. **Кивчун О.Р.** Векторный ранговый анализ [Трактат] / Первое издание. Электронные текстовые данные. Калининград: Изд-во КИЦ «Техноценоз», 2019. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/vran.pdf>, свободный.
5. **Гнатюк В.И.** Критерий оценки качества электропотребления техноценоза [Статья] // Новые перспективы рангового анализа. Электронные текстовые данные. Калининград: [б.и.], [2019]. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/index.files/giperkache.pdf>, свободный.
6. **Гнатюк В.И.** Закон оптимального построения техноценозов [Монография] / 3-е изд., перераб. и доп. Электронные текстовые данные. Калининград: Изд-во КИЦ «Техноценоз», 2019. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/ind.html>, свободный.
7. **Гнатюк В.И.** Цифровой двойник техноценоза по электропотреблению [Трактат]. Электронные данные. Калининград: [б.и.], [2021]. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/index.files/cifrodvoyin.pdf>.
8. **Гнатюк В.И.** Знания, информация, данные в управлении СЭТ-систем [Основные понятия, термины и определения]. Электронные текстовые данные. Калининград: [б.и.], [2022]. Режим доступа: http://gnatukvi.ru/index.files/inf_dann_upr.pdf, свободный.
9. **Типикин А.А., Пуха Г.П.** Способ пространственно-временного кодирования в радиолиниях ВМФ // Морской сборник. 2020. № 6 (2079). С. 85–88.

МЕТРИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ РОССИИ

Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации» является важным шагом для перехода на новый технологический уклад, в котором устойчивому росту экономики способствуют инновации, направленные, в первую очередь, на обеспечение комфортной и безопасной жизни граждан страны [1]. Разработка и внедрение новых цифровых технологий, решений и сервисов всё в большей степени связано с необходимостью увеличения вычислительных мощностей и обеспечения бесперебойной работы информационно-коммуникационной инфраструктуры.

Центры обработки данных являются «ключевым экономическим активом» современной цифровой экономики, поддерживают безопасную устойчивую цифровую инфраструктуру и способствуют цифровой трансформации в бизнесе и государственных услугах. Они необходимы для хранения информации, связи и вычислений и могут открыть будущие инновации, включая беспилотные автомобили, подключение 5G и межмашинное взаимодействие.

Для электроэнергетического комплекса цифровизация также предоставляет широкие возможности для принятия более качественных и экономически эффективных решений в области управления на основе собственных информационных данных, для этого эти данные необходимо научиться собирать, хранить и обрабатывать.

Центр обработки данных (ЦОД) – это специализированный объект, представляющий собой связанную систему ИТ-инфраструктуры и инженерной инфраструктуры, оборудование и части которых размещены в здании или помещении, подключенном к внешним сетям, как инженерным, так и телекоммуникационным

[2]. Центры обработки данных (ЦОД) являются критически важными для большинства современных организаций, и эффективность их работы важна для обеспечения надежности и производительности.

Поскольку объем данных продолжает увеличиваться, то и потребность в энергии также возрастает, в связи с тем, что ЦОД требуют для своей работы все больше и больше оборудования, потребляющего электрическую энергию. С другой стороны, всё те же цифровые технологии могут применяться и для оптимизации энергопотребления на основе предиктивной аналитики пиковых нагрузок и алгоритмизации при распределении ресурсов в реальном времени.

При должном уровне обеспечения безопасности данных и защиты от кибератак, решения вопросов единого регулирования и стандартизации во всех субъектах энергетики, цифровая энергетика может стать новым направлением развития для традиционной энергетики. Использование цифровых технологий может помочь в создании более гибких и адаптивных энергетических систем, способных реагировать на изменения спроса и предложения в реальном времени. Это может привести к снижению энергопотребления, уменьшению выбросов углекислого газа и повышению общей эффективности энергосистем [3].

Актуальным остается вопрос об оценке эффективности самих ЦОД.

В России некоторые аспекты деятельности ЦОД урегулированы в следующих документах:

- Федеральный закон от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации». Этот закон определяет основные принципы обработки и защиты информации, включая информацию, обрабатываемую в ЦОД.

- Постановление Правительства РФ от 12 февраля 2013 г. № 111 «Об утверждении Правил размещения информационной системы персональных данных на территории Российской Федерации». Этот документ регулирует вопросы размещения персональных данных граждан России.

• Приказ ФСТЭК России от 18 февраля 2013 г. № 21 «Об утверждении требований к защите персональных данных, обрабатываемых в информационных системах персональных данных»: Этот приказ устанавливает требования к защитной системе ЦОД.

В этих и других нормативно-правовых документах отсутствуют метрики для оценки эффективности ЦОД. Определим их, исходя из задач, которые решают ЦОД в электроэнергетических системах.

1. Одной из главных задач ЦОД является обеспечение надежности и безопасности работы электроэнергетических систем при одновременном обеспечении эффективности работы энергетических компаний.

В данном случае можно применить метрики по стандарту ГОСТ Р ИСО 13381-1–2016 «Контроль состояния и диагностика машин. Прогнозирование технического состояния. Часть 1. Общее руководство». Например, среднее время между отказами (MTBF): рассчитывается на основе исторических данных о времени работы оборудования и количестве произошедших отказов, при этом общее время работы оборудования (в часах) делится на количество отказов за это время. Большее значение MTBF указывает на более высокую надежность.

2. В связи с первой указанной задачей возникает и вторая, а именно обеспечение бесперебойной работы ЦОД, поскольку долгие периоды простоя могут привести к значительным потерям данных или пропускной способности. Меньше подвержены простоям ЦОД с высоким уровнем доступности, для оценки которого подходят следующие метрики (из того же стандарта):

среднее время восстановления после отказа (MTTR) или среднестатистическое время, необходимое ЦОД для восстановления после отказа; для его оценки необходимо общее время восстановления после всех отказов поделить на количество отказов за это время; меньшее значение MTTR указывает на более быстрое восстановление после отказов;

показатель доступности показывает время, в течение которого ЦОД может работать без перерывов или сбоев. Его также можно рассчитать, как доля времени, когда ЦОД доступен для использования (от времени работы вычесть время простоя и разделить на время работы). Соответственно, чем выше уровень доступности, тем более надежным и эффективным является ЦОД. Решение этой задачи заключается в дублировании ключевых систем, например, в резервировании серверов и электропитания. ЦОД должен быть способен быстро переключиться на резервные устройства и продолжить работу без простоя.

3. Электроэнергетические компании приняли на себя обязательства по достижению целей устойчивого развития, в свете которых активно стало оцениваться воздействие эксплуатации оборудования на окружающую среду. Степень выполнения требований к потреблению энергии и охлаждению в ЦОД оценивается показателем энергоэффективности с использованием следующих метрик [4]:

Power Usage Effectiveness (PUE) оценивает эффективность использования энергии ЦОД, измеряется как отношение общего потребления энергии ЦОД (включая энергию, используемую ИТ-оборудованием, а также энергию, потребляемую системами охлаждения, распределения питания и другими вспомогательными системами) к энергии, потребляемой только оборудованием ЦОД (серверы, системы хранения данных, сетевое оборудование и другое ИТ-оборудование). Идеальное значение PUE равно 1,0 (но это редко достижимо, на практике находится в диапазоне от 1,5 до 2,0);

Data Center Infrastructure Efficiency (DCiE) является обратной величиной PUE ($1/PUE$) и выражается в процентах; демонстрирует, сколько потребляемой энергии используется непосредственно ИТ-оборудованием. Высокое значение указывает на более эффективное использование энергии.

Для снижения затрат на электроэнергию применяют современные энергоэффективные материалы и технологии, виртуализацию серверов и интеллектуальное управление энергопотреблением, а также специальные системы охлаждения.

Международная организация по стандартизации при разработке серии стандартов ИСО/МЭК 13034 «Информационные технологии. Центры обработки данных. Ключевые показатели эффективности» учла разработанные некоммерческим объединением организаций «The Green Grid» метрики, оценивающие экологическую энергоэффективность ЦОД:

Carbon Usage Effectiveness (CUE) применяется при оценке углеродного следа, непосредственно связанного с энергопотреблением ЦОД, и рассчитывается как отношение общих углеродных выбросов ЦОД (оценивается при помощи коэффициента выбросов CO₂ при генерации полной потребленной электроэнергии ЦОД; как правило, по запросу может быть предоставлен генерирующей компанией) к потреблению электроэнергии IT-оборудованием ЦОД. При этом чем ниже CUE, тем более эффективно ЦОД использует энергию с точки зрения своего углеродного следа;

Renewable energy factor (REF) или коэффициент возобновляемой энергии измеряется как доля возобновляемой энергии, которую ЦОД потребляет в виде электроэнергии, в общем объеме электропотребления.

4. В связи с третьей указанной задачей возникает и четвертая, а именно обеспечение высокой производительности ЦОД, выражающейся в эффективном использовании ресурсов, таких как вычислительная мощность, хранилища данных и сетевые ресурсы, и управления ими. Для оценки можно применять следующие метрики [5]:

оценка использования процессора (CPU) показывает, какую часть времени процессор занят выполнением задач (вместо простоя). Обычно она выражается в процентах;

загрузка процессора – это количество процессов, ожидающих доступа к процессору. Если этот показатель постоянно высок, это может указывать на проблемы с производительностью;

загрузка сервера – это доля от полной мощности, которую действует сервер, чем она меньше, тем менее эффективно используется ЦОД;

среднее время выполнения задачи – это время, необходимое для выполнения определенной задачи или набора задач. Если среднее время выполнения задачи увеличивается, это может указывать на проблемы с производительностью;

Input/Output Operations Per Second (IOPS) показывает количество операций ввода-вывода данных в секунду. Чем выше IOPS, тем быстрее обрабатываются данные ЦОД.

В связи с тем, что одной из основных тенденций развития ЦОД в электроэнергетике является переход к облачным технологиям, важной становится оценка уровня виртуализации, который отражает степень соответствия количества виртуальных машин количеству физических серверов. Чем выше этот показатель, тем эффективнее использование ресурсов.

Эффективное управление ЦОД достигается за счет автоматизация процессов и мониторинга систем, что также влияет на повышение производительности ЦОД.

5. В энергетических компаниях хранятся большие объемы конфиденциальной информации: данные о клиентах, технические характеристики оборудования и т.д. Поэтому важным аспектом работы ЦОД является защита данных, оценка уровня которой может осуществляться посредством метрик безопасности [6]: уровень шифрования данных, системы аутентификации и авторизации, контроль доступа, степень защиты от взлома сети, от вредоносных программ и вирусов и другие показатели информационной безопасности. В целом, требования безопасности ЦОД очень высоки и требуют использования самых современных технологий и методов защиты информации.

6. Как и любой другой бизнес-процесс электроэнергетической компании, разработка, внедрение и эксплуатация ЦОД должны быть экономически эффективными, что достигается посредством улучшения указанных показателей, а также оценки

совокупной стоимости владения ЦОД, которая является комплексной метрикой, с необходимостью и достаточностью включающая в себя следующие стоимостные составляющие:

капитальные затраты (CAPEX) включают в себя начальные затраты на покупку оборудования, строительство или аренду помещений для ЦОД, установку и настройку оборудования и др.;

операционные затраты (OPEX) включают в себя затраты на энергию, охлаждение, обслуживание и ремонт оборудования, а также затраты на персонал, который управляет ЦОД;

затраты на простой, если ЦОД недоступен из-за отказа оборудования или других проблем; могут включать в себя затраты на восстановление системы и упущенные выгоды предприятия во время вынужденного простоя, а также финансовые убытки от потери данных и др.;

затраты на обновление и замену оборудования в связи с ускоренным устареванием технологий в этой области;

затраты на безопасность и соответствие стандартам включают в себя затраты на защиту от кибератак, соответствие стандартам безопасности и нормативным требованиям, а также затраты на страхование;

затраты на управление данными и программное обеспечение, включая лицензии.

Еще одной важной метрикой является *масштабируемость*. Она показывает, насколько легко можно расширить инфраструктуру ЦОД при необходимости. Масштабируемость обеспечивает гибкость и адаптивность инфраструктуры к изменяющимся потребностям предприятий.

В заключение можно сказать, что ЦОД являются необходимой составляющей современных энергетических систем. Они обеспечивают надежность, безопасность и эффективность работы энергетических компаний, а также позволяют им адаптироваться к изменяющимся условиям рынка и использовать новые технологии для повышения производительности и качества услуг. При этом

эффективность ЦОД также необходимо оценивать, как на этапе приобретения (разработки и внедрения), так и во время эксплуатации. Доступность, энергоэффективность, производительность, масштабируемость и безопасность – это ключевые метрики, которые помогают определить уровень эффективности ЦОД и разработать стратегию по его улучшению.

Литература

1. **Указ** Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». [Электронный ресурс]. URL: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201805070038.pdf> (дата обращения: 24.08.2023).

2. **ГОСТ Р 58811-2020**. Центры обработки данных. Инженерная инфраструктура. Стадии создания.

3. **Бушуев В.В., Новиков Н.Л., Новиков А.Н.** Цифровизация экономики и энергетики: перспективы и проблемы // Экономические стратегии. 2019. № 6 (164). С. 96–105. DOI: 10.33917/es-6.164.2019.96-105.

4. **Свиридов А.Н., Демкин В.И.** Анализ методов повышения энергоэффективности центров обработки данных // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 2. С. 110–115.

5. **Сухов Р.Р., Амзараков М.Б., Исаев Е.А.** Новые метрики энергоэффективности ИТ-отрасли // Бизнес-информатика. 2022. Вып. 16. № 2. С. 49–61.

6. **Фирюлин М.Е.** Задача разработки моделей оценки эффективности информационных процессов в центрах обработки данных в условиях комплексной защиты информации // Вестник Воронежского института МВД России. 2015. № 3. С. 234–238.

*О.В. Маслеева, ovm1552@yandex.ru,
Е.В. Крюков, kryukov@nntu.ru,
Я.И. Петухов, yaroslav.2000@mail.ru,
НГТУ, г. Н. Новгород*

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧНОСТИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И АВТОМОБИЛЕЙ С ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ВСЕХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Расширение использования электромобилей считается одним из перспективных направлений решения экологических проблем, связанных с высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха в крупных городах. При эксплуатации электромобилей отсутствуют выбросы вредных веществ, обусловленные процессом сгорания топлива.

Однако проведенные исследования [1] показали, что при производстве электроэнергии, необходимой для движения электромобиля, масса выбросов вредных веществ в атмосферный воздух и парниковых газов выше, чем пробеговые выбросы автомобиля с двигателем внутреннего сгорания (ДВС).

Для полной экологической оценки необходимо сравнить технологические процессы производства автомобилей с ДВС и электромобилей. Для этого может применяться методика оценки жизненного цикла (ОЖЦ). ОЖЦ включает в себя сбор информации, сопоставление и оценку входных и выходных потоков, а также возможных воздействий на окружающую среду на всем протяжении жизненного цикла (ЖЦ) продукции – от получения сырья, производства и использования до переработки по окончании срока службы, повторного использования и заключительной утилизации.

Доклад посвящен оценке экологичности электромобилей и автомобилей с ДВС на всех этапах жизненного цикла. Было выбрано, что нижней границей жизненного цикла является добыча полезных ископаемых, верхней – утилизация вышедших из эксплуатации деталей автомобиля.

Исходными данными для проведения ОЖЦ являются перечень материалов, из которых состоят транспортные средства, а также их масса, которая определяется по техническим характеристикам. Также были учтены процессы производства топлива для бензинового двигателя.

Поскольку автомобиль с ДВС и электромобиль отличаются только силовыми агрегатами, то общие составляющие конструкции были исключены из дальнейшего экологического анализа. К ним относятся: кузов, шасси, электрооборудование, тормозная система, бортовой аккумулятор 12 В и прочие элементы интерьера.

Для проведения ОЖЦ был выбран электромобиль марки *EV-OLUTE i-PRO* и автомобиль с бензиновым двигателем *DongFeng Fengshen A60*. Данные автомобили построены на одной базе и отличаются только силовой установкой.

При проведении анализа были определены материалы, из которых состоят автомобили с ДВС и электромобили (табл. 1).

Таблица 1

Масса основных узлов автомобилей с ДВС и электромобилей

Масса компонентов и материалов, кг	
Автомобиль с ДВС	Электромобиль
Двигатель внутреннего сгорания Алюминий: 100 Чугун: 13 Сталь: 7	Электродвигатель Сталь: 108 Медь: 27 Алюминий: 15
Система охлаждения двигателя Алюминий: 5 Резиновые шланги: 2	Трансмиссия, редуктор, приводные валы Алюминий: 10 Сталь: 20
Стартер, система зажигания Сталь: 3 Медь: 2	Инвертор Медь: 0,6 Алюминий: 8,4
Выхлопная система Сталь: 20	Тяговый аккумулятор Алюминий: 43 Медь: 130 Пластмасса: 10 Литий: 8 Никель: 35 Марганец: 20 Кобальт: 14
Бензобак Пластмасса: 5	
Трансмиссия, сцепление, коробка переключения передач Алюминий: 10 Сталь: 20	
Общая масса: 1290	Общая масса: 1577

Из таблицы 1 видно, что основными материалами для производства транспортных средств являются медь, алюминий и сталь. Также стоит отметить, что общая масса электромобиля больше на 287 кг, что объясняется наличием тяжелого тягового аккумулятора.

Было выбрано, что жизненный цикл состоит из следующих единичных процессов: добыча полезных ископаемых, производство материалов, производство автомобилей, утилизация отходов. Исходя из этого рассматривались горнодобывающая промышленность, черная и цветная металлургия, нефтехимия, автомобилестроение. Структурная схема ЖЦ электромобиля приведена на рис. 1.

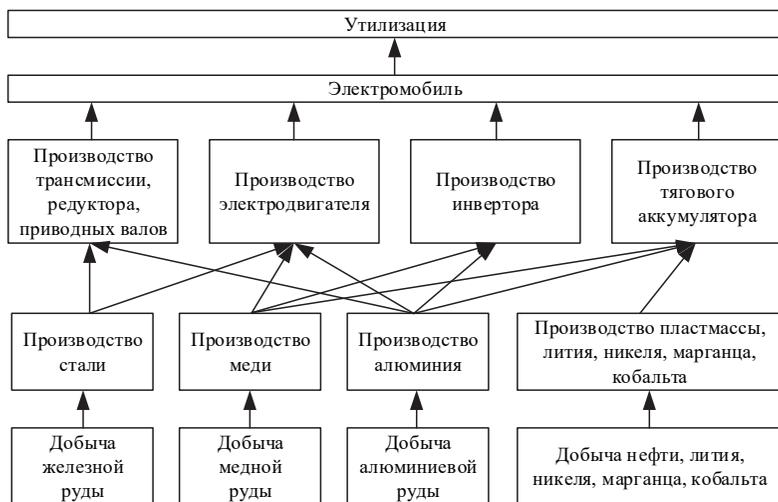


Рис. 1. Структурная схема ЖЦ электромобиля

Для проведения ОЖЦ все потоки данных были разбиты на две составляющие:

- энергетический (потребление электроэнергии);
- материальный (потребление природных ресурсов, образование отходов).

Для количественной оценки воздействия на окружающую среду был применен расчетный метод удельных показателей (на единицу массы).

Потребление природных ресурсов и образование отходов. Необходимая масса природных ресурсов для производства автомобилей была рассчитана исходя из массы материалов для изготовления деталей транспортных средств, а также с учетом образования отходов на всех этапах жизненного цикла. Значения удельных показателей образования отходов приведены в [3].

Значения массы материалов и отходов по этапам жизненного цикла приведены в табл. 2. В таблице обозначено: «Вх.» – масса вещества на входе на определённый этап, «Вых.» – соответственно масса вещества на выходе (масса вещества на входе минус масса отходов). «Вход» на этапе добычи – масса необходимых природных ресурсов, приведена в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что для производства электромобиля необходимо в 6 раз больше природных ресурсов, чем для автомобиля с ДВС. При расчете необходимого количества топлива учитывался средний расход, а также среднегодовой пробег автомобилей в России.

Суммарная масса отходов на каждом этапе жизненного цикла приведена в табл. 4.

Видно, что большое количество отходов образуется на этапе добычи полезных ископаемых у обоих транспортных средств, однако у электромобиля этот показатель выше в 6 раз, чем у автомобиля с ДВС.

Потребление электроэнергии. Расход электроэнергии определяется по формуле:

$$W = M \cdot W_{уд},$$

где M – годовой объем выпускаемой продукции, т;
 $W_{уд}$ – удельные нормы расходы электроэнергии, кВт·ч/т.

Масса материалов и отходов по этапам жизненного цикла

Электромобиль													
Материалы	Добыча			Металлургия			Машиностроение			Утилизация			
	Вх.	Отходы	Вых.	Вх.	Отходы	Вых.	Вх.	Отходы	Вых.	Вх.	Отходы	Вых.	
Сталь	581	290	290	290	152	165,1	165,1	37,12	128	128	128	32,5	95,5
Медь	6902	6349	552	442	110	110	110	25	85,6	85,6	85,6	14,3	71,3
Алюминий	2409,7	2216,9	192,8	72,3	120,5	120,5	120,5	27,1	93,4	93,4	93,4	15,6	77,8
Никель	7040,7	6477,4	563,3	512,1	51,2	51,2	51,2	16,2	35	35	35		
Марганец	107,6	49,1	58,5	29,3	29,3	29,3	29,3	9,3	20	20	20		
Кобальт	1280,1	1177,7	102,4	81,9	20,5	20,5	20,5	6,5	14	14	14		
Пластмасса	15,3	0,15	15,1	0,11	15	15		0	15	15	15	1,4	13,6
Медь фольга	1828,75	1682,45	146,3	117,04	29,26	29,26	29,26	9,26	20	20	20		
Алюминий фольга	292,6	269,2	23,4	8,8	14,6	14,6	14,6	4,6	10	10	10		
Графит	34,3	3,1	31,2	31,2	5,2	26,	26	6	20	20	20		
Автомобиль с ДВС													
Сталь	227	113	113	113	49	65	65	15	50	50	50	13	37
Чугун	52	26	26	26	9	17	17	4	13	13	13	0,5	12,5
Медь	161	148	13	10	3	3	3	1	2	2	2	0	2
Алюминий	2967	2730	237	89	148	148	148	33	115	115	115	19,17	95,8
Пластмасса	5,09	0,05	5,035	0,035	5				5	5	5	0,5	4,5
Топливо	1412	48	1364	12	1240	1240			1240				

Таблица 3

**Масса ресурсов для производства электромобиля
и автомобиля с ДВС**

Материал	Электромобиль	Автомобиль с ДВС
	Масса, кг	
Сталь	581	227
Чугун	–	52
Медь	8730,75	161
Алюминий	2702,3	2967
Пластмасса	15,3	5,09
Никель	7040,7	–
Марганец	107,6	
Кобальт	1280,1	
Графит	34,3	
Всего	20491	3412
Топливо	–	1412

Таблица 4

Масса отходов на каждом этапе жизненного цикла

Вид транспорта	Масса отходов, т			
	Добыча	Производство	Утилизация	Всего
Электромобиль	18,5	1	0,064	19,6
Автомобиль с ДВС	3,1	0,2	0,033	3,3
Топливо	0,05	0,01		0,06

В таблице 5 в качестве примера представлен расчет электропотребления по этапам жизненного цикла электромобиля для стали, меди и алюминия. Ориентировочные нормы удельного расхода электроэнергии (УРЭЭ) для различных видов промышленности были приняты в соответствии с [4].

Таблица 5

**Электропотребление по этапам
жизненного цикла электромобиля**

Электромобиль	Этап	Масса, кг	УРЭЭ, кВт·ч/т	Расход ЭЭ, кВт·ч
Сталь	Добыча	581	68	39,5
	Металлургия	165,12	547	90,3
	Машиностроение	128	300	38,4
	Утилизация	128	219	28
Медь	Добыча	6902	15	103,5
	Металлургия	110	400	44,2
	Машиностроение	85,6	300	25,7
	Утилизация	85,6	400	34,2
Алюминий	Добыча	2409,72	20	48,2
	Металлургия	120,49	18000	2168,7
	Машиностроение	93,4	300	28
	Утилизация	93,4	1800	168,1

Суммарное электропотребление для ОЖЦ электромобиля и автомобиля с ДВС приведено в табл. 6.

Таблица 6

**Суммарное электропотребление
для ОЖЦ электромобиля и автомобиля с ДВС**

Вид	Электропотребление, кВт·ч			
	Добыча	Производство	Утилизация	Всего
Электромобиль	559	3455	230	4245
Автомобиль с ДВС	81	2768	220	3069
Топливо	178	57		235

Установлено, что самый энергозатратный этап ЖЦ – процесс производства, который включает в себя машиностроение и металлургию.

Выводы. Масса отходов на каждом этапе жизненного цикла при производстве электромобилей значительно выше, чем автомобилей с ДВС. Масса отходов при добыче полезных ископаемых в 6 раз выше за счет использования цветных металлов – меди, никеля, марганца, кобальта, содержание которых в руде обычно составляет несколько процентов.

Суммарное электропотребление ЖЦ электромобиля выше, чем автомобиля с ДВС, особенно для этапа производства алюминия, который характеризуется высоким электропотреблением при электролизе.

Проведенные исследования показали, что на различных этапах ЖЦ электромобиль оказывает существенно большее негативное влияние на экологию по сравнению с автомобилем на бензиновом ДВС. Это объясняется наличием тягового аккумулятора у электромобиля, при производстве которого применяется большое количество токсичных для окружающей среды компонентов.

В дальнейшем планируется провести оценку жизненного цикла электромобиля и автомобиля с ДВС по другим экологическим факторам (потребление воды, сброс сточных вод, выброс вредных веществ в атмосферный воздух, эмиссия парниковых газов), а также определить способы снижения негативного влияния на экологию.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Правительства Нижегородской области для молодых ученых (соглашение от 04.07.2023 г. №316-06-16-96а/23).

Литература

1. Маслеева О.В., Крюков Е.В., Голицын Ю.Д. Экологическое сравнение автомобиля с ДВС и электромобиля // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы XII Международной научно-технической конференции. Часть II. Н. Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2022.

2. **Маслеева О.В., Крюков Е.В., Эрдили Н.И.** Оценка экологической составляющей жизненного цикла возобновляемых источников энергии // Актуальные проблемы электроэнергетики: Сборник научно-технических статей. Н. Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2019. С. 235–240.

3. **Сборник** удельных показателей образования отходов производства и потребления. Москва, 1999.

4. **Файбисович Д.Л.** Справочник по проектированию электрических сетей. М.: ЭНАС, 2012. 376 с.

*Хугаев А.З., KhugayevAZ@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», г. Москва*

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕССНОГО ПОДХОДА К УПРАВЛЕНИЮ В ПРОЕКТНО-ИЗЫСКАТЕЛЬСКИХ ОРГАНИЗАЦИЯХ

Принятый государственный курс на цифровизацию экономики охватывает все отрасли народного хозяйства. В утвержденной распоряжением Правительства РФ от 31 октября 2022 г. № 3268-р «Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года» особое внимание уделяется цифровизации технологий для сокращения длительности жизненного цикла проекта капитального строительства на основе внедрения информационного моделирования и сквозных технологий (машинное обучение, Интернет вещей, Большие Данные, искусственный интеллект и виртуальная реальность). При этом эффективность внедрения указанных технологий напрямую зависит от готовности систем управления организаций к алгоритмизации и информатизации реализуемых ими функций.

Для формирования единой цифровой инфраструктуры, объединяющей государственное и частное системы управления жизненным циклом объектов капитального строительства, необходимо

обеспечить роботизированную автоматизацию процессов. Поэтому все большую популярность, наряду с проектным управлением, в проектно-изыскательских организациях набирает именно процессный подход к управлению хозяйственной деятельностью, при грамотном внедрении которого ликвидируются несогласованные действия проектировщиков, заказчиков, смежников и представителей городских властей. Развитие цифровых сервисов в строительной отрасли позволит перейти от обмена официальными письмами к электронному документообороту, от личных встреч к дистанционной работе, что, в конечном итоге, сократит процесс согласования и экспертизы проектной документации, всего жизненного цикла строительного проекта в целом, а также повысит качество и безопасность дальнейшей эксплуатации объектов капитального строительства.

Как для первичного описания бизнес-процессов, так и для их реинжиниринга рекомендуется использовать автоматизированные анкеты, позволяющие преобразовывать определённым образом оформленный информационный массив в элементы нотации eEPC: оператор логики, соответствующий событию, инициирующим бизнес-процесс; идентификаторы ресурсов, поступающих на вход, используемых в ходе реализации бизнес-процесса и выступающих выходом процесса; назначенный исполнитель (владелец), необходимые документы, программа и информация.

В целях повышения эффективности хозяйственной деятельности организации Бардаков А.А. [1] предложил интеграцию управления по целям с процессным подходом к управлению организацией, для чего необходима одновременная формализация бизнес-процессов и разработка системы индикаторов – показателей, оценивающих результативность бизнес-процессов по срокам, стоимости и качеству их реализации. Лобов М.А. [2] предложил оценивать не только реальную эффективность, но и потенциальную, возникающую вследствие синергетического эффекта от совокупности функционирующих бизнес-процессов.

При изучении и совершенствовании внутреннего контроля бизнес-процессов в строительной отрасли Абдулаева И.И. [3] отмечает, что эффективность управления зависит от тщательности планирования нормативов затрат на ресурсы, включая рабочую нагрузку, а также затрат времени на выполнение каждой операции внутри каждого бизнес-процесса, чтобы впоследствии определить отклонение фактически понесенных затрат с исходными потребностями бизнес-процесса. Также автором отмечается, что и сам внутренний контроль должен быть процессно-ориентированным, что позволит определить критические области с низким уровнем исполнения бизнес-процесса и проблемы, связанные с ними (например, несогласованность действий сотрудников между собой и с сотрудниками контрагента, применение неактуальной нормативно-законодательной базы, различного рода ошибки при заключении договора с контрагентами или же отсутствие должной экономической экспертизы договора).

Интересным представляется применение процессного подхода к моделированию инновационной деятельности: на уровне предприятия. Мирославская М.В. [4] доказывает, что визуализация бизнес-процессов позволяет выявить «узкие» места в реализации процедур взаимодействия между проектными организациями и инновационной инфраструктурой. На уровне отрасли исследования, проведенные Ишмурадовой И.И. [5], продемонстрировали эффективность инновационного бизнес-процесса в условиях санкционных ограничений для развития государственно-частного партнерства, проектных организаций, научных и образовательных институтов.

Развивая идею о масштабировании процессного подхода к управлению инвестиционно-строительными проектами, Вторников А.В. [6] предложил и цифровую трансформацию отрасли также идентифицировать как процесс, что позволило спрогнозировать сценарии внедрения цифровых технологий в отечественной строительной отрасли в зависимости от динамики внешних и внутриотраслевых условий, при этом эффективность проектной деятельно-

сти будет выше во всех сценариях при активизации государственно-частного партнерства в секторе разработки и внедрения инновационных технологических разработок за счет минимизации инфраструктурных ограничений.

Голосова Т.С. [7] в своих исследованиях сосредоточила внимание именно на технологии информационного моделирования объекта капитального строительства на всех этапах его жизненного цикла, подчеркивая первостепенную значимость внедрения данной технологии в архитектурно-строительных проектных организациях. Разработав экономико-математическую модель стратегического выбора дорожной карты по внедрению указанной технологии, автором отметил, что данная цифровая трансформация возможна только при условии отлаженных рабочих бизнес-процессов организации, а также смены парадигмы проектного процесса на полноценную систему управления бизнес-процессами в рамках реализации комплексного проекта моделирования объекта капитального строительства и ведения его от разработки проектной документации до ввода в эксплуатацию.

Проанализировав консолидированный опыт применения процессного подхода к управлению в проектно-исследовательских организациях, можно сформулировать вывод, что он позволяет систематизировать рабочие процессы по реализации строительных проектов, повысить результативность хозяйственной деятельности организации, способствует проникновению цифровых технологий и соответствующей трансформации взаимоотношений в цепочке «заказчик – проектировщик – подрядчик – представители государственных органов», снижая издержки и сроки реализации проектов с одновременным повышением их качества.

Литература

1. **Бардаков А.А.** Совершенствование инструментария реинжиниринга бизнес-процессов в управлении организацией: автореферат дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05. Нижний Новгород, 2020. 24 с.

2. **Лобов М.А.** Совершенствование системы управления бизнес-процессами инновационно-ориентированного предприятия: системный подход: автореферат дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05. Орел, 2012. 27 с.

3. **Абдулаева И.И.** Развитие методического инструментария внутреннего контроля бизнес-процессов в строительных организациях: автореферат дис. ... канд. экон. наук: 08.00.12. Йошкар-Ола, 2012. 18 с.

4. **Мирославская М.В.** Управление инновационными бизнес-процессами предприятий: автореферат дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05. Санкт-Петербург, 2014. 17 с.

5. **Ишмурадова И.И.** Моделирование бизнес-процессов инновационно-активных организаций: автореферат дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05. Казань, 2018. 26 с.

6. **Вторников А.В.** Управление инвестиционно-строительными проектами, реализуемыми с применением цифровых технологий на принципах государственно-частного партнерства: автореферат дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05. Воронеж, 2022. 22 с.

7. **Голосова Т.С.** Организационно-экономические механизмы перехода на информационное моделирование в архитектурно-проектной деятельности: автореферат дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05. Москва, 2018. 24 с.

М.Г. Баширов, eapp@yandex.ru,

Э.М. Баширова, bashirova-elmira@yandex.ru,

Д.Ш. Акчурин, akihiro177@mail.ru,

ИНН УГНТУ, г. Салават

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Анализ причин аварий на энергоустановках, подконтрольных органам Ростехнадзора, за 2021 г. [1] показывает, что «отмечается значительный рост общего количества аварий на 47 % (10 ава-

рий) по сравнению с аналогичным периодом 2020 года». Основными техническими причинами аварий на субъектах электроэнергетики явились: «износ оборудования в процессе длительной эксплуатации; производственные дефекты оборудования, приводящие к механическим повреждениям, разрушениям оборудования и возможному возгоранию».

Как показало расследование Ростехнадзора, непосредственной причиной аварии на Саяно-Шушенской ГЭС – крупнейшей в истории России техногенной катастрофы на гидроэнергетическом объекте, произошедшей 17 августа 2009 г., было разрушение под действием динамических нагрузок значительной части шпилек крепления крышки турбины гидроагрегата, имевших усталостные повреждения [2]. Эта авария, как и другие аварии на объектах электроэнергетики, наглядно демонстрируют, что разрушения оборудования могут произойти из-за превышения допустимых нагрузок в местах концентрации механических напряжений, ослабленных различными повреждениями. Как известно по результатам многочисленных исследований, процесс деградации конструкционных свойств металла начинается в зонах локальных концентраций механических напряжений, в которых и зарождаются дефекты.

В настоящее время в России серийно выпускается весь спектр средств неразрушающего контроля и диагностики, реализующих на высоком уровне все виды и методы контроля в соответствии с ГОСТ Р 56542-2015, которые позволяют выявлять все недопустимые, согласно нормативным документам, дефекты металла в процессе изготовления, монтажа и эксплуатации энергетического оборудования. Но, как показала мировая практика расследования аварий, связанных с разрушением энергетического оборудования, выявлено много случаев, когда аварии происходили после плановых обследований средствами неразрушающего контроля, при которых недопустимые дефекты не были обнаружены [1–8]. Как оказалось, причиной разрушения оборудования явились локальные зоны с повышенной концентрацией механических напряжений, в которых под действием постоянных и переменных механических

нагрузок в структуре металла происходит интенсивное накопление повреждений, которые трансформируются в микротрещины. Микротрещины развиваются в объемные дефекты сплошности материала, которые и становятся причиной разрушения конструкций.

Поэтому для предотвращения возникновения аварийных ситуаций, связанных с разрушением оборудования, необходимо выявлять зоны повышенной концентрации механических напряжений и контролировать в этих зонах состояние структуры металла для выявления дефектов на самых ранних стадиях их развития. Традиционные же методы неразрушающего контроля не позволяют осуществлять раннюю диагностику и направлены на поиск уже развитых дефектов, что не всегда достаточно для обеспечения надежности диагностируемых объектов. Отсюда можно сделать вывод, что проблема разработки новых методов и средств неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния оборудования является весьма актуальной.

Актуальность проблемы стимулировала многочисленные исследования как в России, так и за рубежом, направленные на создание методов и средств контроля напряженно-деформированного состояния оборудования и выявление повреждений на уровне структуры металла. Результатом этих исследований явилось создание большого количества приборов, основанных на различных физических принципах. Наиболее удачными оказались приборы, принцип действия которых основан на магнитоупругом (коэрцитиметрический, магнитной анизотропии и магнитной памяти) и акустоупругом эффектах. В России разработаны ГОСТы и другие нормативные документы, регламентирующие порядок применения этих приборов. Однако при их использовании на практике возникает много научно-технических проблем, обусловленных неоднозначностью и нелинейностью связи между механическими и магнитными или акустическими свойствами металлов, влиянием на результаты структуры и химического состава металла, размеров контролируемой конструкции, толщины покрытий, механической предыстории, наличия микро и макродефектов.

Согласно энергетической стратегии России в настоящее время электроэнергетический комплекс страны, как и энергетические системы большинства индустриально развитых стран, претерпевает глубокую модернизацию с использованием инновационной организационно-технологической платформы ИЭС ААС (интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью), являющейся единым энергоинформационным комплексом с интеллектуальным управлением и непрерывным контролем технического состояния и режима работы всех его элементов. Помимо снижения стоимости производства и передачи электрической энергии, снижения технических и коммерческих потерь при транспортировке электроэнергии, результатом внедрения новой концепции является существенное повышение надежности электрооборудования, достигаемое за счет дистанционного интеллектуального диагностического мониторинга технического состояния.

Для решения проблемы дистанционного интеллектуального диагностического мониторинга напряженно-деформированного состояния и раннего выявления поврежденности металла энергетического оборудования необходимы соответствующие методы и средства неразрушающего контроля. Анализ конструктивных особенностей и особенностей эксплуатации электроэнергетического оборудования позволяет сформулировать основные требования к методам и средствам неразрушающего контроля, которые могли бы быть эффективно использованы в составе системы дистанционного интеллектуального диагностического мониторинга энергетического оборудования. Учитывая современные тенденции приборостроения, можно утверждать, что они должны быть бесконтактными, иметь мобильные и стационарно устанавливаемые датчики длительного использования с многоканальной передачей измерительной информации, должны давать возможность производить контроль объектов с минимально подготовленной или даже непод-

готовленной поверхностью при диапазоне температур в зоне контроля от -60 до $+800$ °С, иметь возможность накопления и беспроводной передачи информации для дальнейшей обработки.

Наиболее полно перечисленным требованиям удовлетворяют методы и средства контроля, основанные на применении электромагнитно-акустического (ЭМА) преобразования. Но существующие ЭМА средства неразрушающего контроля, из-за низкой эффективности двойного взаимного преобразования электромагнитных и акустических волн, значительно уступают в чувствительности и точности традиционным акустическим средствам с контактными пьезоэлектрическими преобразователями, в том числе для выявления превышения допустимых механических напряжений и микродефектов металлических конструкций.

За последние 10–15 лет отечественными и зарубежными учеными опубликовано много работ с результатами теоретических и экспериментальных исследований, направленных на повышение чувствительности и информативности методов и средств контроля, основанных на использовании ЭМА преобразования [3–11]. Литературный обзор основных направлений исследований отечественных и зарубежных ученых показывает, что они, в основном, направлены на совершенствование конструкции ЭМА преобразователей для генерирования в объекте контроля акустических волн с заданными параметрами и разработку различных способов выделения и обработки информации, содержащейся в изменении параметров акустических волн. При этом информативный потенциал электромагнитной составляющей ЭМА преобразования не был достаточно исследован.

В работах [12, 13] предложен новый подход к совершенствованию ЭМА метода контроля, основанный на использовании в качестве интегрального параметра, характеризующего напряженно-деформированное состояние и поврежденность металла оборудования, передаточную функцию – динамическую математическую модель объекта контроля в операторной форме $W(p)$. Оценка

напряженно-деформированного состояния и поврежденности металла оборудования в зоне контроля осуществляется графоаналитическим методом на комплексной плоскости с использованием координат корней знаменателя интегрального параметра $W(p)$. Этот метод является наглядным, но трудоемок и не исключает влияние человеческого фактора на результаты оценки технического состояния диагностируемого оборудования.

Целью данной работы является экспериментальное выявление новых информативных параметров ЭМА преобразования для идентификации напряженно-деформированного состояния и поврежденности металла электро-энергетического оборудования.

Исследования по схеме одноосного статического растяжения образцов из стали марок СтЗсп, 09Г2С и 12Х18Н10Т по ГОСТ 1497-84 проводились с использованием испытательной машины УММ-5 (рис. 1) в лаборатории диагностики электрооборудования ИНН ФГБОУ ВО УГНТУ в г. Салавате.



Рис. 1. Исследование частотных характеристик (АФЧХ) образца стали СтЗсп при растяжении испытательной машиной УММ-5

При проведении исследований использовался ЭМА прибор EM4000. На рисунке 2 изображены амплитудно-фазовые частотные характеристики (АФЧХ) образцов стали СтЗсп без нагрузки и при нагрузке 320 МПа, по которым видно изменение параметров частотных моделей образцов при изменении статической нагрузки, т.е. при изменении напряженно-деформированного состояния и поврежденности структуры металла.

Как отмечалось ранее, непосредственное использование передаточной функции для идентификации напряженно-деформированного состояния и поврежденности металла связано с определенными трудностями, поэтому предлагается использовать для этой цели частотную модель, формируемую гармоническими составляющими сигнала ЭМА преобразователя. Преимуществом такой модели является возможность применения эффективного метода спектрального анализа, упростить процесс идентификации и повысить её достоверность [14, 15]. Графическим изображением частотной модели является амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) объекта контроля на комплексной плоскости (см. рис. 2).

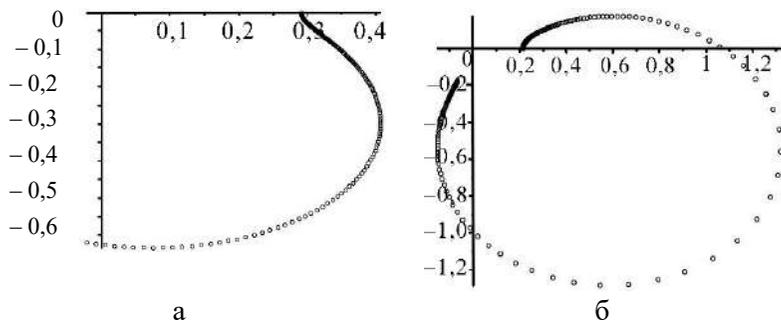


Рис. 2. Частотные характеристики (АФЧХ) образца стали СтЗсп при растяжении:
а – без нагрузки; б – при нагрузке 320 МПа

Если рассматривать диаграмму растяжения металла (рис. 3), то каждой точке этой кривой будет соответствовать своя частотная модель, формируемая совокупностью гармонических составляющих сигнала ЭМА преобразователя, поэтому по значениям параметров гармонических составляющих сигнала можно решить обратную задачу – идентифицировать текущее напряженно-деформированное состояние образца металла.

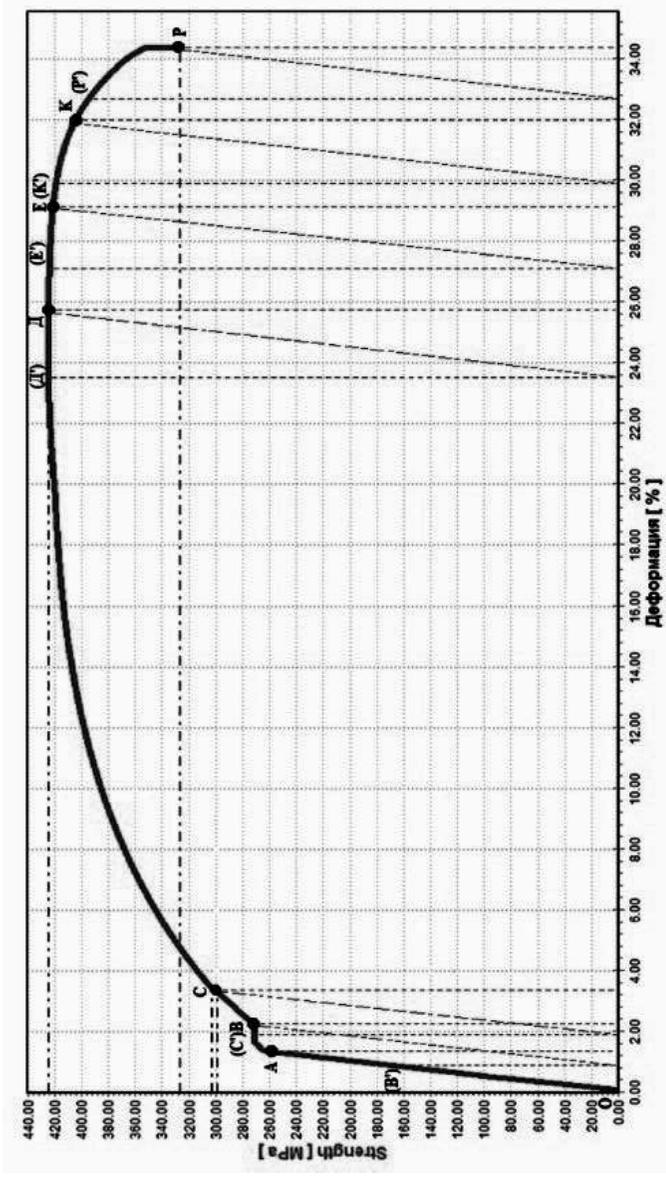


Рис. 3. Диаграмма растяжения образца из стали Ст3сп с указанием контрольных точек

Полученные результаты наглядно свидетельствуют о возможности применения частотных моделей для однозначной идентификации напряженно-деформированного состояния и поврежденности испытуемых образцов стали, но из-за большого объема исходной информации, которую необходимо при этом обработать, без использования современных интеллектуальных нейросетевых (ИНС) технологий это сделать практически невозможно. Для реализации интеллектуальной ЭМА-системы идентификации напряженно-деформированного состояния и поврежденности энергетического оборудования разработана искусственная нейронная сеть (рис. 4).

ИНС содержит 3 слоя:

- входной слой (первый слой в нейронной сети, который принимает входящие сигналы и передает их на последующие уровни);

- скрытый (вычислительный) слой с функцией активации softmax;

- выходной слой (последний слой в сети, который получает данные от последнего скрытого слоя. С его помощью можно получить нужное количество значений в желаемом диапазоне).

Обработка данных в искусственной нейронной сети осуществляется алгоритмом логистической регрессии, которая является разновидностью множественной регрессии, позволяющей анализировать связи между несколькими независимыми переменными (регрессорами или предикторами) и зависимой переменной. Алгоритм позволяет прогнозировать вероятности различных возможных результатов категориально распределенной зависимой переменной при заданном наборе независимых переменных. Разработка программного продукта и обучение нейронной сети в рамках исследования осуществлялись с применением языка программирования Python. В качестве основного инструмента разработки нейронной сети была выбрана библиотека TensorFlow. Входными данными для ИНС служат комплексные координаты характерных гармоник АФЧХ (частотной модели) – амплитуды и фазы первых 15 гармоник сигнала ЭМАП (электромагнитно-акустического преобразователя) в контрольных точках диаграммы нагружения образца металла. Выборка данных формируется в формате MS Excel для дальнейшей загрузки в ИНС для ее обучения.

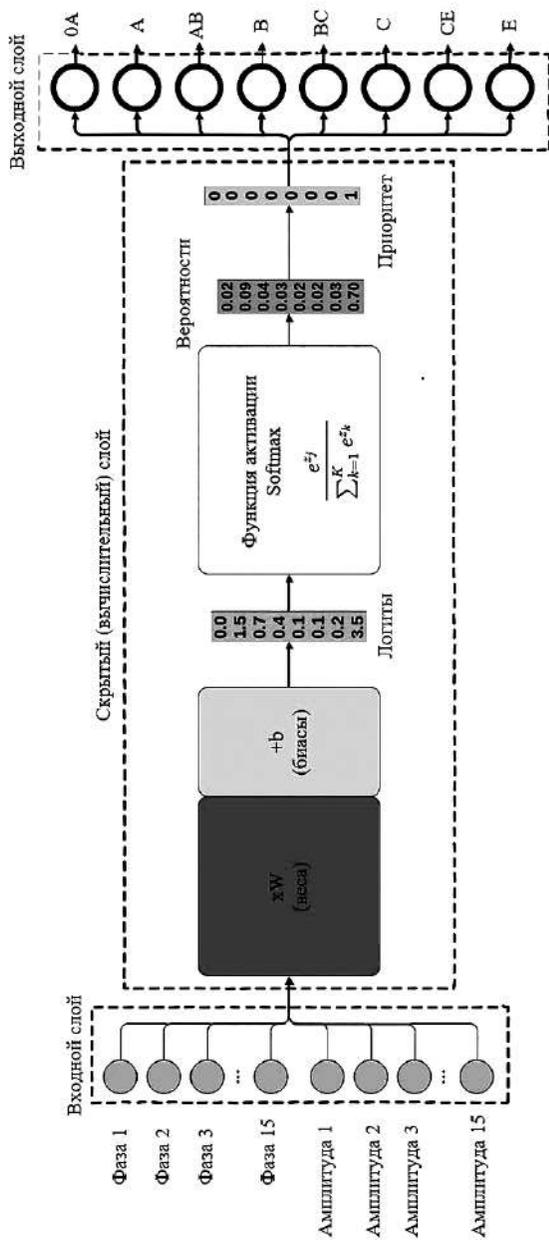


Рис. 4. Структура искусственной нейронной сети

Выходом ИНС являются вероятности принадлежности к одному из 8 классов (в данном случае состояния напряженно-деформированного состояния металла), которые преобразуются в приоритет (наибольшая вероятность принадлежности к конкретному классу), 8 выходных нейронов соответствуют 8 заданным состояниям. После ввода результатов измерения параметров гармоник программа обращается к обученной интеллектуальной модели и определяет текущее напряженно-деформированное состояние металла. Показателем качества обучения интеллектуальной модели служит ее точность. На данный момент она составляет 92,16%, что подтверждает наличие взаимосвязи между параметрами гармонических составляющих сигнала ЭМА преобразователя и уровнем напряженно-деформированного состояния металла.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ, проект № 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. **Анализ** причин аварий на энергоустановках, подконтрольных органам Ростехнадзора за 2021 год. Министерство энергетики Российской Федерации. URL: http://szap.gosnadzor.ru/activity/energonadzor/nesc_sluch/ (дата обращения 07.08.2023).

2. **Акт** технического расследования причин аварии на Саяно-Шушенской ГЭС 17 августа 2009 года. URL: http://www.gosnadzor.ru/news/aktSSG_bak.doc (дата обращения 07.08.2023).

3. **Ducousso M., Reverdy F.** Real-time imaging of microcracks on metallic surface using total focusing method and plane wave imaging with Rayleigh waves // NDT E Int. 2020. V. 116. P. 102311.

4. **Jiang C., Li Z., Zhang Z., Wang S.** New Design to Rayleigh Wave EMAT Based on Spatial Pulse Compression // *Sensors (Basel)*. 2023. Apr 13; 23(8):3943.

5. **Bashirov M.G., Khusnutdinova I.G.** The use of electromagnetic-acoustic method for estimating the stress-strain state of the metallic elements of power equipment // *Key Engineering Materials*, Vol. 743. 2017. P. 463–467.

6. **Алешин Н.П.** Исследование выявляемости поверхностных объемных дефектов при ультразвуковом контроле с применением волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем // *Дефектоскопия*. 2021. № 5. С. 22–30.

7. **Углов А.Л., Хлыбов А.А., Бычков А.Л., Кувшинов М.О.** О неразрушающем контроле остаточных напряжений в деталях осесимметричной формы из стали 03Н17К10В10МТ // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2019. Т. 22. № 4. С. 1–3.

8. **Баширов М.Г., Баширова Э.М., Юсупова И.Г., Драцкий В.О., Муртазина А.И., Квачинский С.А.** Моделирование и экспериментальное исследование влияния механических напряжений и поврежденности металла нефтегазового оборудования на параметры электромагнитно-акустического преобразования // *Нефтегазовое дело*. 2023. Т. 21. № 1. С. 183–194.

9. **Муравьев В. В., Будрин А.Ю., Синцов М.А.** Структуроскопия термически обработанных стальных прутков по скорости распространения рэлеевских волн // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2020. Т. 18. № 2. С. 37–20.

10. **Волкова Л.В., Муравьева О.В., Муравьев В.В.** Неравномерность акустической анизотропии толстолистового стального проката // *Сталь*. 2021. № 5. С. 36–41.

11. **Муравьева О.В., Волкова Л.В., Муравьев В.В., Синцов М.А., Мышкин Ю.В., Башарова А.Ф.** Чувствительность электромагнитно-акустического метода многократной тени с использованием рэлеевских волн при контроле труб нефтяного сортамента // *Дефектоскопия*. 2020. № 12. С. 48–57.

12. **Баширов М.Г., Хуснутдинова И.Г., Хуснутдинова Л.Г., Усманов Д.Р.** Электромагнитно-акустический метод оценки технического состояния энергетического оборудования // Промышленная энергетика. 2016. № 12. С. 8–13.

13. **Bashirov M.G., Bashirova E.M., Khusnutdinova I.G.** The dynamic identification of the technical condition of pipelines on the basis of the analysis of the temporal characteristics of electromagnetic-acoustic signal // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 12042.

14. **Баширов М.Г., Юсупова И.Г., Баширова Э.М.** Повышение информативности электромагнитно-акустических средств диагностики энергетического оборудования // В сборнике: Фёдоровские чтения – 2022. ЛП Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (с элементами научной школы для молодежи). М.: Издательский дом МЭИ, 2022. С. 27–34.

15. **Баширов М.Г., Баширова Э.М., Юсупова И.Г., Акчурин Д.Ш.** Исследование способов повышения эффективности электромагнитно-акустического преобразования средств диагностики энергетического оборудования // Промышленная энергетика. 2022. № 10. С. 2–9.

*Цырук С.А., TsyrukSA@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», г. Москва*

РОЛЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЙ КОМИССИИ В РАЗВИТИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ «ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВО ПРЕДПРИЯТИЙ, ОРГАНИЗАЦИЙ И УЧРЕЖДЕНИЙ»

Специальность (в дальнейшем профиль бакалавриата) «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» (ЭЭПОУ) была образована в 1994 году в результате разделения специальности «Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства» на «Электроснабжение (по отраслям)» направления «Электроэнергетика» и «ЭЭПОУ»

направления «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». Большую роль в создании и становлении специальности сыграл профессор Б.И. Кудрин.

Первоначально специальность ЭЭПОУ была открыта только в одном вузе – МЭИ. Однако постепенно ректораты других технических вузов и региональные власти осознали необходимость открытия данного профиля в своих учебных заведениях, поскольку ЭЭПОУ обеспечивает передачу студентам специфических компетенций, недоступных на других профилях подготовки в области энергетики – например, эксплуатация и монтаж электрооборудования, формирование взаимоотношений с субъектами электроэнергетики и др. На сегодняшний день число университетов в России, осуществляющих подготовку по профилю ЭЭПОУ, превысило 50.

В процессе создания и развития специальности по инициативе руководства кафедры Электроснабжения промышленных предприятий НИУ «МЭИ», УМС по направлению «Электроэнергетика и электротехника» и при поддержке федерального УМО в системе высшего образования по УГСН 13.00.00 «Электро- и теплоэнергетика» была сформирована учебно-методическая комиссия (УМК), в состав которой вошли заведующие кафедрами из разных городов России. В задачи УМК на первом этапе входило: изучение передового опыта преподавателей родственных кафедр, распространение положительных результатов, согласование документации, выработка рекомендаций по совершенствованию учебной и методической работы (организация методических семинаров, курсов и др.). Обсуждение результатов работы кафедр, входящих в структуру УМК, проводилось, как правило, в стенах Московского энергетического института, в рамках заседаний ежегодной международной научно-практической конференции с элементами научной школы, организуемой кафедрой ЭПП.

По инициативе председателя УМК профессора С.И. Гамазина с 2003 г. начали проводить ежегодные выездные заседания УМК в региональных вузах, осуществляющих подготовку

по соответствующему профилю. К задачам первого этапа были добавлены дополнительные, реализация которых возможна только в очном формате. В их числе проведение пленарных заседаний комиссии с участием членов ректората и руководства факультетов электротехнического профиля с целью обмена мнениями о перспективах развития образовательной программы, информирования об организации учебного процесса в вузах-партнерах; ознакомление с состоянием лабораторной базы и выработка рекомендаций по постановке новых лабораторных работ; чтение показательных лекций членами УМК для студентов и преподавателей; проведение консультаций для студентов и аспирантов по научной работе.

Деятельность УМК на выездных заседаниях не ограничивается только мероприятиями, проводимыми непосредственно на территории вузов. В планах заседаний всегда предусмотрены экскурсии на ведущие промышленные объекты региона, такие как гидроэлектростанции, теплоэлектроцентрали, цифровые трансформаторные подстанции, предприятия, выпускающие электротехническую продукцию (силовые трансформаторы, коммутационная аппаратура, кабельная продукция и пр.). Полученные во время посещения объектов новые знания и опыт используются членами УМК для совершенствования курсов лекций и практических занятий.

В числе обязательных мероприятий программы всегда предусмотрены экскурсии с посещением музеев, где участники не только ближе знакомятся с историей города, но и узнают интересные факты из жизни значимых для России людей, которые не всегда можно почерпнуть из справочников и энциклопедий.

География проведения выездных заседаний УМК достаточно широка: Казань, Омск, Тольятти, Киров, Тула, Вологда, Ижевск, Новороссийск, Салават, Орел, Новочеркасск, Таганрог, Екатеринбург, Армавир, Геленджик. В ближайших планах проведение выездных заседаний в Нижневартовске и Санкт-Петербурге. Посещение региональных вузов учебно-методической комиссией оказы-

вает положительное влияние на активизацию учебной и методической работы профильных кафедр. Поэтому многие руководители вузов с интересом рассматривают возможность повторного приглашения комиссии в свои учебные заведения.

Деятельность УМК по профилю ЭЭПОУ постоянно расширяется и совершенствуется. Сегодня в ее компетенции входят следующие направления работы: методическое сопровождение проведения ежегодной Всероссийской олимпиады студентов образовательных организаций высшего образования «Электроэнергетика и электротехника» в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (с 2024 г. аналогичная олимпиада планируется и в СПбГЭТУ «ЛЭТИ»); организация участия студентов и сотрудников во всероссийских и международных научно-технических конференциях; перекрестное рецензирование студенческих выпускных квалификационных работ, учебных и методических пособий; оппонирование диссертаций; подготовка учебных и методических пособий.

В 2023 г. студентами профильных кафедр института нефтепереработки и нефтехимии ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (филиал в г. Салавате) и ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ» в порядке эксперимента выполнена комплексная выпускная квалификационная работа бакалавра на общую тему «Разработка технических решений по повышению надежности электроснабжения ответственных механизмов технологических установок аппаратными средствами и схемными решениями при провалах напряжения в питающей сети». Государственная экзаменационная комиссия, состоящая из представителей обоих вузов, на «отлично» оценила работу студентов. Руководство обоих университетов положительно оценило результаты эксперимента, а выездное заседание УМК, проходившее в Вятском государственном университете (г. Киров) в сентябре текущего года, рекомендовало распространить результаты работы и на другие профильные кафедры.

В настоящее время в составе УМК профиля «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» 25 членов, представляющих 20 вузов российской Федерации. Поэтому существует перспектива дальнейшего расширения состава вузов-участников комиссии, а также омоложения ее персонального состава.

*М.А. Булатенко, BulkinaMA@mpei.ru,
П.А. Демидова, DemidovaPA@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», г. Москва*

ОЦЕНКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРСОНАЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ И ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

В настоящее время люди все больше осознают сильные стороны технологий виртуальной и дополненной реальности (VR/AR) и активно применяют их для решения различных задач. Эти технологии предлагают возможность погружения человека в цифровую среду, создавая искусственный мир, который ощущается пользователями через зрение, слух, осязание и другие чувства. В таком окружении люди контактируют с объектами, которые реалистично имитируют предметы реального мира. Особое внимание уделяется развитию этих технологий в области электроэнергетики. Главным преимуществом их применения в этой области является полное погружение, высокая интерактивность и вовлеченность пользователя [1].

VR/AR-технологии позволяют обучать людей в соответствующих областях, моделировать эксперименты и исправлять ошибки без риска, в результате чего увеличивается производительность за счет ускорения адаптации, сокращения ошибок персонала и снижения затрат на обслуживание оборудования. Платформы для обуче-

ния электротехнического персонала с использованием VR/AR-технологий включают в себя специальное программное обеспечение, а также следующие элементы [2]:

- VR-шлем и AR-очки объединяют реальный мир с виртуальными элементами, добавляя информацию и объекты в реальное окружение пользователя. Они позволяют отображать виртуальные объекты на фоне реальных объектов, что позволяет пользователям взаимодействовать с ними в реальном времени.

- Трекинг движения и контроллеры (VR-ручки или VR-перчатки), позволяющие пользователю взаимодействовать с виртуальной средой. Они обнаруживают движения и действия пользователя, передавая эти данные в программное обеспечение для отображения соответствующих действий в виртуальной среде.

- Технологии haptic-обратной связи включают тактильные устройства, такие как перчатки, которые могут передавать ощущения и сенсорные стимулы пользователю. Это может быть полезным для обучения, например, при симуляции ощущения сопротивления или текстуры при взаимодействии с виртуальными объектами.

Для сравнения обучающих приложений можно применить дифференциальный метод оценки конкурентоспособности продукции, который позволяет выявить сильные и слабые стороны продукции, а также определить ее конкурентоспособность по сравнению с аналогами на рынке, что позволит разработать стратегии улучшения продукции каждого производителя [3]. Используем следующие критерии:

1. Наличие датчиков и трекинга: использование датчиков, таких как акселерометр, гироскоп, компас, а также трекинг позиции и перемещения, позволяет достичь более точного отображения пользовательского взаимодействия с виртуальным пространством.

2. Взаимодействие: возможность взаимодействия с объектами виртуального пространства (например, прикосновения, перемещения, ввод текста) и реакция приложения на пользовательские

действия повышает эффективность обучения, а возможность выполнения заданий, обратной связи и кооперации с другими пользователями создают более привлекательное и эффективное обучающее окружение.

3. Аудиоэффекты и звуковое сопровождение: качество звука и использование аудиоэффектов (например, речь, звуки окружающей среды, музыкальное сопровождение) могут повысить вовлеченность и эмоциональную составляющую обучения.

4. Персонализация: возможность адаптировать приложение под различные уровни знаний, навыков и потребности пользователей, а также наличие средств доступности (например, субтитры, аудионаративы) повышают его эффективность и привлекательность.

5. Расширяемость: возможность добавления новых модулей, задач, сценариев и обновлений для расширения функциональности и улучшения обучающего процесса является важным преимуществом приложения.

6. Сопровождение: наличие инструкций, руководств, поддержки и помощи пользователю во время обучения.

7. Обратная связь и статистика: возможность отслеживания прогресса пользователей, предоставление обратной связи, статистики и аналитики помогает оценивать достижения и адаптировать обучение, повышают эффективность и контроль процесса обучения.

8. Размер файла и использование ресурсов: оптимизация размера файла приложения и эффективное использование ресурсов устройства (память, процессор) обеспечивают быструю загрузку и плавную работу приложения.

9. Поддержка контента: возможность масштабирования приложения под разные уровни сложности обучения, количество пользователей, поддержка различных типов контента (3D модели, видео, аудио, текст, изображение и др.) позволяют адаптировать приложение к разным образовательным ситуациям.

10. Конфиденциальность данных: защита персональных данных пользователей и обеспечение безопасности при использовании приложения являются важными аспектами при обучении виртуальной и дополненной реальности.

11. Языковая поддержка: поддержка разных языков и локализация приложения обеспечивают более широкий охват пользователей из разных стран и культур.

12. Надежность: оценка того, насколько надежно и стабильно работает платформа.

13. Удобство использования интерфейса: простой, интуитивно понятный и удобный пользовательский интерфейс способствует легкому освоению приложения и повышает эффективность обучения.

14. Экономическая эффективность: оценка выгоды, которая может быть получена от использования обучающей платформы, в том числе с учетом затрат на ее разработку и внедрение.

15. Инновационность: оценка того, насколько платформа отличается от аналогов на рынке и в чем заключаются ее инновационные особенности.

16. Качество визуальной репрезентации, реалистичность: оценка качества воспроизведения виртуальных и дополненных объекты и сцены на платформе.

17. Совместимость: поддержка различных операционных систем (iOS, Android, Windows) и платформ (мобильные устройства, виртуальные очки) позволяет достичь большей доступности приложения.

18. Техническая поддержка: возможность получения поддержки от разработчиков при возникновении проблем, а также наличие механизмов обратной связи для пользователей способствуют улучшению и развитию приложения.

Произведем расчет показателя конкурентоспособности обучающих платформ на базе VR/AR-технологий различных отечественных производителей (табл. 1). Для применения суммы взвешенных показателей как итогового показателя каждому пара-

метру назначается весовой коэффициент, например, методом экспертных оценок, в соответствии с заданными шкалами от 1 до 10, где 1 – очень низкая оценка, 10 – очень высокая оценка (стоит помнить, что результаты могут быть сильно искажены, если какой-либо критерий оказался заведомо слишком важным или, наоборот, слишком неважным).

Таблица 1

**Результаты оценки конкурентоспособности
дифференциальным методом**

№ параметра	Вес, %	Юнитера Лабс	VR CORP	CROC VR	VR Concept	Ланит Терком	Технологии 3D
1	9	7	7	8	9	7	7
2	8	8	9	9	9	8	8
3	6	4	5	5	7	6	5
4	5	4	5	5	6	5	6
5	5	3	4	5	6	5	4
6	10	3	3	5	8	5	5
7	8	5	4	4	7	6	5
8	4	6	7	7	8	7	7
9	9	6	8	9	9	7	8
10	7	6	8	8	9	6	7
11	2	5	6	6	7	6	6
12	3	6	6	7	7	5	6
13	3	5	6	8	8	6	7
14	4	7	8	8	8	6	7
15	3	6	7	7	8	6	7
16	6	8	8	9	9	7	7
17	5	6	8	8	8	7	8
18	3	8	8	9	9	8	8
Итоговый ПК:		5,67	6,41	7,02	8,03	6,32	652

В пределах комплексного метода для расчета групповых показателей конкурентоспособности для каждой из компаний необходимо выбрать набор параметров и провести оценку по

каждому из них [4]. В качестве примера можно использовать следующие нормативные, технические и экономические параметры:

1. Нормативные параметры ($I_{н.п.}$): соответствие международным стандартам качества, наличие сертификатов и лицензий на разработку и продажу ПО для VR/AR, соответствие законодательству в области защиты данных и конфиденциальности.

2. Технические параметры ($I_{т.п.}$): количество поддерживаемых платформ и устройств, уровень графической оптимизации приложений, наличие возможности кастомизации приложений.

3. Экономические параметры ($I_{э.п.}$): цена на разработку приложений, цена на поддержку и обслуживание ПО, размер компании и количество сотрудников.

Для данного случая будем считать изделием-образцом компанию VR Concept, так как она получила наибольший балл по показателю конкурентоспособности в табл. 1. С помощью метода синтеза весовых коэффициентов на основе матрицы парных сравнений определяем весовые коэффициенты параметров: нормативный параметр – 0,4; технический параметр – 0,3; экономический параметр – 0,3.

Результаты расчетов показателя конкурентоспособности обучающих платформ различных отечественных производителей при комплексном методе занесем в табл. 2 (где K – интегральный показатель изделия по отношению к изделию-образцу).

Таблица 2

Результаты оценки конкурентоспособности комплексным методом

Параметры	Вес	Юнитера Лабс	VR CORP	CROC VR	VR Concept	Ланит Терком	Технологии 3D
$I_{н.п.}$	0,4	7	10	7	6	8	6
$I_{т.п.}$	0,3	6	9	6	7	8	7
$I_{э.п.}$	0,3	5	8	7	9	6	8
K	1	0,67	1	0,74	0,79	0,81	0,76

Результаты анализа на основе комплексного метода оценки конкурентоспособности позволяют сделать некоторые частные выводы:

1. Не всегда возможно формализовать все критерии для оценки конкурентоспособности в рамках единой математической модели.

2. Выбор и взвешивание критериев является субъективным процессом, который может привести к искажению результатов.

3. Невозможность учесть все факторы, влияющие на конкурентоспособность продукции, так как это требует больших временных и финансовых затрат.

Так, при одновременном использовании вышеупомянутых двух методов мы производим анализ, который позволяет оценить продукт не только по его отдельным характеристикам, что может быть недостаточным при анализе продуктов с большим количеством функций и особенностей, но и в целом, учитывая все его особенности.

В некотором смысле комбинированный метод оценки конкурентоспособности можно рассматривать как комбинацию дифференциального и комплексного методов, так как он включает в себя как количественные, так и качественные оценки, а также учитывает важность каждого параметра. Однако, в отличие от дифференциального и комплексного методов, комбинированный метод требует от пользователя дополнительных знаний о технических характеристиках исследуемых изделий и методах анализа.

Для корректной оценки используется достаточно большое количество параметров, что усложняет процесс оценки для простых пользователей, поэтому требуется определенный уровень экспертизы в области анализа рынка и технологий, а также знания в области статистики и математического моделирования.

Литература

1. **Моравель В.И., Борисов В.А.** Технологии виртуальной и дополненной реальностей в энергетике // Современные научные исследования и инновации. 2022. № 6 [Электронный ресурс]. Доступ <https://web.snauka.ru/issues/2022/06/98556>.

2. **Колотыгин В.С., Потапчук Д.Ю.** Использование технологий виртуальной и дополненной реальности при подготовке оперативного персонала. 2018. С. 289–290.

3. **Попова И.Н., Зинцова М.В.** Методика определения интегрального показателя конкурентоспособности // Интернет-журнал Науковедение. 2015. № 1 (26).

4. **Лазарева И.П.** Оценка конкурентоспособности внедряемых в производство новаций // Фундаментальные исследования. 2015. № 2–4. С. 759–763.

*М.Г. Баширов, eapp@yandex.ru,
И.Г. Юсупова, ilvina011@mail.ru,
Д.Ш. Акчурин, akihiro177@mail.ru,
ИНН УГНТУ, г. Салават*

ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Конец 20 и начало 21 века совпали с началом глубокой модернизации энергетических систем большинства индустриально развитых стран, с использованием инновационной организационно-технологической платформы Smart Grid, являющейся единым энергоинформационным комплексом с интеллектуальным управлением и непрерывным контролем технического состояния и режима работы всех его элементов. Помимо снижения стоимости производства и передачи электрической энергии и повышения надежности электроснабжения, результатом внедрения новой концепции является существенное снижение технических и коммерческих потерь при транспортировке электроэнергии.

Электроэнергетический комплекс России тоже подключился к процессу интеллектуализации. Инновационная научно-техническая политика в электроэнергетике вошла в число основных составляющих государственной энергетической политики. Изданы распоряжения и постановления Правительства РФ, направленные на реализацию электросетевого комплекса страны по технологии «умных» электрических сетей. Разработаны «Концепция построения интеллектуальной энергетической системы с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС)» и «Концепция реализации национального проекта «Интеллектуальная энергетическая система России». Существующая энергетическая система России будет трансформироваться в инфраструктуру нового типа – интеллектуальную энергосистему.

В настоящее время в г. Уфе реализован пилотный проект по переходу электроэнергетики на интеллектуальные сети. Для эксплуатации и обслуживания ИЭС ААС необходим персонал, который помимо электроэнергетической подготовки обладает знаниями, умениями и навыками в смежных областях, таких как компьютерные сети и информационные технологии, микропроцессорная техника, способен объединить и эксплуатировать новую информационно-измерительную и вычислительную технику в рамках традиционной инфраструктуры электрических сетей и осуществлять интегрированное управление ресурсами. Все это требуют качественно нового уровня подготовки работников, переобучения действующих сотрудников, изменения подходов к обучению. Правительство РФ стимулирует подготовку специалистов для «умных» электроэнергетических комплексов через систему грантов для вузов.

Институт нефтепереработки и нефтехимии в г. Салавате в составе УГНТУ участвует в реализации гранта в форме субсидий из федерального бюджета на подготовку бакалавров и магистров по профилю «Искусственный интеллект» (шифр конкурса 2021-ИИ-01). В рамках этого гранта с 2022 г. начата подготовка магистров по программе «Интеллектуальные средства и системы управления, за-

щиты и диагностики электроэнергетических комплексов» направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» – программе опережающей подготовки специалистов для интеллектуальных электроэнергетических комплексов.

Содержание образовательной программы соответствует современному состоянию и перспективным направлениям развития интеллектуальных электроэнергетических комплексов, содержащих активно-адаптивные электрические сети и альтернативные источники электрической энергии. Целью магистерской программы является подготовка высококвалифицированных специалистов, обладающих знаниями, умениями и навыками для разработки, проектирования, наладки и эксплуатации интеллектуальных средств и систем управления, защиты и диагностики электроэнергетических комплексов. В рамках программы рассматриваются современные тенденции развития электроэнергетических комплексов с интеллектуальными средствами и системами управления, защиты и диагностики, программное и аппаратное обеспечение. Обучающийся получает знания и навыки организации информационного обмена как внутри одного электроэнергетического объекта, так и на уровне электроэнергетической системы. Полученные знания и навыки позволяют выпускнику осуществлять научный поиск новых решений в области разработки и применения интеллектуальных технических и программных средств управления, защиты и диагностики, руководить процессом проектирования интеллектуальных электроэнергетических комплексов. Выпускник готов к выполнению профессиональных функций системного инженера интеллектуальных электроэнергетических комплексов, специалиста в области эксплуатации и диагностики интеллектуальных электроэнергетических систем и электрооборудования, проектировщика интеллектуальных электроэнергетических комплексов, специалиста в области электроэнергетики и цифровых технологий, «умной» энергетики, заниматься преподавательской деятельностью в высших и средних учебных заведениях.

Профильными дисциплинами магистерской программы являются: Математическое моделирование технических систем; Теоретические и экспериментальные методы научных исследований; Защита объектов интеллектуальной собственности; Энергосбережение в электротехнических комплексах; Методология проектирования в электроэнергетике и электротехнике; Микропроцессорные системы управления электроэнергетическими комплексами; Цифровые подстанции; Информационные и коммуникационные сети электроэнергетических систем; Проблемы искусственного интеллекта, распознавание образов; Компьютерные средства разработки систем искусственного интеллекта; Мультиагентные системы искусственного интеллекта; Применение методов искусственного интеллекта в электроэнергетике; Искусственный интеллект в системах управления, защиты и автоматизации электрических сетей; Интеллектуальные системы диагностики электроэнергетических комплексов; Интеллектуальные средства управления режимами систем электроснабжения; Интеллектуальные системы поддержки принятия решений и экспертные системы.

Для реализации данной магистерской программы необходимы учебные лаборатории по группе спецдисциплин, оснащенные лабораторными установками с элементами искусственного интеллекта. Анализ продукции отечественных производителей учебного оборудования показал, что в настоящее время такие лабораторные установки отсутствуют, поэтому было решено, что целесообразно разработать цифровые двойники существующих лабораторных стендов с физическими моделями систем электроснабжения, дополнив их интеллектуальными системами управления на основе нейронных сетей [1–4]. Физические модели систем электроснабжения и их цифровые двойники объединяются в учебно-исследовательский лабораторный комплекс по принципу организации мультиагентных систем искусственного интеллекта. Лабораторные работы разрабатываются в формате проектного обучения бригадами из 3 магистрантов под руководством преподавателей, ответственных за соответствующие дисциплины.

Магистранты участвуют в создании лабораторных установок от идеи до полной готовности к использованию в учебном процессе. Инновационность разрабатываемых лабораторных установок предусматривает вовлеченность обучающихся в исследовательскую и проектную деятельность в области цифровых компетенций и искусственного интеллекта. Результатами исследовательской деятельности обучающихся являются научные статьи, заявки на выдачу патентов на изобретения и свидетельств на программы для ЭВМ.

Магистранты первого набора в процессе создания лабораторного комплекса получают необходимые профессиональные теоретические знания и практические умения и навыки. Магистранты следующих наборов получают возможность выполнения полноценных лабораторных работ по спецдисциплинам программы и прохождения производственных практик непосредственно в лаборатории института.

Очевидно, что невозможно подготовить хорошего специалиста, который знаком с объектами профессиональной деятельности только в виде их компьютерных моделей, на лабораторных занятиях обучающиеся должны иметь возможность работы с реальным промышленным электрооборудованием, получать тактильные ощущения и практические навыки работы с инструментом и измерительными приборами. Для достижения этой цели лабораторный комплекс дополнен средствами защиты и управления отечественных производителей ПК «ОВЕН», ООО НПП «Микропроцессорные технологии», стендами с промышленным электрооборудованием во взрывозащищенном исполнении производства компании «ГОРЭЛТЕХ» и стендом «Интеллектуальная система учета, контроля и управления потреблением электроэнергии» производства ООО «МИЛУР ИС». Цифровые двойники лабораторных стендов позволяют проводить лабораторные занятия в дистанционном формате с использованием online доступа через сеть Интернет, что является актуальным в условиях сетевого обучения студентов, для заочной формы обучения студентов и для лиц с ограниченной мобильностью.

Функционирование интеллектуальной системы рассмотрим на примере управления потерями в линии электропередачи цифрового двойника лабораторного стенда «Модель электрической системы».

По результатам выполнения опытов с использованием физического стенда и его цифрового двойника формируется база данных для обучения искусственной нейронной сети. На рисунке 1 представлена функциональная схема интеллектуальной системы управления потерями в линии электропередачи. Регрессионная нейронная сеть обрабатывает входные данные и выдает вероятностные значения параметров элементов продольной и поперечной компенсации, позволяющих оптимизировать потери при текущих значениях параметров комплексной нагрузки. На основании этих значений формируется сигнал в систему управления, которая корректирует параметры элементов компенсации цифрового двойника, тем самым оптимизируя величину потерь [4, 5].

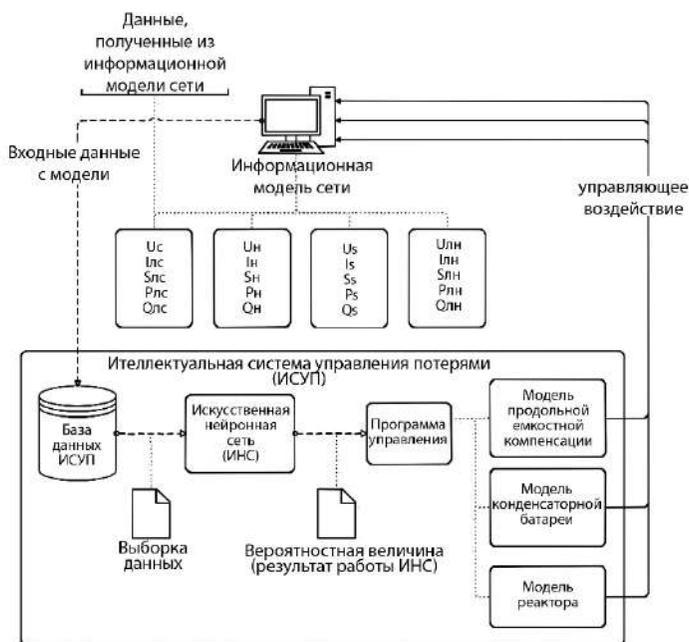


Рис. 1. Функциональная схема интеллектуальной системы управления потерями в линии электропередачи

Результатом использования учебно-исследовательского комплекса является повышение качества подготовки магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника», адаптация их к трудовой деятельности в условиях активно-адаптивных электрических сетей с интеллектуальными системами управления, защиты и диагностики.

Работы по созданию лабораторного комплекса ведутся в соответствии с Программой развития Уфимского нефтяного университета на 2021–2030 годы в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет–2030» с использованием методических разработок победителя грантового конкурса для преподавателей магистратуры 2021/2022 Стипендиальной программы Владимира Потанина.

Литература

1. **Баширов М.Г., Хафизов А.М., Адельгужин Р.Р.** Цифровой двойник лабораторного комплекса с регулятором на основе нечеткой логики // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 3 (49). С. 108–113.

2. **Баширов М.Г., Шван М.Ф., Ахметшина Э.И., Хакимов А.Ф.** Разработка цифрового двойника учебного лабораторного комплекса «Интеллектуальная система энергоснабжения предприятия» // Components of Scientific and Technological Progress. 2023. № 6. С. 138–141.

3. **Баширов М.Г., Акчурин Д.Ш., Коновалов Э.А.** Разработка цифровых двойников объектов электроэнергетики и виртуального учебно-исследовательского комплекса для подготовки специалистов в области электроснабжения // Фёдоровские чтения – 2021. LI международная научно-практическая конференция с элементами научной школы для молодежи. 2021. С. 65–72.

4. **Баширов М.Г., Ахметшина Э. И., Хакимов А.Ф., Шван М.Ф.** Разработка модели активно-адаптивной электрической сети с интеллектуальным управлением // Наука. Технология. Производ-

ство – 2023: материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 75-летию ООО «Газпром нефтехим Салават». 2023. С. 94–96.

5. **Баширов М.Г., Ахметшина Э.И., Хакимов А.Ф., Шван М.Ф.** Разработка нейронной сети для управления учебно-исследовательским лабораторным комплексом // Наука. Технология. Производство – 2023: материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 75-летию ООО «Газпром нефтехим Салават». 2023. С. 188–191.

*Ю.С. Васильева, jtrof@yandex.ru,
В.В. Семикашев, vv_semikashev@mail.ru
ИНП РАН, Москва*

ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ВХОЖДЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ КОМИ И АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ В ЦЕНОВУЮ ЗОНУ ОПТОВОГО РЫНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И МОЩНОСТИ (ОРЭМ)

Либерализация электроэнергетики 2000-х годов не затронула Республику Коми, Архангельскую область, а также Дальневосточный федеральный округ (далее также – территории). Причиной стала неразвитая сетевая инфраструктура и высокие издержки на производство электроэнергии и поддержание мощности. Их называют технологически изолированными территориями (рис. 1) и неценовыми зонами (НЦЗ), поскольку здесь сохранилось тарифное ценообразование.

На остальной части страны, за исключением изолированных энергорайонов, функционирует оптовый рынок электроэнергии и мощности (ОРЭМ). Он разделен на две ценовые зоны (ЦЗ).

В середине 2022 г. на Восточном экономическом форуме Министр энергетики анонсировал вхождение неценовых зон в ценовые. В интервью Н.Г. Шульгинов сказал, что целью мероприятий является усиление конкуренции на рынке, и, как следствие, привлечение инвестиций в развитие объектов энергетики и создание

условий для повышения энергоэффективности. Сейчас на территориях неценовых зон, особенно на Дальнем Востоке, нет условий для снижения затрат из-за госрегулирования цен. По данным газеты «Коммерсант» [1], установленных тарифов зачастую не хватает для ремонта ТЭС.

Постановление Правительства РФ про объединение НЦЗ и ЦЗ вышло в июле 2023 г. Расширение конкурентного оптового рынка начнется с 2024 г. Республику Коми и Архангельскую область с общей установленной мощностью 2,7 ГВт (1,1% всей установленной мощности ЕЭС) предлагается присоединить к Первой ценовой зоне (Европа и Урал).



Рис. 1. Территориальная структура зон ОРЭМ

Энергетические компании регионов сразу перейдут к торговле по договорам оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ). Для территорий НЦЗ Дальнего Востока будет осуществлен плавный переход с окончанием в 2028 г. Поскольку первыми к рыночному ценообразованию перейдут Республика Коми и Архангельская область, рассмотрим последствия объединения на основании данных по этим двум субъектам.

Впервые переход территорий в ценовые зоны энергорынка обсуждался на уровне Правительства в 2016 г. Тогда местные власти высказались отрицательно, ссылаясь на высокую вероятность резкого скачка цен на ресурсы в регионах. Архангельская область занимает 76 место из 85 по качеству жизни в Рейтинге РИА, Республика Коми – 69 место. Это делает экономику данных территорий чувствительной даже к незначительным скачкам цен на ресурсы.

За прошедшие семь лет в Республике Коми и Архангельской области были реализованы обширные мероприятия по повышению энергоэффективности. В регионах активно проходит газификация. Часть нагрузки по отоплению перекинута на котельные. Выводятся из эксплуатации неэффективные ТЭЦ. Производственные компании разрабатывают собственные инвестиционные программы для повышения энергоэффективности объектов энергетики и сокращения производственных затрат. Развивается и обновляется сетевая инфраструктура.

Данные мероприятия приносят положительный эффект в виде снижения затрат на производство электроэнергии в сравнении с 2012 г. (табл. 1). Как следует из таблицы, энергоемкость ВРП в Республике Коми за 9 лет снизилась на 38%, ежегодное снижение составило 5%. По Архангельской области за этот же период показатель сократился на 55%, ежегодное снижение составило 9%.

Таблица 1

Энергоемкость ВРП (валового регионального продукта, в текущих ценах), кг у.т./ 10 тыс.руб.

Название региона	2012	2016	2021	CAGR ¹ , %
Республика Коми	215,25	186,05	136,85	–5
Архангельская область	202,27	133,97	90,47	–9

Источник: Росстат

¹ Совокупный среднегодовой темп роста. Показывает, на сколько процентов за год изменяется изучаемый параметр.

Рынок электроэнергии и мощности. Сейчас в НЦЗ применяется следующий порядок расчётов. Регулируемые цены (тарифы) ежегодно устанавливаются ФАС России. В НЦЗ расчёты производятся по так называемым «четырёхсторонним договорам купли–продажи» электроэнергии и (или) мощности. Это значит, что производитель электроэнергии заключает договоры с АО «АТС», АО «ЦФР» и каждым потребителем своего региона.

Объёмы поставки определяются АО «АТС» на основании сводного прогнозного баланса и результатов данных за период о поставках электроэнергии (мощности), полученных от АО «СО ЕЭС». Конечная стоимость ресурсов рассчитывается им же по итогам торгов за месяц на основании Договора о присоединении к торговой системе ОРЭМ отдельно для каждого участника рынка. Например, произведенная в Архангельской области электроэнергия продается исключительно потребителям Архангельской области.

Для ценовых зон (ЦЗ) применяется принципиально иной подход к определению стоимостных параметров купли–продажи электроэнергии (мощности) [2]. На ОРЭМ электроэнергия торгуется в четырех секциях. Первые две конкурентные: рынок на сутки вперед (РСВ) – аналог day-ahead-market PJM² и балансирующий рынок (БР). Две других, цены в которых определяются независимо от ОРЭМ: тарифные регулируемые договоры (РД), прямые свободные договоры (СДД). В каждой секции действует своя система расчёта объёмов ресурсов, стоимостных параметров, цен и договоров.

Крупнейшая секция – РСВ (64% от оборота электроэнергии ОРЭМ³). Основой является конкурентный отбор заявок поставщиков и покупателей рынка по принципу определения точки пересечения кривых спроса и предложения (равновесная цена). Ценовая

² PJM является сокращением из первых букв названий штатов Пенсильвании, Нью-Джерси и Мэриленда – территорий, где объединились первые энергетические компании.

³ Данные Ассоциации «Совет рынка» за 2022 г.

заявка на продажу электроэнергии в РСВ формируется на уровне переменных расходов по производству электроэнергии (в основном это топливная составляющая – удельный расход условного топлива (УРУТ), помноженный на цену топлива⁴). Таким образом, конкурентный отбор проходят наиболее эффективные электростанции.

Мощность торгуется в шести секциях:

- конкурентный отбор мощности (КОМ) – оплата поддержания в рабочем состоянии мощности станций, прошедших отбор; исходя из предельного уровня ожидаемого спроса АО «СО ЕЭС» ежегодно определяет единую цену по ЦЗ для заданного года поставки мощности. КОМ долгосрочный, проводится на 4 года вперед (29% всей мощности ОРЭМ); включает КОММОД – оплату модернизации мощности станций, прошедших отбор (0,7% мощности);

- договоры о предоставлении мощности (ДПМ) – инвестиционные договоры по оплате новой мощности (14,5%),

- тарифные регулируемые договоры (РД) – оплата мощности по тарифу для поставки населению (25% мощности);

- свободные договоры с независимой ценой (СДМ) – оплата мощности с целью поддержания ее в рабочем состоянии, проходит вне ОРЭМ, цены устанавливаются сторонами договора (23%);

- вынужденный режим (ВР) – оплата «дорогой» в обслуживании старой мощности, необходимой ЕЭС для ее функционирования, не проходит в КОМ из-за высокой цены 1 МВт (1,2%);

- тарифные НЦЗ (четырехсторонние договоры) – оплата мощности электростанций, функционирующих в НЦЗ (7% мощности).

Оценка ценовых последствий перехода в ОРЭМ. Было произведено сравнение тарифов на электроэнергию и мощность электростанций НЦЗ с аналогичными рыночными параметрами, по которым рассчитываются производственные компании 1 ЦЗ (табл. 2).

⁴ Регламент подачи ценовых заявок участниками оптового рынка (Приложение 5 к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка).

**Сравнение тарифов (цен) продажи электроэнергии
с индикатором рыночной цены, рассчитанным АО «АТС»**

Субъект ОРЭМ, функционирующий на территории Архангельской области и Республики Коми	Наименование генерирующих объектов	Тарифная ставка на электрическую энергию, руб./МВт·ч (без НДС)	Прогноз индекса РСBSell на 2023 г., руб./МВт·ч (без НДС)	Превышение тарифа над рыночной ценой электроэнергии, %
ПАО "ТГК-2"	Архангельская ТЭЦ	2 041,01	1 510,00	35%
	Северодвинская ТЭЦ-1	1 877,21		24%
	Северодвинская ТЭЦ-2	2 179,44		44%
АО "ГТ Энерго"	Вельская ГТ ТЭЦ	1 885,08		25%
ПАО "Т Плюс"	Интинская ТЭЦ	3 573,99		137%
	Сосногорская ТЭЦ	1 796,20		19%
ООО "Воркутинские ТЭЦ"	Воркутинская ТЭЦ-2	1 978,14		31%
АО "Интер РАО-Электрогенерация"	Печорская ГРЭС	1 358,77	-10%	

Источники: Приказ ФАС России от 29.11.2022 г. № 904/22 о ценах (тарифах) на энергию (мощность), поставляемую в неценовых зонах оптового рынка, на 2023 г.; сайт Ассоциации «НП Совет рынка»; сайт АО «СО ЕЭС».

Как следует из табл. 3, в 2023 г. цена КОМ существенно ниже (в отношении Северодвинской ТЭЦ-1, Вельской ГТ ТЭЦ, Воркутинская ТЭЦ-2 и Интинской ТЭЦ – в разы ниже) тарифной ставки на мощность, рассчитанной ФАС и учтенной при определении конечных цен на электроэнергию (мощность). Для сохранения рентабельности им придется повышать свою эффективность, искать способы привлечь инвестиции для модернизации.

**Сравнение тарифов (цен) продажи мощности
с рыночной ценой, рассчитанной АО «СО ЕЭС»**

Субъект ОРЭМ, функционирующий на территории Архангельской области и Республики Коми	Наименование генерирующих объектов	Тарифная ставка на мощность, руб./МВт в месяц (без НДС)	Цена КОМ на 2023 год, руб./(МВт) в месяц (без НДС)	Превышение тарифа над рыночной ценой мощности, %
ПАО "ТГК-2"	Архангельская ТЭЦ	309 493,88	171 123,03	81%
	Северодвинская ТЭЦ-1	352 960,26		106%
	Северодвинская ТЭЦ-2	288 936,43		69%
АО "ГТ Энерго"	Вельская ГТ ТЭЦ	797 048,92		366%
ПАО "Т Плюс"	Интинская ТЭЦ	466 229,35		172%
	Сосногорская ТЭЦ	306 442,52		79%
ООО "Воркутинские ТЭЦ"	Воркутинская ТЭЦ-2	424 056,41		148%
АО "Интер РАО-Электрогенерация"	Печорская ГРЭС	150 960,77	-12%	

Источник: Приказ ФАС России от 29.11.2022г. №904/22 о ценах (тарифах) на энергию (мощность), поставляемую в неценовых зонах оптового рынка, на 2023 год; сайт Ассоциации «НП Совет рынка», сайт АО «СО ЕЭС».

Ярким примером такого положения на ОРЭМ является Кольская АЭС Концерна Росэнергоатом. Находясь в рынке, из-за сетевых ограничений станция недозагружена и вырабатывает минимальный объем электроэнергии. Показатели рентабельности низкие, экономика станции тоже неудовлетворительна.

Ситуация может улучшиться после строительства в Мурманской области СПГ-завода НОВАТЭКа. Рядом с АЭС появится крупный потребитель электроэнергии и мощности [3]. Рентабельность

бизнеса пойдет вверх. Правда, для обеспечения завода мощностью ПАО «Россети» планируют масштабную инвестиционную программу по обновлению сетевой инфраструктуры региона. Источником станет повышение тарифа. Как следствие, конечные цены в Мурманской области возрастут. Альтернативным вариантом могло бы стать финансирование проекта самим НОВАТЭКом. Актуальность введения такой форма инвестиционного партнерства обсуждалась на Российской энергетической неделе⁵ 2023 г.

В отношении потребителей НЦЗ эксперты Совета рынка считают, что роста цен на электроэнергию (мощность) не произойдет. С 2024 г. вводится дополнительный механизм, «сдерживающий» рост конечных цен: до 2026 г. (включительно) в регионах мощность будет оплачиваться по уже определенной цене КОМ 1 ЦЗ, которая не учитывает «дорогие» электростанции Республики Коми и Архангельской области

Очевидным плюсом для крупных предприятий регионов станет доступность более дешевой электроэнергии и мощности ОРЭМ. Это повысит прибыльность компаний в условиях нестабильной экономической среды. Платежи населения не изменятся. Для мелкого и среднего бизнеса прогноз ситуации на розничных рынках территорий выглядит следующим образом. В 2023 г. одноставочная цена продажи электроэнергии с учетом мощности (единая цена электроэнергии в сумме с мощностью для розничных потребителей) в НЦЗ ниже, чем в ЦЗ. Так, в 2022 г. в Республике Коми она составила 2,3 руб/кВт·ч, в Архангельской области – 2,6 руб/кВт·ч, а в европейской части РФ и на Урале (1 ЦЗ) – 2,7 руб/кВт·ч. Вместе с тем в конечной цене розничного рынка территорий высокую долю занимает сетевая составляющая. Так, в Архангельской области конечная цена в сумме с затратами на содержание сетей уже 6,3 руб/кВт·ч, а в европейской части и на Урале (1 ЦЗ) – 5,26 руб/кВт·ч. Такая разница в показателях сигнализирует о необходимости инвестиций в сетевую

⁵ Сессия ЭН+ «Развитие энергетики: кто инвестор?» на Российской энергетической неделе <https://rusenergyweek.com/programme/business-programme-2023/>

инфраструктуру региона. Вхождение НЦЗ в ЦЗ и пересмотр структуры ОРЭМ этот вопрос не решит. Он затрагивает проблемы розничных рынков и требует решений на уровне Правительства.

Заключение. В настоящее время эксперты отрасли не могут однозначно спрогнозировать ценовые последствия расширения рынка на всю страну. По прогнозам Ассоциации «НП Совет рынка» не ожидается роста ценовых параметров в результате объединения двух зон. Но никто не говорит об улучшении рентабельности электроэнергетики в регионах НЦЗ. Наоборот, эксперты ожидают снижения КИУМ электростанций региона.

Каким образом улучшится инвестиционный климат – также не ясно. Эксперты считают, что малое число субъектов энергетики, функционирующих на данных территориях, воспрепятствует ожидаемому росту конкуренции. Все плюсы конкуренции ОРЭМ зависят от качества работы сетевой инфраструктуры региона, а оценить этот параметр сейчас сложно. Многие зависят от расчётов модели РСВ и реальных режимных ситуаций.

Можно предположить, что включение электростанций территорий в конкурентный механизм КОМ и нерыночный ВР позволит повысить качество реализации ремонтных мероприятий, а конкурентный отбор мощности для целей модернизации (КОММОД) решит вопрос с ускоренным внедрением технологий энергоэффективности.

Литература

1. **Смертина П., Ишмухамметов Ф.** Дальний Восток освобождают от тарифа // URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5722122?ysclid=lje9p2zbc0858808757> (дата обращения 24.06.2023).

2. **Васильева Ю.С., Семикашев В.В.** Инвестиционная деятельность в электроэнергетике России в 1990–2020 гг. (часть 1, часть 2) // Стратегическое планирование и развитие предприятий. Материалы XXIII Всероссийского симпозиума, 2022. С. 336–342.

3. **Ивантер А.** «Мурманский СПГ»: заполярный матч со многими неизвестными // Эксперт. 2023. № 38. С. 19–21.

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ ПРЕДПРИЯТИЙ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ПРОГРЕССИВНОМ БИЗНЕС-УКЛАДЕ

Химическая промышленность является одним из ключевых видов деятельности человечества, формирующих облик цивилизации. Технологии химической промышленности участвуют в формировании ядра технологического уклада [1], влияя на контуры других отраслей, являющихся поставщиками ресурсов и потребителями её результатов. Ресурсы, которыми обусловлено функционирование предприятий химической промышленности, подразделены на технологические (для реализации физики процессов, непосредственно для синтеза новых веществ) и энергетические (для выработки тепла и электроэнергии).

В химико-технологических процессах используются разнообразные формы энергии, сами процессы проходят как с её поглощением, так и с выделением. Факторы, структура, показатели энергоиспользования в химической промышленности (источники энергоносителей, цепочки поставок, энергоёмкость производства единицы продукта, потребляемая электрическая мощность и другие характеристики оборудования) являются одним из аспектов её экономической и экологической устойчивости. При этом снижение энерго- и материалоёмкости химического производства очевидно повышает конкурентоспособность его продукции. О конкурентоспособности также свидетельствует уровень технологического уклада предприятий: они приобретают существенные конкурентные преимущества при переходе на прогрессивный технологический уровень [2, 3]. Ключевым в определении уровня развития технологического уклада является именно энергетический аспект [4, 5].

Отраслевой переход к новому технологическому укладу затрагивает не только смену технологического ядра, но и качественное изменение систем менеджмента и требования к ресурсам, в том числе к профессиональным компетенциям работников, поэтому в дальнейшем целесообразно пользоваться термином «бизнес-уклад», включающем в себя три перечисленных аспекта [6, 7]. Структурные и параметрические показатели уровня бизнес-уклада находят своё отражение в интегральном индикаторе устойчивого развития предприятия [7], потому можно говорить об устойчивом организационном развитии как о последовательном росте уровня бизнес-уклада. Смена бизнес-уклада ведёт к переформатированию экономических и социальных отношений, появлению новых контрагентов с новыми свойствами и ролями. Эти изменения существенно меняют целевую структуру межотраслевого взаимодействия [5]. Поэтому, говоря о целях и сценариях развития предприятий химической промышленности, следует учитывать тренды движения к прогрессивному бизнес-укладу в связанных отраслях.

Целевое развитие химической отрасли в контексте 6-го бизнес-уклада предполагает возможность создания новых материалов с заранее заданными [8] либо управляемыми свойствами. Ряд направлений устойчивого развития предприятий химической промышленности обусловлен принципами так называемой «зелёной химии», сформулированными в конце 90-х годов XX века [9]. Эти принципы коррелируют с ESG-концепцией, направляя предприятия химической промышленности к переходу от линейной экономики к экономике замкнутого цикла. В основу безотходного химического производства могут лечь природоподобные технологии [8].

Тренд на декарбонизацию энергетики в контексте развития химической промышленности обусловит отказ от использования ископаемых первичных энергетических ресурсов; нефть и природный газ перейдут в разряд ресурсов исключительно технологических. Объём использования вторичных энергоресурсов будет только возрастать, поддерживая принципы циклической эконо-

мики. Ожидается «водородная революция» [10], призванная существенно снизить экологическое давление промышленной энергетики на окружающую среду. Много говорится об использовании АЭС и ГЭС в период пониженного (ночного) потребления электроэнергии для синтеза водородного топлива [10]. Рассматриваются варианты интеграции химико-технологических процессов с процессами ядерного синтеза на АЭС [11].

Ряд стран (в числе которых мировой лидер энергоиспользования – Китай) провозгласил планы развития своих энергосистем до уровня так называемого «Интернета энергии», сгруппировавшего в себе такие тренды 6-го бизнес-уклада как производство в месте потребления, децентрализация (сетизация) энергетики и промышленности, а также цифровизация экономики. Повсеместная доступность электричества по конкурентной цене диктует направление перехода химической промышленности в сторону электро-технологий.

Интеграция производственных циклов предприятий химической промышленности с поставщиками ресурсов и потребителями продукции потребует качественно нового уровня взаимодействия. Синхронизация планов (или даже принципов) развития предприятий смежных отраслей с сохранением возможности целевого пересмотра цепочек добавленной стоимости формирует требования к системам менеджмента, выводя их на новый уровень – уровень прогрессивного бизнес-уклада. [3].

Результативное достижение выявленных целей и эффективная поддержка трендов перехода на прогрессивный уровень бизнес-уклада определяют необходимость разработки механизма устойчивого развития предприятий химической промышленности, основанного на положениях теории бизнес-укладов.

Литература

1. **Глазьев С.Ю.** Современная теория длинных волн в развитии экономики [Электронный ресурс]. 2012. Режим доступа: <https://glazev.ru/articles/6-jekonomika/54548-sovremennaja-teorija-dlinnykh-voln-v-razvitii-jekonomiki>.

2. **Дранко О.И.** Шестой технологический уклад: некоторые экономические сценарии для предприятий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника, 2018. Т. 18. № 2. С. 131–141.

3. **Крыленко Е.Е.** Техническая политика как основа для оценки устойчивого развития электроэнергетического комплекса // Микроэкономика. 2019. № 2. С. 66–71.

4. **Тульчинская Я.И., Курочкин Д.С.** Методика оценки уровня технологического уклада страны // Наука и образование: хозяйство и экономика; предпринимательство; право и управление. 2013. № 5 (36). С. 20–27.

5. **Ивановская Л. В.** Технологические уклады: скачок в шестой или сползание в четвертый // Вестник университета. 2020. № 4. С. 119–124.

6. **Лозенко В.К.** Эволюция бизнессценариев и бизнес-укладов в экономике. Saarbrücken: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2013. 181 с.

7. **Михеев Д.В.** Метод определения индекса устойчивого развития промышленного предприятия на основе концепции бизнес-укладов и системно-креативного подхода // Инновации в менеджменте. 2017. № 3. С. 48–57.

8. **Хачатуров А.Е., Хачатуров-Тавризян Е.А., Старостенко Л.В.** Инновационное развитие химической промышленности как локомотив неоиндустриализации // Компетентность. 2019. № 6. С. 12–18.

9. **Anastas P.T., Warner J.C.** Green Chemistry: Theory and Practice. New York: Oxford University Press, 1998. P. 30.

10. **Тяглов С.Г., Сурнин А.А.** Современные направления интеграции электрохимии и энергетики РФ // Journal of Economic Regulation (Вопросы регулирования экономики). 2021. № 12 (4). С. 71–79.

11. **Бушуев В.В.** Энергетика будущего: технологическая синергия // Энергетическая политика. 2022. № 2 (168). С. 54–60.

ФАКТОРЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОУКЛАДНЫХ БИЗНЕС-СТРУКТУР

Многоукладные бизнес-структуры формируют строительная отрасль и жилищно-коммунальное хозяйство, соединяя в одну цепочку деятельность организаций, находящихся на разных уровнях бизнес-укладов. Другими словами, в одном жизненном цикле объекта принимают участие компании с различным уровнем технологического оснащения, качества систем управления (рис. 1) и компетенций персонала. Управление и прогнозирование энергоиспользования в таких структурах затруднено ввиду проблем определения локальных и глобальных факторов взаимодействия разноукладных организаций, влияющих на интегральную энергоэффективность жизненного цикла объекта строительства и коммунального хозяйства.

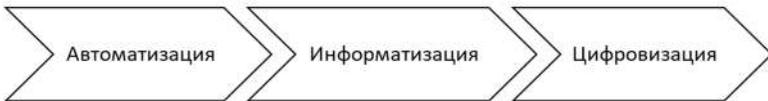


Рис. 1. Стадии перехода на новый уровень управления

Каждая из компонент бизнес-структуры оказывает влияние на энергоэффективность жизненного цикла объекта строительства на разных его стадиях (рис. 2).



Рис. 2. Формирование и изменение энергоэффективности
объекта строительства

Более подробно опишем составляющие алгоритма.

- Планирование энергоэффективности ЖЦ объекта строительства включает проектирование условий энергоиспользования: выбор и балансирование элементов системы энергопотребления и отведения отходов, расчёт энергетических показателей объекта строительства, выбор конструкционных и изоляционных материалов);

- Формирование условий энергоиспользования и энергосбережения происходит на стадии Строительство;

- Энергоиспользование – на стадии Эксплуатация объекта;

- Поддержание энергоэффективности включает плановое обслуживание систем энергоснабжения, отведения, кондиционирования, освещения), в нем можно выделить следующие аспекты:

- энергосбережение (соблюдение режимов целесообразного энергоиспользования при реализации вспомогательных процессов – кондиционирование воздуха, освещение и др.);

- восстановление энергоэффективности (ремонт систем энергоснабжения и отведения);

- повышение энергоэффективности и качества энергосбережения (модернизация, реинжиниринг подсистем ЖКХ, капитальный ремонт заданий и сооружений).

Уровни технологического [1] или шире – бизнес-уклада [2] характеризуются различной энергоёмкостью основных и обеспечивающих процессов, различием подходов к учёту ресурсов, энергосбережению, загрузке производственных мощностей, графикам работы энергоагрегатов, организации обслуживания и ремонта основного и вспомогательного оборудования, утилизации отходов. Практика показывает, что чем выше эффективность (в том числе энергетическая) бизнес-системы, тем сложнее устроена её система управления [3]: многокомпонентная, интегрированная, сертифицированная на соответствие лучшим практикам управления, зафиксированным в виде наднациональных стандартов ISO.

Задача управления энергоэффективностью в пределах контура организации на данный момент решена, что нашло отражение в международном стандарте ISO 50000 «Энергоменеджмент». Но планирование и управление энергоэффективностью объекта, стадии жизненного цикла которого контролируются организациями (например, проектными и сервисными) и даже целыми индустриями (например, электроэнергетика, строительство и ЖКХ), находящимися на разных уровнях бизнес-уклада, являются важнейшей задачей на пути к реализации концепции устойчивого развития, особенно в контексте тотальной цифровизации экономики как состояния прогрессивного бизнес-уклада [4].

В электроэнергетике уже имеется инструментарий оценки уровней бизнес-уклада, основанный на анализе потребляемых ресурсов и оценке состояния систем менеджмента [2–5]. Представляется возможным применить его к процессам энергоиспользования и системам управления в ЖКХ, а также процессам формирования условий энергоиспользования в рамках стадий проектирования, строительства и монтажа инженерных систем. Предстоит установить факторы-признаки, а затем уровни бизнес-уклада участников строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства России, выявить и оценить факторы взаимного влияния многоукладных организаций на показатели энергоиспользования, предложить инструмент оценки энергоэффективности полного жизненного цикла объекта строительства и ЖКХ, провести оценку интегрального уровня строительного комплекса и ЖКХ РФ, дать рекомендации по повышению уровня энергоэффективности многоукладных бизнес-структур.

Литература

1. Глазьев С.Ю. Современная теория длинных волн в развитии экономики [Электронный ресурс]. 2012. Режим доступа: <https://glazev.ru/articles/6-jekonomika/54548-sovremennaja-teorija-dlinnykh-voln-v-razvitii-jekonomiki>

2. **Лозенко В.К., Михеев Д.В.** Управление энергоэффективностью и устойчивое развитие организаций. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 285 с.

3. **Крыленко Е.Е.** Методический подход к управлению устойчивым развитием электроэнергетического комплекса России // Микроэкономика. 2019. № 3. С. 45–51.

4. **Грабчак Е.П., Логинов Е.Л., Мищеряков С.В., Чиналиев В.У.** Подходы к интеграции информации о ресурсных и финансовых потоках в топливно-энергетическом комплексе в условиях цифровой трансформации систем управления // Управление. 2020. № 2. С. 13–19.

5. **Гудкова Е.Е., Курочкин Д.С., Рогалев Н.Д.** Подход к обеспечению устойчивого развития реального сектора экономики России // Вопросы экономики и права, 2018. №10 (124). С. 53–57.

Секция 2

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ МЕТОДЫ, ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ

*А.Ю. Горшенин, ayugorshenin@omgtu.ru,
А.С. Грицай, aleksandr.gritsay@gmail.com,
Л.А. Денисова, denisova@asoiiu.com, ОмГТУ, г. Омск*

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ В ЗАДАЧЕ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

В условиях растущих цен на электроэнергию и нестабильности энергетических рынков становится критически важным правильно прогнозировать потребление электроэнергии. Прогнозирование электропотребления позволяет энергетическим компаниям и регулирующим органам принимать обоснованные решения относительно производства, распределения и ценообразования для электроэнергии.

В последние десятилетия наблюдается постоянный рост цен на электроэнергию по всему миру. Этот рост обусловлен несколькими факторами, включая увеличение спроса на электроэнергию из-за роста населения и расширения промышленности, а также инфраструктурных инвестиций в обновление и модернизацию сетей передачи и распределения электроэнергии. Основными участниками оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ) являются генерирующие компании, сетевые организации, энергопотребители (крупные промышленные предприятия, коммерческие организации и физические лица) и регулирующие органы [1].

Рынок ОРЭМ в России подвергается жесткому государственному регулированию. Цены на электроэнергию на ОРЭМ формируются на основе принципа регулирования спроса и предложения, что означает, изменение цен в реальном времени в зависимости от

текущей ситуации на рынке. Это позволяет достичь баланса между предложением и спросом, что важно для стабильной работы энергосистемы [2].

Прогнозирование способствует более рациональному использованию ресурсов и снижению издержек [3]. Формирование цен на электроэнергию на ОРЭМ в России обеспечивает эффективное распределение электроэнергии и мощности, а также стимулирует инвестиции для обеспечения стабильности энергосистемы страны [4].

Для эффективного краткосрочного прогнозирования потребления электроэнергии, в условиях растущего спроса, необходимо выполнить анализ различных факторов, влияющих на потребление электроэнергии [5–7].

Исследование выполняется в рамках задачи краткосрочного прогнозирования для АО «АтомЭнергоСбыт» в филиале города Мурманска. Использовались исходные данные за период с 2021 по 2023 гг., которые представлены массивом, состоящим из 11688 строк (количество почасовых измерений) и 13 столбцов (ретроспективные измерения электропотребления, метеоданные и технологические параметры). В таблице 1 приведен фрагмент исходных данных.

Таблица 1

Исходные данные для прогнозирования (фрагмент)

Timestamp	W	T	L _d	C _{wd}	N _d	N _m	N _{md}	H	L	φ	W _s	I _h
01.12.2021 0:00	504,3	-8,3	0,032	0	3	12	1	0	1	90	2	1
01.12.2021 1:00	483,7	-7,1	0,032	0	3	12	1	1	1	89,6	3	1
...
30.06.2023 22:00	310,9	8,2	1	0	5	6	30	22	0	72,6	3	0
30.06.2023 23:00	286,8	7,7	1	0	5	6	30	23	0	74,3	3	0

В таблице приняты следующие условные обозначения: Timestamp – отметка времени (момент сбора данных); W – электропотребление, МВт·ч; T – температура окружающей среды, °С; C_{wd} – коэффициент рабочего дня (0, ... , 5), который учитывает рабочие (0), выходные (1), предпраздничные (3), праздничные дни (2), новогодние выходные (4) и нерабочие дни, связанные с событиями пандемии COVID-19 (5), на основе производственных календарей соответственных годов [8]; N_d (N_m , N_{md}) – номер дня недели (месяца, порядковый номер дня в месяце); H – час суток; L – индекс работы городского освещения; φ – относительная влажность воздуха, %; W_s – скорость ветра, м/с; I_h – индекс включения/отключения центрального отопления; L_d – доля длительности светового дня.

Информация о начале отопительного периода и длительности работы городского освещения собирается с официальных источников Мурманской области [9]. Информация о длительности светового дня собирается с информационных сервисов погоды [10], его доля в сутках рассчитывается по формуле:

$$L_d = \frac{\left(\frac{m}{60} + h\right)}{24} \cdot 100,$$

где h – часы продолжительности светового дня; m – дополнительно минуты его продолжительности.

На этапе предварительной обработки данных в задаче краткосрочного прогнозирования электропотребления рассматривается набор входных данных из табл. 1. Выполняется обработка исходных совокупностей с определением пределов варьирования параметров, выявлением выбросов данных, восстановление пропущенных наблюдений. Проводится анализ основных статистических показателей.

Для визуализации областей наиболее достоверных значений (и выявления аномальных) выполнено построение диаграмм размаха, Диаграмма размаха (или так называемый «ящик с усами») представляет собой график, компактно изображающий одномерное

распределение вероятностей параметра (как случайной величины) [11]. Он показывает медиану, нижний (Q_{25}) и верхний квартили (Q_{75}), минимальное и максимальное значение выборки и выбросы.

Диаграмма строится на основании формул:

$$X_1 = Q_{25} - k(Q_{75} - Q_{25}); X_2 = Q_{75} + k(Q_{75} - Q_{25}),$$

где X_1 – нижняя граница уса; X_2 – верхняя граница уса; k – коэффициент (наиболее часто принимается равным 1,5).

На рисунке 1 изображена диаграмма размаха для двух наиболее значимых параметров набора данных: электропотребления W и температуры окружающей среды T . Анализ диаграммы позволяет выявить выбросы в данных измерений температуры и обработать их на начальной стадии.

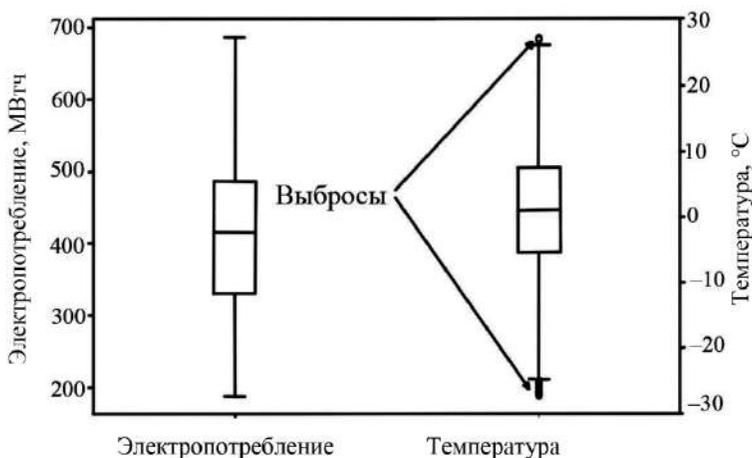


Рис. 1. Диаграмма размаха параметров

В результате предварительной обработки выполнено построение корреляционной матрицы параметров набора данных. С помощью анализа корреляций можно установить, существует ли

зависимость между величинами. Коэффициент корреляции двух случайных величин (x_i и x_j) рассчитывается по формуле [12]:

$$r_{x_i x_j} = \frac{\sum (x_i - M(x_i))(x_j - M(x_j))}{\sqrt{\sum (x_i - M(x_i))^2 \sum (x_j - M(x_j))^2}},$$

где $M(x)$ – математическое ожидание.

После проведения визуального анализа диаграммы размаха основных параметров, обнаружено, что выбросы выделяются как в верхней, так и в нижней части распределения параметра температуры, что говорит об аномальных значениях в этом наборе данных. Такие аномальные значения могут повлечь за собой ухудшение прогнозной способности модели прогнозирования [13], поэтому требуется обработка этих значений. Удаление выбросов производилось методом инквартильного размаха (IQR), формулы вычислений верхней и нижней границы соответственно:

$$L_B = \mu + \sigma\Phi^{-1}(0,25); U_B = \mu + \sigma\Phi^{-1}(0,75),$$

где μ – среднее значение температуры в наборе данных; σ – стандартное отклонение значений температуры; Φ^{-1} – обратная функция кумулятивного нормального распределения для заданной вероятности.

На рисунке 2 представлена полученная в результате обработки карта взаимосвязей параметров набора данных, соответствующая корреляционной матрице параметров. Она представляет собой симметричную квадратную матрицу размером $t \times t$ (t – число параметров набора данных), главная диагональ заполнена единицами, а недиагональные элементы представляют собой коэффициенты корреляции. Для лучшей визуализации накладывается цветовой градиент, соответствующий степени взаимосвязей параметров [14].

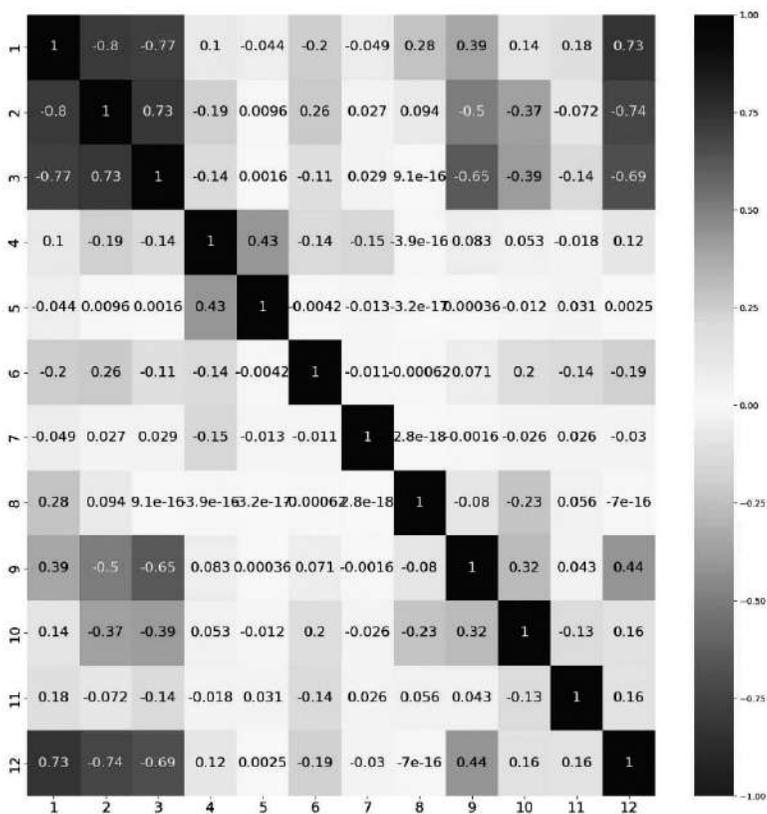


Рис. 2. Карта взаимосвязей параметров набора данных:

1 – W ; 2 – T ; 3 – L_d ; 4 – C_{wd} ; 5 – N_d ; 6 – N_m ; 7 – N_{md} ; 8 – H ;
 9 – L ; 10 – φ ; 11 – W_s ; 12 – I_h

Анализ карты взаимосвязей параметров позволяет выделить следующие зависимости. Электропотребление W имеет сильную отрицательную корреляцию с температурой T ($-0,80$), что говорит о том, что при низких температурах окружающего воздуха возрастает электропотребление, связанное с дополнительным обогревом помещений и увеличением времени использования электроприборов (например, освещение в жилых домах). Также электропотребление W имеет высокую отрицательную зависимость от доли длительности светового дня L_d ($-0,77$).

Присутствует сильная положительная корреляция между индексом включения/отключения центрального отопления I_h и электропотреблением W , что указывает на то, что в периоды включения центрального отопления электропотребление также возрастает.

Таким образом, на основании проведенных исследований выявлены параметры с наибольшими корреляционными связями: электропотребление в большей степени зависит от температуры, длительности светового дня и индекса включения/отключения центрального отопления. Следующим направлением работы является определение объема обучающих выборок для получения краткосрочного прогноза электропотребления.

Заключение. На этапе предварительной обработки данных выполнена статистическая обработка параметров, включая определение пределов варьирования переменных, анализ выбросов. Для визуализации областей с наиболее достоверными значениями были построены диаграммы размаха, что позволило выявить выбросы в данных.

Построена корреляционная матрица параметров набора данных, позволяющая выявить зависимости между переменными. Выявлены следующие зависимости: отрицательная корреляция между электропотреблением и температурой, положительная корреляция между электропотреблением и индексом включения/отключения центрального отопления, отрицательная корреляция между электропотреблением и долей длительности светового дня. Обнаружено, что аномальные значения в параметре температуры окружающей среды могут повлиять на прогнозную способность модели.

Выявленные значимые параметры планируется использовать в качестве входов прогнозирующей модели, а для определения объема обучающих выборок предполагается провести дополнительное исследование.

Литература

1. **Гаак В.К., Гаак А.В., Грицай А.С.** Повышение экономической эффективности теплоисточников и систем теплоснабжения в современных условиях // Промышленная энергетика. 2017. № 12. С. 14–20.

2. **Исаев Ю.Н., Архипова В.З., Ковалев Р.Н., Хамитов Р.Н.** Адаптивное краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии автономными энергосистемами малых северных поселений на основе методов корреляционного анализа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 2. С. 224–239.

3. **Шишкин П.Е.** Влияние точности планирования потребления электроэнергии на ОРЭМ на конечную стоимость электроэнергии // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. № 1. С. 64–69.

4. **Сафронов П.Г.** Способы повышения эффективности работы на ОРЭМ электростанции с высокой степенью автоматизации на примере Харанорской ГРЭС // Энергосбережение и водоподготовка. 2019. № 1(117). С. 10–14.

5. **Глазырин А.С., Боловин Е.В., Архипова О.В., Ковалев В.З., Хамитов Р.Н., Кладиев С.Н., Филипас А.А., Тимошкин В.В., Копырин В.А.** Адаптивное краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии автономными энергосистемами малых северных поселений на основе методов ретроспективного регрессионного анализа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 4. С. 231–248.

6. **Горшенин А.Ю., Денисова Л.А.** Прогнозирование выработки электроэнергии ветроэлектростанций с применением рекуррентной нейронной сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 4. С. 39–45.

7. **Горшенин А.Ю., Денисова Л.А.** Прогнозирование энерговыработки ветроэлектростанцией с использованием искусственной нейронной сети // Информационные технологии и автоматизация управления: Материалы XIII Всероссийской

научно-практической конференции студентов, аспирантов, работников образования и промышленности. Омск: Омский государственный технический университет, 2022. С. 63–69.

8. **Производственные календари** // КонсультантПлюс: URL: <https://www.consultant.ru/law/ref/calendar/proizvodstvennye>.

9. **Администрация города Мурманска** // Официальный сайт администрации города Мурманска: URL: <https://www.citymurmansk.ru/> (дата обращения: 12.09.2023).

10. **Восход и заход солнца** // Datetime: URL: <https://datetime.info/ru/> (дата обращения: 12.09.2023).

11. **Frigge M., Hoaglin D. C., Iglewicz B.** Some Implementations of the Boxplot // The American Statistician. 1989. Vol. 43, Issue 1. P. 50–54.

12. **Кремер Н.Ш.** Теория вероятностей и математическая статистика. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с.

13. **Хамитов Р.Н., Грицай А.С.** Основы рационализации электропотребления на промышленном предприятии: учебное пособие. М.: Инфра-Инженерия, 2023. 100 с.

14. **Сербабов А.С., Чебаненко Е.В., Денисова Л.А., Кролевец Т.С.** Разработка экспертной системы ранней диагностики заболеваний: программные средства первичной обработки и выявление зависимостей // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 179–184.

*А.С. Исаев, isaev.a.s@muctr.ru,
Новомосковский институт РХТУ им. Д.И. Менделеева*

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГРАФИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ

Перспективная оценка объема электропотребления – важная режимная характеристика, позволяющая принимать обоснованные решения по развитию предприятия (организации) и закупке электроэнергии [1]. На сегодня задача краткосрочного (оперативного) прогнозирования электропотребления решается практически

всеми промышленными объектами и учреждениями, связанными с выработкой, передачей, распределением и потреблением электроэнергии. Для построения моделей используются как традиционные методы статистического прогнозирования, так и подходы, используемые в построении моделей современные информационные технологии (интеллектуальный анализ данных *Data Mining*)

Первые работы по прогнозированию электрических нагрузок были опубликованы в первой половине прошлого века [2]. Ряд электропотребления – интегральная (суммарное электропотребление) функция с равноотстоящим дискретным аргументом (момент времени). Особенностью подобных рядов при небольшом шаге является нестационарность – изменение вероятностных характеристик с течением времени. В этих условиях средняя величина не является наиболее вероятной, а характеристики отклонений (дисперсия, среднеквадратичное отклонение) велики. Ранее для подобных рядов использовалась модель проинтегрированного скользящего среднего ARIMA (*Autoregressive Integrated Moving Average*). Но последствия короновирусной пандемии (эффект «длительного воскресенья», обусловленный сокращением производственных мощностей и массовым переходом учреждений на дистанционный режим работы) и современная геополитическая ситуация привели к искажению длительных тенденций формирования временных рядов электрических нагрузок, которые представляют собой в настоящее время стохастические процессы с выраженными эргодическими характеристиками. В этих условиях авторегрессионные методы дают среднюю ошибку прогноза около 15%.

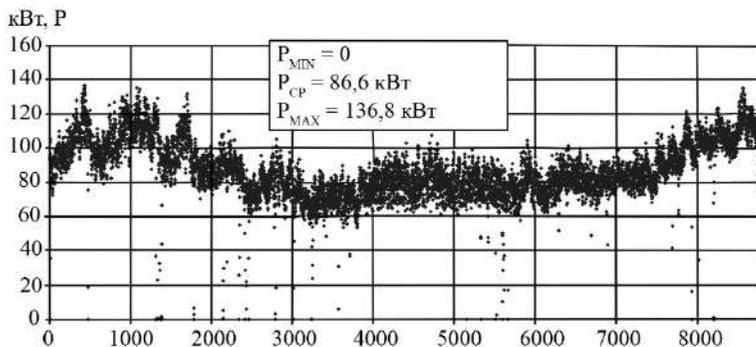
Прогнозирование почасового графика нагрузки с очень высокой точностью было представлено в ряде работ (в частности, [3]) – модуль относительной погрешности составил менее 1%. Не подвергая сомнению представленные результаты, заметим, что прогноз выполнен для относительно стабильного технологического режима объекта прогнозирования (металлургическое производство, работающее в соответствии со своей проектной мощностью). При этом выполнен прогноз «на сутки вперед».

В реальных условиях необходимо прогнозирование на большой период, при этом возникает кумулятивное нарастание ошибки прогноза.

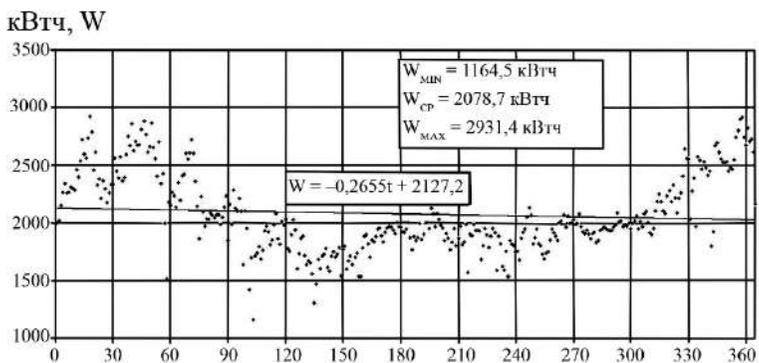
Представляется логичным использование структурных методов, основанных на устойчивых видовых соотношениях в технических системах. В этом случае региональный электротехнический комплекс рассматривается как техноценоз (сложная в кибернетическом смысле система) [4]. Но практически использовать подобные модели для Тульского региона в настоящий момент не представляется возможным – сейчас для значительного числа промышленных объектов Тульской области любая статистическая информация является закрытой.

В [5] выполнено сравнение различных методов применения ANN для прогнозирования суточного графика нагрузки предприятий и региональных энергосистем Китая. Рассмотрены различные модели рекуррентных нейронных сетей (RNN, LSTM, GRU, TCN), отличающиеся принципами обучения и алгоритмами построения. Получена средняя ошибка MAPE около 2% при оптимальных результатах моделей LSTM (*Long short-term memory*) – сеть долгой краткосрочной памяти. При этом показана целесообразность комбинирования моделей на основе трансформации базовых математических методов.

Методы. Целью работы является прогноз почасового суточного графика нагрузки. Объектом исследования является промышленное предприятие Тульской области (Веневский район). Исходные данные за 2022 год приведены на рис. 1. Используются почасовые нагрузки (рис. 1,а – 8760 точек временного ряда), на основании которых определено суммарное суточное электропотребление (рис. 1,б – 365 точек). В настоящий момент энергослужба оценивает электропотребление на перспективу экспертно. Данные отличаются относительно высокой степенью динамики, планировать нагрузку по среднему значению не представляется возможным (в этом случае относительная ошибка более 10%).



а



б

Рис. 1. Исходные временные ряды:

а – почасовой график нагрузки; б – суточное электропотребление

В качестве метода прогнозирования приняты искусственные нейронные сети ANN (*Artificial Neural Network*). Их достоинства – возможность считывания информации непосредственно из системы учета АИИСКУЭ и возможность построения адекватной модели в том случае, если взаимосвязь параметров затруднительно получить или описать функционально. В ка-

честве инструмента принят Matlab. Выбор обусловлен достаточными функциональными возможностями, хорошей поддержкой программного средства (релиз программы в необходимом объеме содержит справочные и демонстрационные материалы), опытом применения программы для широкого спектра задач математического моделирования.

Точность прогноза характеризуется относительной погрешностью, средним модулем относительной погрешности MAPE, среднеквадратичной относительной погрешностью, средней абсолютной погрешностью. Надежность прогноза определяется максимальной относительной погрешностью, распределением ошибок (например, доля относительных погрешностей, превышающих 5%). Считаем, что основными характеристиками корректности построения модели являются MAPE (оценивает точность прогноза) и максимальная относительная ошибка (надежность).

Результаты. Построение модели включает в себя получение и формирование исходных данных, импорт в Matlab, построение и обучение сети, анализ результатов с последующей возможной коррекцией расчетных условий.

Получить приемлемый результат на основе прогноза суточного электропотребления с последующим «распределением» по часам не удалось. Суммарное суточное электропотребление проявляет устойчивость и высокую степень инерционности – прогнозируется с погрешностью менее 1%. Но получить типичный суточный график не удалось, данные характеризуются высоким разнообразием.

Для модели нейронных сетей исходный временной ряд пронормирован и верифицирован (нулевые значения заменены расчетными, которые получены аппроксимацией). Исходная информация содержится в электронном процессоре MS Excel – экспорт в Matlab осуществляется непосредственно с открытием файла и формированием данных в виде переменной.

Базовая модель (рис. 2) содержит во входном слое 24 переменных (нагрузки предшествующих 24 часов) и вектор смещения $\theta_{\text{смещ}}$ (информация о дне недели и месяце), выходной слой – значение нагрузки расчетного часа. Функция активации выходного слоя выбрана линейная, входного – нелинейная (в модели – сигмоидная). Наилучшие результаты (по времени расчета, количественно результаты прогнозирования сопоставимы) показал алгоритм Левенберга-Марквардта.

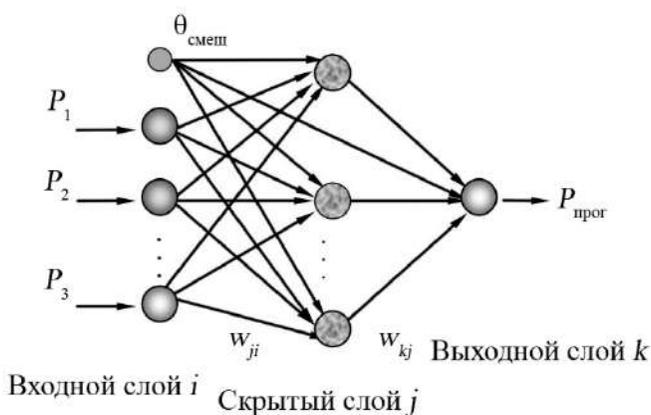


Рис. 2. Структура сети

Формирование и обучение сети выполняется интерактивно (GUI-интерфейс *NNtool* – запуск менеджера сети *Network/Data Manager*) с разделением всего множества данных на три массива – тренировочную последовательность (*Training*), проверочную (*Validation*) и тестовую (*Test*). Высокий коэффициент корреляции для всех массивов (рис. 3) говорит об адекватности модели. После удовлетворительной настройки сети выполняется запись скрипта, для получения прогнозного значения используется функция симуляции *sim* (использует сохраненные параметры нейросети в качестве аргумента).

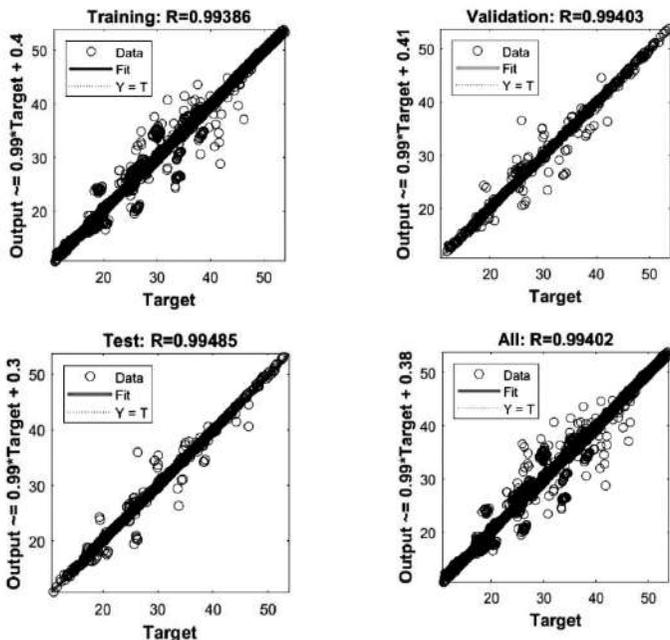


Рис. 3. Результаты обучения

Наряду с базовой моделью построены две ее модификации. Во второй учтено прогнозное значение температуры, в третьей – суммарное суточное электропотребление (результаты приведены на рис. 4, 5 и в табл. 1). Наибольшую точность дает модель с учетом суточного электропотребления (относительная погрешность менее 2%).

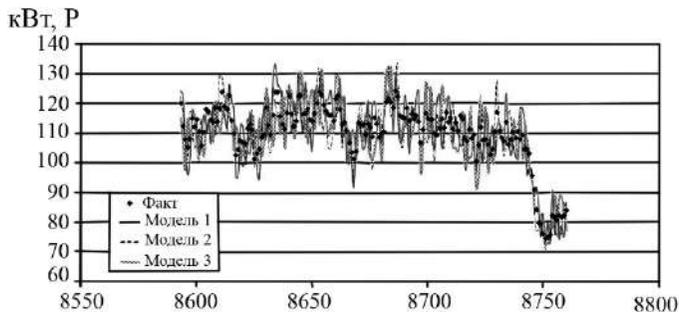


Рис. 4. Результаты прогнозирования на неделю вперед

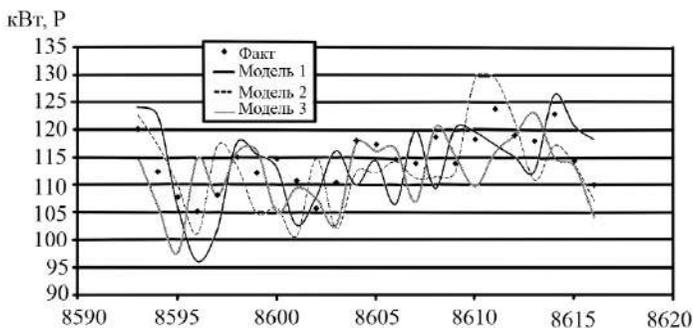


Рис. 5. Результаты прогнозирования на сутки вперед

Таблица 1

**Относительная погрешность модели
при вариации исходных данных**

Модель	Тип	MAPE, %	Максимальная ошибка, %
1	Базовая модель	2,62	6,19
2	Базовая модель + метеофакторы	2,58	5,88
3	Базовая модель + суточное электропотребление	1,98	4,65

Обсуждение. Установлено, что можно уменьшить количество расчетных дней в модели. По схеме Кохонена все суточные графики разбиваются на 4 кластера. Три из них хорошо прогнозируются – рабочие, праздничные (выходные), предпраздничные (послепраздничные) дни. В четвертый кластер входят прочие дни (с отклонением от нормального технологического процесса).

Несмотря на то, что теория прогнозирования электропотребления разработана в достаточной мере, возникают расхождения в используемом терминологическом аппарате. Так, в пособии [6] предложена градация методов перспективных оценок только на две

группы – краткосрочное (неделя и менее) и долгосрочное (месяц и более) прогнозирование. Такая классификация моделей представляется недостаточной, в качестве оперативного прогнозирования логично рассматривать именно получение почасового суточного графика нагрузки.

В работе [5] показано превалирующее влияние метеофакторов (температура, влажность, продолжительность светового дня) на точность прогноза. Для данного объекта исследования подобное не прослеживается. Причина может быть как в недостаточной точности прогноза метеоцентра РФ, так и в том, что эти факторы уже присутствуют в базовой модели. Они кодируются номером месяца.

В монографии [7] рассмотрено прогнозирование на основе нечетких нейронных сетей (*Fuzzy-Neural networks*) с получением средней погрешности (на примере региональной ЭЭС) менее 2 %. При этом правила построения нейронной сети проще, а построение подобной модели реализовано в Matlab в виде пользовательской процедуры. В этом направлении представляется возможное развитие работы.

Работа [8] посвящена определению оптимальных параметров обучения ANN (объект исследования – суточные графики энергосистемы Ирака, прогноз выполнен с MAPE 3,24 %) – рекомендовано 5 нейронов в скрытом слое и выборка для обучения модели в 80 % от всего объема статистики. Вероятно, эти настройки не могут претендовать на общие рекомендации, являясь уникальными для каждого конкретного объекта. Но определенно можно сделать вывод о допустимой вариативности этих параметров.

Заключение.

1. Подтверждена невозможность применения авторегрессионных методов для прогноза суточного графика нагрузки с приемлемой точностью (относительная погрешность прогноза превышает 10%).

2. Построены прогнозные модели с использованием методов искусственного интеллекта – искусственные нейронные сети (ANN).

3. Все модели отражают общую динамику процесса – смоделированный график подобен эмпирическому, что позволяет говорить об их корректности. Наилучший результат получен на основе алгоритма Левенберга-Марквардта.

4. Установлено, что точность прогноза определяется прежде всего подготовкой входной информации. Наилучший результат получен при использовании графика нагрузки за предыдущие 24 часа, номера часа, дня, месяца и суммарного суточного электропотребления. Повысить точность прогноза, вероятно, можно преобразованием входного ряда мощности в массив приращений.

Литература

1. **Гнатюк В.И., Кивчун О.Р., Лепехо Д.В.** Об определении индивидуальных динамических норм электропотребления с учетом статистических особенностей отдельных объектов электротехнического комплекса // ЛП Всероссийская научн.-практ. конф. с международным участием (с элементами научной школы для молодежи) «Фёдоровские чтения – 2022». М.: Издательский дом МЭИ, 2022. С. 12–21.

2. **Бэнн Д.В., Фармер Е.Д.** Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1987. 200 с.

3. **Кудрин Б.И., Мозгалин А.В.** Методика обеспечения почасового прогнозирования электропотребления предприятий с учетом погодных факторов // Вестник МЭИ. 2007. № 2. С. 45–47.

4. **Луценко Д.В.** Структурно-параметрическое прогнозирование электропотребления регионального электротехнического комплекса // ЛП Всероссийская научн.-практ. конф. с международным участием (с элементами научной школы для молодежи) «Фёдоровские чтения – 2022». М.: Издательский дом МЭИ, 2022. С. 3–12.

5. **Zhao, Z.; Xia, C.; Chi, L.; Chang, X.; Li, W.; Yang, T.; Zomaya, A.Y.** Short-Term Load Forecasting Based on the Transformer Model. *Information* 2021, 12, 516. <https://doi.org/10.3390/info12120516>.

6. **Семенов В.А., Руденко Ю.Н.** Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике. М.: Изд. МЭИ, 2000. 648 с.

7. **Шумилова Г.П., Готман Н.Э. Старцева Т.Б.** Прогнозирование электрических нагрузок при оперативном управлении электроэнергетическими системами на основе нейросетевых структур. Сыктывкар: КНЦ УрО РАН, 2008. 78 с.

8. **AL-Qaysi, A.M.M.; Bozkurt, A.; Ates, Y.** Load Forecasting Based on Genetic Algorithm – Artificial Neural Network-Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems: A Case Study in Iraq. *Energies* 2023, 16, 2919. <https://doi.org/10.3390/en16062919>.

*A.P. Петров, petroval13@mail.ru,
E.I. Грачева, grachieva.i@bk.ru,
КГЭУ, г. Казань*

АЛГОРИТМЫ И МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТАКТНЫХ СИСТЕМ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В связи с широким развитием производства низковольтной аппаратуры различных марок, актуальной задачей становится выявление наиболее эффективного оборудования с наименьшими потерями мощности и электроэнергии, что способствует внедрению оптимальных решений по энергосбережению в системах внутрицехового электроснабжения [1].

Коммутационные аппараты являются одними из наиболее распространенных типов оборудования цеховых сетей. Большинство аппаратов внутризаводского электроснабжения, как правило, работают в условиях окружающей среды, отличной от нормальной: повышенная влажность, температура, агрессивные производственные среды и т.п. При этом нагрузка аппаратов изменяется в зависимости от условий технологических процессов и режимов эксплуатации [2]. Как известно, контактные системы аппаратов подвержены как электрическому, так и механическому износу, ввиду частых коммутаций, внешних вибраций и возможных механических воздействий, не предусмотренных техническими условиями. Данные факторы определяют величину переходного сопротивления контактных соединений [3]. Внутрицеховые сети характеризуются большой протяжённостью и разветвленностью, и имеют множество последовательных и параллельных узлов с контактными соединениями. В связи с тем, что контактные системы коммутационных аппаратов в процессе эксплуатации находятся в замкнутом положении и от их состояния зависит уровень надежности низковольтной сети в целом, к контактным соединениям предъявляются строгие требования [4]. Надежность низковольтных коммутационных аппаратов в целом определяется надежностью элементов конструкции – контактной системы, дугогасительного устройства и привода.

Для исследования величины сопротивлений контактных соединений низковольтных аппаратов используются каталожные данные заводов-изготовителей потерь активной мощности ΔP на полюс аппарата.

К основным конструктивным особенностям аппаратов относятся форма, материалы и геометрические размеры контактов, тип биметаллических материалов и вид устройств защиты от электрической дуги.

Материалы и методы. Для исследования технических характеристик автоматических выключателей в литом корпусе (АВЛК) определим вид графических зависимостей потерь активной мощности на полюс в контактных системах от номинального

тока аппаратов различных заводов-изготовителей – Курского электроаппаратного завода (КЭАЗ), Schneider Electric, АBB, Legrand. По каталожным данным построены зависимости потерь мощности в контактных системах магнитных пускателей и контакторов от их номинальных токов.

Для выбора достоверной функции аппроксимации рассчитаем для каждой из них коэффициент детерминации R^2 и среднюю ошибку аппроксимации \bar{A} . Коэффициент детерминации вычисляется по выражению

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y})^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

где y_i – фактические значения переменных; \hat{y} – расчетные значения исследуемой величины; $\bar{y} = \frac{\sum_i y_i}{n}$ – среднее значение исследуемой величины; $\sum_i (y_i - \hat{y})^2$ – сумма квадратов ошибок регрессии; $\sum_i (y_i - \bar{y})^2$ – сумма квадратов отклонений точек данных от среднего значения.

Средняя ошибка аппроксимации \bar{A} – значение, показывающее среднее отклонение расчетных значений от фактических:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_i \left| \frac{y_i - \hat{y}}{y_i} \right| \cdot 100\%. \quad (2)$$

На рисунках 1–3 представлены графические зависимости полученных аппроксимирующих функций для исследуемых аппаратов при загрузке аппаратов номинальным током. Функции выбраны на основании наибольшего коэффициента детерминации R^2 и наименьшей ошибки аппроксимации \bar{A} .

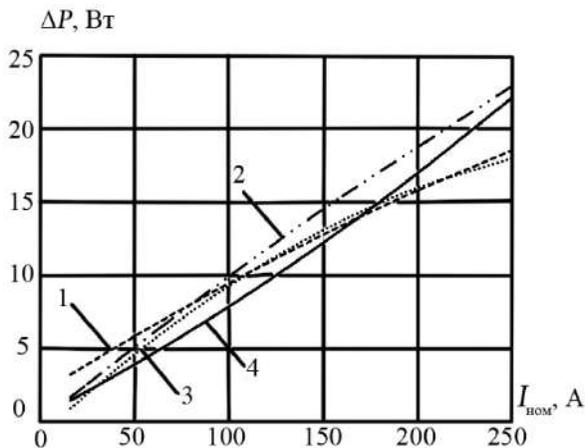


Рис. 1. Графики аппроксимирующих функций потерь активной мощности для АВЛК:
 1 – ComPact NSX (Schneider Electric); 2 – DPX (Legrand);
 3 – Tmax XT (ABB); 4 – BA04 (КЭАЗ)

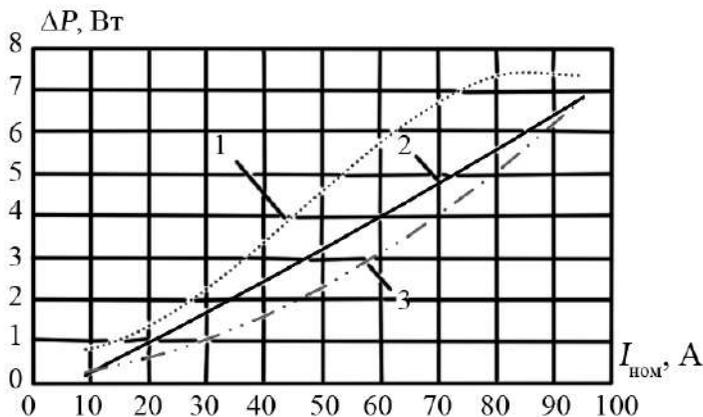


Рис. 2. Графики аппроксимирующих функций потерь активной мощности для магнитных пускателей:
 1 – ABB A (ABB); 2 – ПМЛ (КЭАЗ), КМИ (IEK), EasyPact TVS (Schneider Electric); 3 – CTX (Legrand)

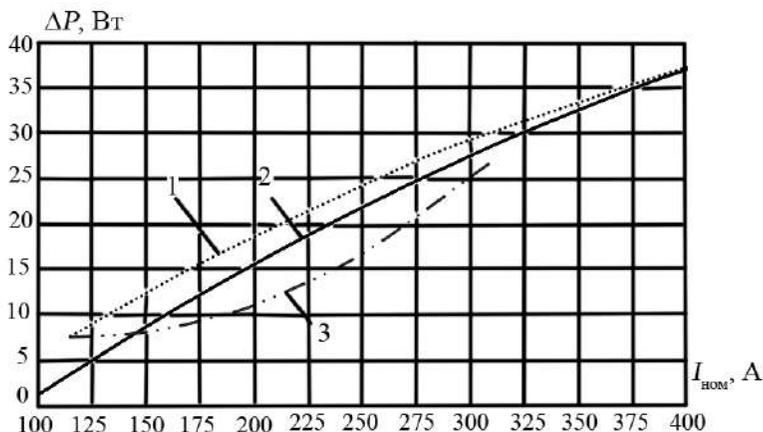


Рис. 3. Графики аппроксимирующих функций потерь активной мощности для контакторов:

1 – АВВ А (АВВ); 2 – ПМЛ (КЭАЗ), КТИ (IEK), EasyPact TVS (Schneider Electric); 3 – СТХ (Legrand)

В таблице 1 представлены результаты аппроксимации зависимости потерь активной мощности от номинального тока для исследуемых автоматических выключателей, магнитных пускателей и контакторов.

Данные табл. 1 показывают, что аппроксимация потерь мощности в функции номинального тока для исследуемых низковольтных аппаратов является достоверной: коэффициент детерминации R^2 имеет значение более 0,95, а ошибка \bar{A} не превышает 14,8%. С помощью полученных зависимостей возможно определять потери активной мощности на полюс низковольтных коммутационных аппаратов. Данная информация может быть рекомендована к использованию для уточнения расчетов по оценке потерь электроэнергии в низковольтных электрических сетях.

Таблица 1

Аппроксимирующие функции потерь мощности в контактных системах исследуемых аппаратов

Тип аппарата	Марка аппарата и производитель	Аппроксимирующая функция	R^2	$\bar{A}, \%$
Автоматические выключатели	ВА04 (КЭАЗ)	$\Delta P_1 = -8 \cdot 10^{(-5)} \cdot I^2 + 0,0673 \cdot I + 0,3855$	0,9833	11,45
	Compact NSX (Schneider Electric)	$\Delta P_2 = -6 \cdot 10^{(-5)} \cdot I^2 + 0,082 \cdot I + 1,928$	0,9724	10,17
	Tmax XT (ABB)	$\Delta P_3 = -2 \cdot 10^{(-4)} \cdot I^2 + 0,1209 \cdot I - 0,9538$	0,9541	13,27
	DPX (Legrand)	$\Delta P_4 = -5 \cdot 10^{(-5)} \cdot I^2 + 0,1044 \cdot I + 0,0142$	0,9659	13,53
Магнитные пускатели	ПМЛ (КЭАЗ); КМИ (ЛЕК); Easy-Pact TVS (Schneider Electric)	$\Delta P_5 = 9 \cdot 10^{(-5)} \cdot I^2 + 0,0679 \cdot I - 0,4125$	0,9856	7,23
	ABB A (ABB)	$\Delta P_6 = -2 \cdot 10^{(-4)} \cdot I^3 + 0,0032 \cdot I^2 - 0,0272 \cdot I + 0,815$	0,9918	4,58
	CTX (Legrand)	$\Delta P_7 = 6 \cdot 10^{(-4)} \cdot I^2 + 0,0135 \cdot I + 0,1121$	0,9925	12,48
Контакты	ПМЛ (КЭАЗ); КТИ (ЛЕК); Easy-Pact TVS (Schneider Electric)	$\Delta P_8 = -1 \cdot 10^{(-4)} \cdot I^2 + 0,1799 \cdot I - 15,52$	0,9725	14,8
	ABB A (ABB)	$\Delta P_9 = -1 \cdot 10^{(-4)} \cdot I^2 + 0,178 \cdot I - 10,411$	0,9835	4,7
	CTX (Legrand)	$\Delta P_{10} = 5 \cdot 10^{(-4)} \cdot I^2 + 0,1204 \cdot I + 14,614$	0,9887	6,2

Результаты и обсуждение. Как правило, в паспортных данных низковольтных коммутационных аппаратов указываются не все технические характеристики. Не приводятся сопротивления большей части элементов низковольтных аппаратов, так, например, нет данных о сопротивлениях силовых цепей и контактов аппаратов.

Для определения сопротивления контактных соединений R используем выражение

$$R_{\text{кс.пот.}} = \frac{\Delta P}{I_{\text{ном}}^2}, \quad (3)$$

где ΔP – потери активной мощности на полюс аппарата, Вт (каталожное значение), $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток аппарата, А.

С другой стороны, сопротивление контактных соединений в зависимости от номинального тока и коэффициента загрузки расчетным способом определяется как

$$R_{\text{кс.расч.}} = \frac{2\sqrt{\lambda \cdot F \cdot k_{\text{T}} \cdot S}}{I^2} \cdot \left(\theta_{\text{к}} - \frac{I^2 \cdot \rho \cdot (1 + \alpha \cdot \upsilon_{\text{к}})}{F \cdot k_{\text{T}} \cdot S} \right), \quad (4)$$

где λ – теплопроводность материала контакта, для меди $\lambda = 390$ Вт/(м·К); F – охлаждающая поверхность единицы длины проводника, м² (при прямоугольном сечении $F = 2(a+b) \cdot 10^{-3}$; при цилиндрической поверхности $F = 2\pi r \cdot 10^{-3}$); k_{T} – коэффициент теплоотдачи, для меди $k_{\text{T}} = 16$ Вт/(м²·К); S – площадь поперечного сечения контактов, м² ($S = a \cdot b$ для прямоугольного сечения; $S = \pi r^2$ для цилиндрической поверхности); I – ток через контакты, А; $\upsilon_{\text{к}}$ – температура контактных площадок, °С; $\theta_{\text{к}} = 45^\circ\text{C}$ – допустимый перепад температуры контакта относительно температуры окружающей среды; ρ – удельное электрическое сопротивление, для меди $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; α – температурный коэффициент сопротивления, $\alpha = 0,0043$.

Температура контактных площадок:

$$v_k = \frac{I^2 \cdot \rho + v_0 \cdot F \cdot k_T \cdot S}{F \cdot k_T \cdot S - I^2 \cdot \rho \cdot \alpha}, \quad (5)$$

где $v_0 = 35^\circ\text{C}$ – температура окружающей среды.

По выражению (4) для автоматического выключателя марки ВА04 с $I_{\text{ном}} = 100$ А и коэффициента загрузки $K_{\text{зг}} = 1$, сопротивление контактных соединений равно

$$R_{\text{кс, расч. ав}} = \frac{2 \cdot \sqrt{390 \cdot 2 \cdot (6 + 6,2) \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot (6 \cdot 6,2) \cdot 10^{-6}}}{100^2} \times$$

$$\times \left(45 - \frac{100^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,0043 \cdot 49,3)}{2 \cdot (6 + 6,2) \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot (6 \cdot 6,2) \cdot 10^{-6}} \right) = 0,46 \text{ мОм},$$

где v_k по (5):

$$v_k = \frac{100^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} + 35 \cdot 2 \cdot (6 + 6,2) \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot (6 \cdot 6,2) \cdot 10^{-6}}{2 \cdot (6 + 6,2) \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot (6 \cdot 6,2) \cdot 10^{-6} - 100^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0043} = 49,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Используя данные проведенных исследований, проведен сравнительный анализ графических зависимостей сопротивлений контактных соединений от номинального тока, полученных экспериментально, по потерям мощности (каталожные данные), расчетным способом и по справочным данным для автоматических выключателей, магнитных пускателей и контакторов. Пример представлен на рис. 4.

**Результаты расчета технических характеристик
контактов автоматических выключателей,
контакторов и магнитных пускателей**

Тип аппарата	$I_{\text{ном}}$, А	Размеры контактов, мм	Температура контактов ϑ_k , °С	Сопротивление контактов $R_{\text{кк}}$, мОм
Автоматический выключатель ВА	40	a = 3,8 b = 3,8	44,3	1,65
	50	a = 3,8 b = 3,8	49,8	0,89
	63	a = 4 b = 4	55	0,49
	100	a = 6 b = 6,2	49,3	0,46
Магнитный пускатель ПМЛ	25	r = 4	35,61	12,6
	40	a = 8,1 b = 8,1	35,92	6,34
	63	a = 12 b = 12	35,75	4,35
Контактор КТИ	250	a = 10 b = 20	41,5	0,34
	400	a = 17 b = 20	43	0,18

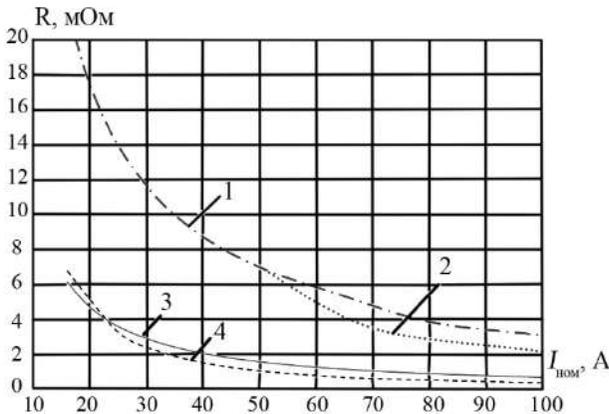


Рис. 4. Графики зависимостей сопротивлений контактных соединений от тока для автоматических выключателей с $I_{\text{ном}}$ до 100 А:

- 1 – экспериментальные данные; 2 – справочные данные;
3 – данные по потерям мощности; 4 – расчетные значения

Таким образом, теоретические и экспериментальные исследования показывают, что учет потерь мощности в контактных соединениях низковольтных коммутационных аппаратов позволяет уточнять величину потерь электроэнергии в системах внутризаводского электроснабжения.

Выявленные зависимости рекомендуются для получения достоверных оценок расчетных значений эквивалентных сопротивлений низковольтных электрических сетей. Математические модели и аналитические зависимости позволяют выявить эффективные в эксплуатации типы низковольтных аппаратов и рационально внедрять мероприятия по энергосбережению в системах внутризаводского электроснабжения.

Литература

1. **Петров А.Р., Грачева Е.И.** Моделирование потерь мощности в контактных системах низковольтных коммутационных аппаратов // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 126–133. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-126-133.

2. **Грачева Е.И., Наумов О.В., Горлов А.Н.** Проблемы исследования эквивалентного сопротивления электрических цеховых сетей низкого напряжения // Вестник КГЭУ. 2019. №3 (43). С.38–46.

3. **Грачева Е.И. и др.** Определение законов изменения сопротивления контактных групп электрических аппаратов низкого напряжения // Вестник МГТУ. 2021. Т. 24, № 4. С. 350–360. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-4-350-360>.

4. **Gheorghita C.M., Adam M., Andrusca M., Munteanu A., Dragomir A.** About contact resistance of the electrical equipment. International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Romania, 2017. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS.2017.7974439>.

*А.Р. Лепешкин, lepehkinAR@mpei.ru,
М.А. Федин, fedinMA@mpei.ru,
А.Б. Кувалдин, kivaldinAB@mpei.ru,
С.С. Кондрашов, kondrashovCC@mpei.ru,
Ф.Р. Сулейманов, suleymanovFR@mpei.ru,
А.В. Данченко, danchenkoAV@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва*

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ
ПЛОТНОСТИ ТОКА В ДВУХСЛОЙНОЙ
И ТРЕХСЛОЙНОЙ ПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ
ПРИ РАЗНЫХ РЕЖИМАХ ИНДУКЦИОННОГО
НАГРЕВА ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ СТАЛЬНЫХ
ДЕТАЛЕЙ С УЧЕТОМ ОПЛАВЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ
И ДВУХ ТОЧЕК КЮРИ**

Проблема защиты металлов от коррозионных процессов не теряет своей актуальности. Темпы развития многих отраслей промышленности тормозятся в связи с нерешенными вопросами борьбы с коррозией. Предъявляются все более высокие требования к эксплуатации технологического оборудования и металлоконструкций. Всё чаще в производстве технологический процесс требует применения высоких температур, давлений и агрессивных сред. Это заставляет осуществлять поиск технологий, которые бы позволили обеспечить существенное повышение ресурса работоспособности металлических деталей в агрессивных средах.

Нанесение на поверхность металла покрытий, улучшающих их эксплуатационные характеристики – один из наиболее перспективных и эффективных способов борьбы с коррозией. Анализ методов нанесения покрытий показывает, что одним из самых простых в реализации, эффективных, и, что немаловажно, экономичных способов является газопламенное порошковое напыление [1–6]. Однако этот способ нанесения покрытия имеет свои недостатки. Покрытие, полученное в результате напыления, по своей

структуре в значительной степени получается пористым. В некоторых случаях это свойство можно использовать, но чаще требуются плотные покрытия с низким содержанием пор, в том числе для упрочнения детали и повышения износостойкости. Существенным недостатком газопламенных покрытий также является их относительно невысокая адгезионная прочность. Эффективное влияние на эти факторы может оказать последующее дополнительное высокоэнергетическое воздействие концентрированным источником энергии на напыленные покрытия для улучшения их качественных показателей.

Проведен сравнительный анализ, который позволил установить, что в условиях комбинированной обработки наиболее предпочтительным способом температурного воздействия на напыленные покрытия является индукционный нагрев токами средней и высокой частоты [7–10]. Такой способ имеет характерное преимущество: оплавление происходит непосредственно в узкой зоне сцепления поверхности с покрытием без нагрева самого изделия.

В данной работе рассматривается формирование защитного проводящего покрытия с улучшенными прочностными свойствами на стальной цилиндрической детали путём его оплавления с применением способа индукционного нагрева, который еще недостаточно изучен в этом технологическом процессе, что является очень актуальной задачей. Такие защитные покрытия можно использовать на поверхности штоков гидроцилиндров промышленных механизмов в горнодобывающей, авиационной промышленности, энергетике и других отраслях.

Для разработки и совершенствования технологии нанесения и формирования указанных защитных покрытий необходимо провести моделирование и исследования параметров электромагнитного поля в цилиндрической стальной детали

с оплавлением коррозионно-стойкого проводящего покрытия, имеющего ферромагнитные свойства, при индукционном нагреве с учетом двух точек Кюри и режимов нагрева двухслойного и трехслойного тела.

В качестве объекта исследования и моделирования выбрана индукционная установка [10], которая в данной работе используется для оплавления напыленного коррозионно-стойкого проводящего покрытия Castolin Eutalloy RW 12496 цилиндрической заготовки из стали 45. В ходе нагрева электропривод с асинхронным двигателем осуществляет вращение детали, чтобы обеспечить равномерность получаемого покрытия и распределения температурного поля. По результатам математического моделирования системы «индуктор – загрузка» необходимо подобрать оптимальный температурный режим нагрева детали с оплавлением проводящего покрытия, учитывающий также и возникновение температурных напряжений.

Для решения электромагнитной задачи используем известные входные данные – геометрию модели, электрофизические свойства детали и покрытия. Моделируемые объекты являются телами вращения, поэтому решаем двумерную осесимметричную задачу. Для решения задач используем программы ELCUT и Comsol и примем следующие допущения: деталь с покрытием вращается со скоростью 400 об/мин и это обеспечивает равномерное распределение покрытия; производитель покрытий фирма «Castolin» не приводит никаких данных касательно электропроводности и магнитной проницаемости порошка Eutalloy RW 12496.

Измерение этих показателей является довольно трудной технической задачей. Обращаясь к данным современных исследований аналогичных порошков системы Ni-Cr-B-Si-Fe, примем электропроводность порошкового проводящего покрытия равной $2 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Никель обладает высокой магнитной проницаемостью. Однако точка Кюри для никеля составляет 358 °С, а эта температура при использовании режимов индукционного нагрева достигается в начале нагрева.

Особенность создания геометрической модели в ELCUT – наличие внешней границы, представляющего собой полуокружность. Оно вводится для определения граничных условий. Решением электромагнитной задачи являются результаты расчета вихревых токов, индуцированных переменным магнитным полем индуктора в проводящем покрытии и детали, а также распределение напряженности электрического и магнитного поля и тепловыделения. Исходными данными для решения являются геометрические параметры модели, ток и частота индуктора, свойства материалов.

Важной особенностью электромагнитной задачи является наличие в рассчитываемой модели ферромагнитного материала – заготовка из стали 45. Для расчета параметров электромагнитного поля в этом случае возникает необходимость использовать нелинейный анализ. Он позволяет с определенной точностью оценить поведение системы с ферромагнитными сердечниками, которые иначе потребовала бы использования ресурсоемкого моделирования электромагнитного переходного процесса. Для применения нелинейного анализа была задана кривая намагничивания для стали 45.

На границе расчетной области положим, что происходит полное затухание поля. Определим поведение нормальной составляющей индукции на границе, и укажем, что векторный магнитный потенциал $A_0 = 0$ на граничном ребре модели. Граничные условия – условие Дирихле для границы расчетной области $A = 0$.

На рисунке 1 показана расчетная конечно-элементная область, которая содержит граничные условия, воздушную среду, индуктор и деталь. Сетка конечных элементов является неравномерной для улучшения точности результатов в области оплаваемого покрытия. Число узлов сетки – около 160000.

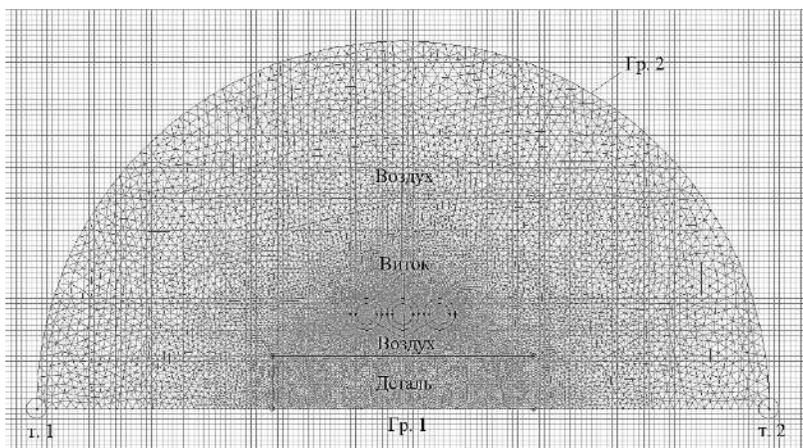


Рис. 1. Расчетная область в пакете ELCUT

Распределение плотности тока и линий магнитной индукции при частоте тока 66 кГц по результатам расчета в программе Comsol представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что максимум плотности тока наблюдается внутри области трехвиткового индуктора. Распределение плотности тока по сечению катушки не является равномерным: ток течет в основном по внутренней поверхности индуктора.

В пакете программ Elcut также были получены распределения плотности тока по глубине покрытия и заготовки на частоте 66 кГц с учётом изменения температуры в пределах от 20 °С до 1080 °С и магнитных свойств заготовки и покрытия в разные моменты времени индукционного нагрева с учётом двух точек Кюри.

Следует отметить, что температура оказывает существенное влияние на электрофизические характеристики (удельное электрическое сопротивление и относительная магнитная проницаемость) как материала покрытия, так и материала основной детали. Это приводит к тому, что электрические и энергетические характеристики системы «индуктор – деталь с покрытием» по ходу нагрева и оплавления покрытия изменяются непрерывно.

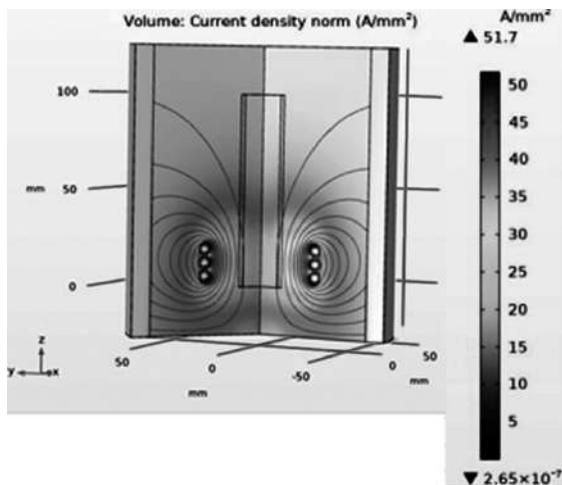


Рис. 2. Распределение плотности тока и линий магнитной индукции

Кроме того, изменение структуры покрытия при его оплавлении оказывает дополнительное влияние на электрические и энергетические характеристики, поскольку приводит к перераспределению плотности тока в покрытии из-за изменения его толщины и снижения пористости. Можно выделить четыре характерных электрических режима индукционного нагрева детали с покрытием. На рисунке 3 представлены характеризующие эти режимы распределения плотности тока по глубине покрытия и заготовки на частоте 66 кГц в зависимости от температуры, полученные расчетным путем в программе Elcut.

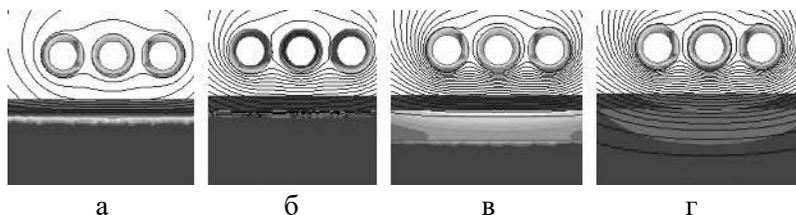


Рис. 3. Распределения плотности тока по глубине покрытия и детали при температуре:

а – 20 °С, б – 358 °С, в – 800 °С, г – 1080 °С

Рисунок 3,а соответствует интервалу температур от начальной температуры 20 °С до температуры точки Кюри материала покрытия 358 °С. В этом случае материалы покрытия и детали обладают ферромагнитными свойствами, поскольку температуры точек Кюри как материала детали (сталь 45), так и материала покрытия, содержащего в своем составе ферромагнитный никель, больше температуры нагрева.

Из результатов расчета распределения плотности тока на рис. 3,а видно, что в рассматриваемом температурном диапазоне загрузка (заготовка с нанесенным покрытием) должна рассматриваться как двухслойное проводящее тело, поскольку электрофизические свойства материала заготовки и покрытия (удельное электрическое сопротивление и относительная магнитная проницаемость) сильно отличаются, что приводит к перераспределению плотности тока и мощности тепловыделения в стальной заготовке и покрытии. Действительно, поскольку значение удельного электрического сопротивления материала стальной заготовки существенно меньше, чем у материала покрытия, а значение относительной магнитной проницаемости стальной заготовки, наоборот, существенно больше, это приводит к тому, что электромагнитные волны более эффективно поглощаются материалом стальной заготовки, чем материалом покрытия. Нагрев покрытия в этом режиме происходит как за счет тепловыделения в нем, так и за счет теплопроводности от поверхности заготовки.

При температуре 358 °С коррозионно-стойкое покрытие теряет свои ферромагнитные свойства, а загрузка проходит первую точку Кюри. Соответственно в интервале температуре от 358 °С и до температуры точки Кюри стали (723 °С) распределение плотности тока в детали и покрытии будет таким, как представлено на рис. 3,б. В этом режиме стальная заготовка, сохраняя свои ферромагнитные свойства, нагревается в более сильном электромагнитном поле, что приводит к снижению относительной магнитной проницаемости стали, поэтому неравномерность распределения плотности тока и мощности тепловыделения в заготовке снижается по сравнению со случаем на рис. 3,а, а мощность тепловыделения в покрытии уменьшается.

Поскольку заготовка с покрытием нагреваются неравномерно и поэтому проходят вторую точку Кюри ($723\text{ }^{\circ}\text{C}$) не мгновенно, существует температурный диапазон (примерно от $723\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$), в котором поверхностные слои стальной заготовки уже не имеют ферромагнитных свойств, а внутренние их еще сохраняют. В этом случае загрузка представляет собой трехслойное проводящее тело, а расчет индукционного нагрева такой загрузки существенно усложняется. Характерное распределение для этого случая показано на рис. 3,в. Как видно из рисунка, наиболее эффективно в этом случае будет нагреваться наружный слой стальной заготовки, обладающий ферромагнитными свойствами.

После нагрева до температуры свыше $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ и до технологической температуры оплавления $1080\text{ }^{\circ}\text{C}$, при прохождении обеих точек Кюри и покрытие, и стальная заготовка не обладают ферромагнитными свойствами. Однако при этом значения удельных электрических сопротивлений материалов покрытия и заготовки все равно существенно отличаются (составляют $2 \cdot 10^{-5}\text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $1 \cdot 10^{-5}\text{ Ом}\cdot\text{м}$ соответственно), поэтому в данном случае будет снова наблюдаться эффект индукционного нагрева двухслойного проводящего тела (рис. 3,г). Из результатов расчетов видно, насколько существенное влияние оказывает покрытие на электрические и энергетические характеристики системы «индуктор – загрузка» при нагреве.

Выводы. Приведены результаты моделирования и исследований параметров электромагнитного поля в двухслойной и трехслойной проводящих средах при разных режимах индукционного нагрева цилиндрической стальной детали с учетом оплавления защитного проводящего покрытия и двух точек Кюри и с использованием метода конечных элементов. Получены поверхностные распределения плотности тока в покрытии и верхнем слое стальной заготовки, расположенной внутри трехвиткового индуктора в пакетах программ Elcut и Comsol. В пакете программ Elcut получены результаты анализа распределений плотности тока на разных температурных режимах с учетом влияния двух точек Кюри на ферромагнитные свойства покрытия и стальной заготовки и разных значений электросопротивлений покрытия и детали.

Литература

1. **Кудинов В. В., Бобров Г.В.** Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М.: Металлургия. 1992. 432 с.

2. **Балдаев Л.Х., Борисов В.Н., Вахалин В.А.** Газотермическое напыление: учебное пособие / под общ. ред. Л.Х. Балдаева. М.: Маркет ДС. 2007. 344 с.

3. **Защита** от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений. Справочник. Под ред. А.А. Герасименко. М.: Машиностроение. 1987. Том 1. 688 с.

4. **Коррозионная** стойкость оборудования химических производств: Способы защиты оборудования от коррозии. Справ. изд. / под ред. Б.В. Строкана, А.М. Сухотина. Л.: Химия. 1987. 280 с.

5. **Борисов Ю.Д., Борисова А.Л.** Плазменные порошковые покрытия. Киев: Техника. 1986. 222 с.

6. **Барвинок В.А.** Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. М.: Машиностроение. 1990. 384 с.

7. **Смирнова Е.А.** Методы обработки самофлюсующихся покрытий. Индукционное оплавление // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2011. № 4 (135). С. 258–262.

8. **Рудницкий А.Ю.** Технология получения износостойких покрытий газопламенным напылением с последующей индукционной закалкой // Сборник научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования: инноватика в современном мире». Уфа. 2021. С. 37–44.

9. **Kuvaldin A.B., Lepeshkin A.R., Pyinskaya O.I., Fedin M.A., Kuleshov A.O.** Simulation of thermal state of parts with ceramic coatings in a high frequency electromagnetic field // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. №. 12. Pp. 1507–1509.

10. **Федин М.А., Кувалдин А. Б., Лепешкин А. Р., Кондрашов С. С., Федина С.А., Жмурко И.Е., Данченко А.В.** Разработка индукционной установки для получения защитных покрытий и исследование их свойств // Промышленная энергетика. 2023. № 5. С. 19–24.

*М.А. Федин, FedinMA@mpei.ru,
А.Р. Лепёшкин, LepeshkinAR@mpei.ru,
С.А. Федина, FedinaSA@mpei.ru ,
А.И. Василенко, VasilenkoAI@mpei.ru,
Е.Г. Дудочкин, DudockinYG@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», г. Москва
Д.П. Кошкин, koshkin@pktsp.ru,
Ю.А. Демидов, demidov@pktsp.ru,
ООО ПК «Тепловые системы Полюс», г. Мытищи,
Б. Чэнь, chenbai@hopewind.com,
Shenzhen Hopewind Electric, КНР, г. Шеньчжэнь*

РАЗРАБОТКА И ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ИНДУКЦИОННО-РЕЗИСТИВНОГО НАГРЕВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Современные промышленные системы электрообогрева представляют собой сложные технологические установки с автоматическим управлением и мониторингом, зарекомендовавшие себя своей надежностью, эффективностью и экономичностью в качестве незаменимой составляющей в системах транспорта и хранения нефти и газа. Их применение позволяет гарантировать стабильность температуры нефти и газа на протяжении всего пути их транспортировки, а также минимизировать риски отказа оборудования и аварий на объектах топливно-энергетического комплекса.

На сегодняшний день индукционно-резистивные системы нагрева (ИРСН), основанные на использовании поверхностного эффекта и эффекта близости в электрических проводниках переменного тока, оптимизированы под задачи электрообогрева протяженных трубопроводов. Проектирование комплекса электрообогрева на основе ИРСН с системой электропитания включает последовательность этапов, начиная с исследования объекта и закан-

чивая установкой и настройкой оборудования. Комплексный подход позволяет разработать эффективную систему обогрева, обеспечивающую комфортное и экономичное использование.

Разработка математической модели ИРСН требует проведения теоретических исследований и экспериментов, измерений и статистического анализа данных для определения зависимостей между параметрами ИРСН и внешними воздействиями. Это позволит создать модель, которая будет точно предсказывать поведение ИРСН в различных условиях. Проектирование комплекса электрообогрева на основе ИРСН с использованием математической модели позволит оптимально подобрать параметры системы электропитания и системы управления, что приведет к повышению эффективности и надежности работы всего комплекса [1].

При теоретическом исследовании ИРСН возникает задача расчета параметров электромагнитного поля (ЭМП) в ферромагнитной проводящей среде, при решении которой необходимо учитывать нелинейную зависимость относительной магнитной проницаемости материала μ от напряженности магнитного поля H , потери активной мощности на перемагничивание материала индукционно-резистивного нагревателя (ИРН), т.е. гистерезис, а также взаимодействие ЭМП с многослойной проводящей средой ИРН.

В современных программных пакетах для расчета ЭМП (ANSYS, ELCUT и др.) потери на гистерезис не учитываются, что связано с практическими задачами, в которых предполагается использование сильных ЭМП, а доля этих потерь незначительна. Поэтому авторами была разработана математическая модель, основанная на электрической схеме замещения. Эта модель описывает выделение мощности в ферромагнетике как за счет джоулева тепла, так и за счет перемагничивания.

Рассмотрим модель, основанную на электрической схеме замещения, применительно к ферромагнитной трубе внутренним диаметром d и толщиной δ , по которой протекает ток I частотой f . В качестве примера принято разбиение стенки трубы по толщине (рис. 1) на 4 слоя (в общем случае – на n слоев).

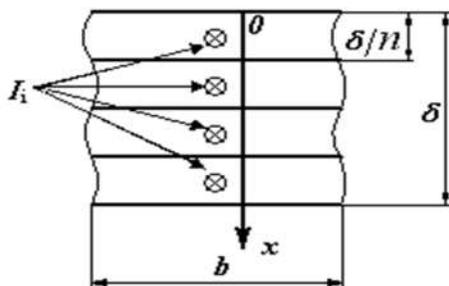


Рис. 1. Участок стенки трубы ИРСН с разбиением на слои с токами I_i

При этом принято, что ток в каждом слое протекает в его середине. Заданы удельное электрическое сопротивление материала трубы ρ , основная кривая намагничивания $B(H)$ и зависимость объемных потерь на гистерезис w_g от H и f .

Численный расчет параметров ИРСН основан на использовании эквивалентной электрической схемы замещения (рис. 2).

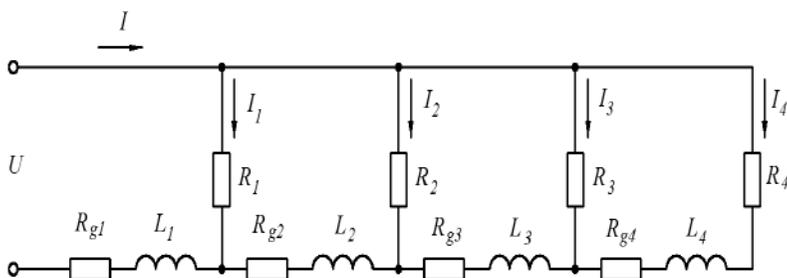


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема замещения для устройства индукционно-резистивного нагрева

Алгоритм расчета позволяет учесть наличие нескольких слоев в конструкции ИРН, причем материалы этих слоев могут быть ферромагнитными или же, наоборот, не обладать ферромагнитными

свойствами. В практике встречаются случаи, когда внешний слой ИРН выполняется из конструкционной ферромагнитной стали, а внутренний – из меди, либо когда оба слоя выполняются из ферромагнитных материалов с различными свойствами. Для этих вариантов внутренний и внешний слой ИРН разбиваются по толщине на элементарные слои, количество которых, например, составляет n_1 и n_2 . Общее количество разбиений двухслойного ИРН равно $n = n_1 + n_2$. Теоретически количество слоев ИРН может быть и большим.

Тогда для каждого слоя (в нашем случае внутреннего и внешнего) собственные активные сопротивления R_i и индуктивности L_i , а также активные сопротивления R_{gi} , учитывающие выделение мощности за счет гистерезиса и принимающие значения, равные 0 для слоя немагнитного материала, для каждого элементарного слоя i рассчитываются в соответствии с электрофизическими свойствами материала и геометрическими свойствами каждого слоя многослойного ИРН.

Следует отметить, что задача расчета параметров ЭМП в стенке трубы необходимо решать итерационным методом. Алгоритм численного расчета ЭМП в ферромагнитной трубе (рис. 3) содержит два итерационных цикла: внутренний цикл учитывает нелинейную зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля, внешний – нелинейную зависимость удельных объемных потерь на гистерезис от напряженности магнитного поля.

Решением системы уравнений на каждой итерации является распределение действующих значений токов в слоях стенки трубы. После этого рассчитываются значения напряженности магнитного поля в слоях, затем интегральные электрические и энергетические характеристики: активные и реактивные мощности, напряжение питания, напряжение на поверхности ИРН, электрический КПД и коэффициент мощности.

На основе описанного алгоритма авторами разработана и реализована программа IRSN PRO [3] для расчета ИРСН на промышленной частоте. Данная программа позволяет изучать свойства различных ИРСН в качестве электрических нагрузок с учётом нелинейных зависимостей относительной магнитной проницаемости и мощности потерь на гистерезис от напряженности магнитного поля. Исходными данными для расчета являются геометрические параметры системы, свойства материала слоев трубы, электрические характеристики: ток индуктора I , частота f .

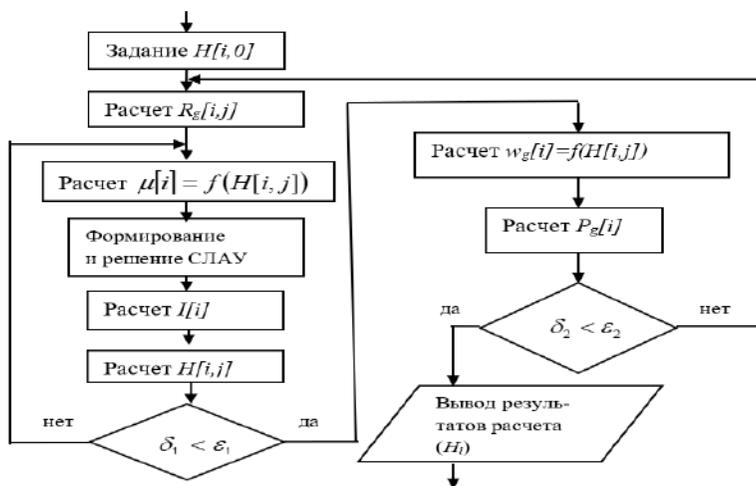


Рис. 3. Алгоритм численного расчета ЭМП в ферромагнитной трубе с учетом гистерезиса

На рисунке 4 представлена форма разработанной программы с исходными данными и результатами расчета ИРСН; также на рисунке, помимо интегральных электрических и энергетических характеристик, представлены распределения напряженности магнитного поля H и плотности электрического тока j по толщине стенки наружной ферромагнитной трубы ИРСН.

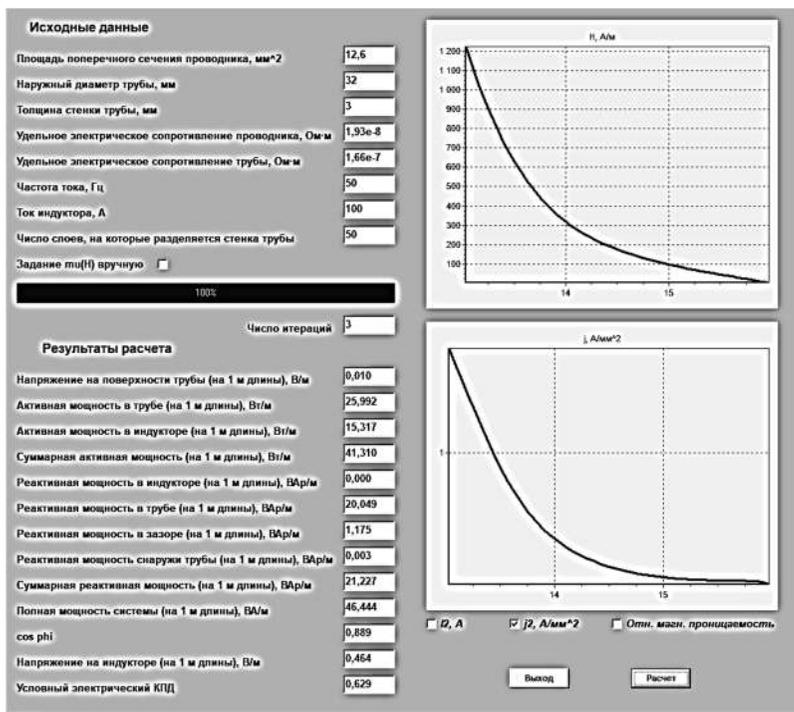


Рис. 4. Форма с исходными данными и результатами расчёта ИРСН в программе IRSN PRO

Литература

1. Струпинский М. Л., Хренков Н. Н., Кувалдин А.Б. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли. М.: Инфра-Инженерия, 2023.
2. Kuvaldin A., Strupinskiy M., Khrenkov N., Fedin M. Simulation of electromagnetic field in ferromagnetic steel taking into account hysteresis effect // International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources. Padua, 2010. P. 83–89.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для расчёта индукционно-резистивной системы нагрева IRSN PRO», № 2023619476 от 11.05.2023.

4. Кувалдин А.Б., Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Федин М.А. Расчет ферромагнитной загрузки индукционного нагревателя при использовании малых удельных мощностей // Материалы 2-й международной конференции «Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева» АРИН 09. Санкт-Петербург, 2009. С. 179–186.

5. Кувалдин А.Б., Федин М.А., Молостова А.В., Зотов М.Л., Василенко А.И. Моделирование электромагнитного преобразователя числа фаз для индукционно-резистивной системы обогрева промышленных трубопроводов. // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: материалы XX междунар. научно-практической конференции. Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2022. С. 31–35.

М.А. Федин, FedinMA@mpei.ru,

С.С. Кондрашов, sskondrashov@yandex.ru,

А.И. Василенко, VasilenkoAI@mpei.ru,

М.Л. Зотов, ZotovML@mpei.ru,

К.В. Северин, SeverinKV@mpei.ru,

НИУ «МЭИ», г. Москва

Д.П. Кошкин, koshkin@pktsp.ru,

Ю.А. Демидов, demidov@pktsp.ru,

ООО ПК «Тепловые системы Полюс», г. Мытищи

РАЗРАБОТКА МЕТОДА УВЕЛИЧЕНИЯ ДЛИНЫ ОБОГРЕВАЕМОГО ПЛЕЧА ИНДУКЦИОННО- РЕЗИСТИВНОЙ СИСТЕМЫ НАГРЕВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАДИРОВАННОЙ ИЗОЛЯЦИИ

В Российской Федерации в настоящее время активно осваиваются новые нефтяные месторождения и модернизируются существующие. Большинство крупных мест добычи и нефтепроводов находятся в суровых климатических условиях северных широт. Поэтому одной из важных задач является поддержание стабильной температуры нефти и газа во время транспортировки, хранения и

переработки. Из-за значительной длины изолированных трубопроводов решение этой задачи становится сложным и требует создания энергоэффективной системы электрообогрева (СЭО), которая должна быть простой и надежной, особенно при отрицательных температурах.

На сегодняшний день наиболее пригодны под задачи электрообогрева промышленных трубопроводов индукционно-резистивные системы нагрева (ИРСН), получившие название скин-систем, основанные на использовании поверхностного эффекта (скин-эффекта) и эффекта близости. Данная система предназначена для начального разогрева, обогрева, поддержания температуры, а также является защитой от замерзания протяжённых трубопроводов.

ИРСН представляет собой коаксиальное электрическое нагревательное устройство, в состав которого входит кабель, укладываемый в трубу из ферромагнитной стали, монтируемую вдоль поверхности трубопровода и обеспечивающую его нагрев (рис. 1).

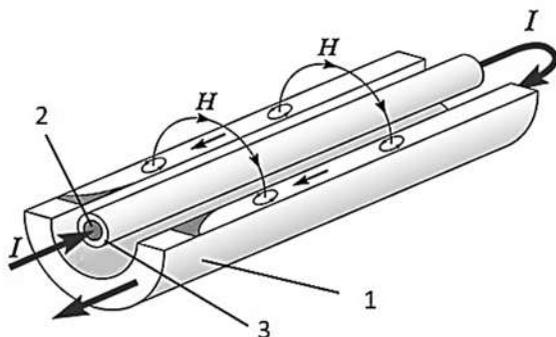


Рис. 1. Индукционно-резистивная система нагрева:

- 1 – индукционно-резистивный нагреватель;
2 – индукционно-резистивный проводник; 3 – электроизоляция

Индукционно-резистивный нагреватель (ИРН) состоит из низкоуглеродистой стальной трубки (1), внутри которой размещается индукционно-резистивный проводник (ИРП) (2) из немагнитного материала, такого как медь или алюминий,

покрытый электроизоляцией (3). Проводник соединяется с трубкой на конце обогреваемого участка, а переменное напряжение подается на начало участка, рассчитанное с учетом требуемого тепловыделения и длины обогреваемого участка. При протекании тока происходит выделение тепла в обоих проводниках: в ИРП из-за омических потерь и в ИРН из-за омических потерь, а также индукционного нагрева, вызванного индуцированными токами и перемagnичиванием ИРН в электромагнитном поле ИРП.

На данный момент ИРСН имеют следующие технические характеристики: удельная мощность до 165 Вт/м, рабочее напряжение системы до 3–5 кВ, диапазон температур от –60 до 200 °С, напряжение на поверхности проводника примерно 0,05 В/м. Также система имеет важные особенности: единственный метод подогрева труб, не нуждающийся в сопроводительной сети с протяженностью до 15–20 км, наиболее эффективный метод обогрева трубопроводов большой протяженности, обладает высокой надежностью и прочностью нагревателей, также имеет возможность применения во взрывоопасных зонах, поскольку наружные поверхности нагревателей заземлены и не требуют изоляции.

Состояние нефтегазовой отрасли в России и за рубежом требует увеличения длины обогреваемых участков трубопроводов и скважин. Однако постоянное увеличение генерируемых мощностей и потребляемых электроэнергии предъявляет все более высокие требования к энергетической эффективности систем обогрева. Существующие индукционно-резистивные системы нагрева (ИРСН) не могут реализовать длину до 100 км из-за линейного падения напряжения на проводнике, что превышает пределы электрической прочности электроизоляции ИРСН. Это может привести к частичным разрядам и повреждению изоляционных материалов. В результате электрические свойства ИРСН при обогреве сверхдлинных трубопроводов ограничены и не соответствуют требованиям.

Длина плеча обогрева, помимо питающего напряжения, зависит от нескольких факторов, включая линейные тепловые потери и сечение жилы проводника. Увеличение сечения жилы позволяет только незначительно увеличить длину плеча. При работе ИРСН

изоляция ИРП подвергается воздействию электрического тока частотой 50 Гц, который приложен между многопроволочной жилой ИРП и внешней стальной трубой ИРН.

Появление частичных разрядов на любом участке электрической изоляции ограничивает срок службы нагревателя ИРСН. Распределение напряженности электрического поля, определяющее появление частичных разрядов, зависит от конфигурации проводников, их взаимного расположения и диэлектрических свойств изоляции.

Для решения проблемы увеличения длины обогреваемого плеча необходимо обеспечить улучшение электрических характеристик ИРСН за счет расширения диапазона электрической прочности используемых электроизоляционных материалов.

Один из наиболее простых в теоретическом плане, но весьма трудный в практической реализации вариант заключается в том, чтобы разместить ИРП в центре трубы. В отличие от описанной ранее классической конструкции скин-систем, в которой кабель находится свободно в воздушном пространстве внутри трубы, центрирование ИРП может снизить напряженность поля на центральной жиле почти в 2 раза, а на поверхности изоляции более чем в 3 раза. Однако такой метод существенно увеличивает время монтажа СЭО, что также является важным фактором.

На сегодняшний день оптимальным способом расширения диапазона электрической прочности электроизоляции ИРП для увеличения длины обогреваемого плеча ИРСН является использование градированной изоляции ИРП [2].

Данный способ, предлагаемый авторами, способствует снижению неравномерности распределения напряженности в толщине изоляции ИРП путем использования материала с более высоким значением диэлектрической проницаемости возле поверхности жилы и материала с более низким значением диэлектрической проницаемости на внешней границе кабеля. Каждый слой изоляции проводника уменьшает напряженность электрического поля до безопасных значений на границе следующего слоя.

Модель и эскиз ИРСН с градирующей изоляцией ИРП представлены на рис. 2 и 3. В предложенной градирующей ИРСН электроизоляция ИРП состоит из четырех слоев: полупроводящего слоя по жиле из пероксидно-сшиваемого полиэтилена, первого слоя изоляции из облученного полиэтилена, второго слоя изоляции из пористого полиэтилена и слоя из сплошного полиэтилена для защиты пористого слоя от влаги и механических воздействий. Каждый слой электроизоляции помогает уменьшить напряженность электрического поля, что, в свою очередь, позволяет увеличить напряжение возникновения коронных частичных разрядов.



Рис. 2. 3D модель градирующей ИРСН

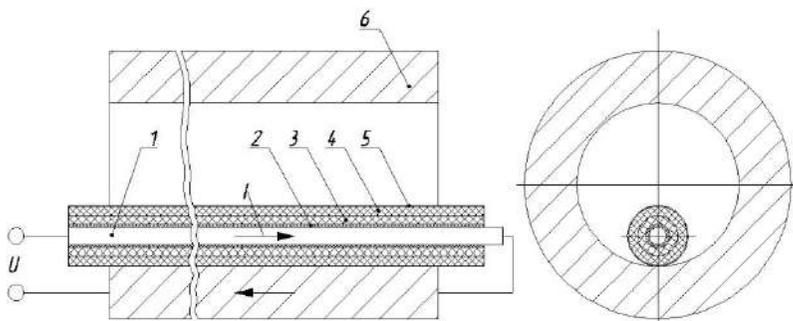


Рис. 3. Эскиз градирующей ИРСН:

1 – индуктор; 2 – полупроводящий слой; 3 – облученный полиэтилен;
4 – пористый слой, 5 – сплошной полиэтилен, 6 – ИРН

Для создания ИРСН с градирующей изоляцией необходима математическая модель для исследования ее электрических характеристик, которые, в свою очередь, позволят выбрать оптимальные геометрические и электрические параметры ИРСН.

Литература

1. Струпинский М.Л., Кувалдин А.Б. Индукционно-резистивная система обогрева трубопровода // Электрика. 2008. № 11. С. 21–24.

2. Струпинский М. Л., Хренков Н. Н., Кувалдин А.Б. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли // М.: Инфра-Инженерия, 2023.

3. Кувалдин А.Б., Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Федин М.А. Моделирование электромагнитного поля в ферромагнитной стали при индукционном, электроконтактном и комбинированном нагреве // Индукционный нагрев. 2010. № 13. С. 15–19.

4. Кувалдин А.Б., Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Федин М.А. Индукционно-резистивная система нагрева с биметаллическим внешним проводником // Электричество. 2011. № 2. С. 58–63.

5. 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. 464 с.

*А.В. Блохин, sasha_bloh@mail.ru,
А.С. Грицай, aleksandr.gritsay@gmail.com,
ОмГТУ, г. Омск*

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ГОРОДСКОГО РЕСУРСОНАБЖАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Значительную часть потребителей электроэнергии составляют крупные промышленные предприятия и нежилые (коммерческие) объекты. На таких объектах энергетической системы обычно имеется устоявшаяся модель производства, которую возможно использовать для повышения энергоэффективности и построения точного прогноза потребления для отдельных субъектов оптового

рынка электроэнергии. Необходимы инструменты точного прогноза, которые будут учитывать временные и метеорологические факторы [1].

Субъектом оптового рынка электроэнергии в данном исследовании является коммунальное предприятие, которое занимается подачей питьевой воды и очисткой сточных вод. Подобные предприятия являются крупными потребителями электроэнергии, поэтому они должны постоянно искать способы снижения затрат на энергопотребление. Каждое предприятие производит краткосрочное или долгосрочное планирование, в частности, для закупки электрической энергии на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ) [2–5].

Одним из способов снижения затрат на потребление электроэнергии является точный прогноз, который можно провести с использованием инструментов искусственного интеллекта. В данной работе проводится описание исходных данных, полученных от ресурсоснабжающей организации, инструмента машинного обучения, с помощью которого будет производиться краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии предприятия, а также приведены результаты работы в сравнении с реальными данными.

Исходные данные. Массив данных для формирования обучающей выборки модели прогнозирования был агрегирован путем сбора данных о почасовом потреблении электрической мощности приборами учёта электроэнергии, установленными на точках поставки (границах балансовой принадлежности электрических сетей), за период с 2021 г. по настоящее время.

Данные были получены с помощью автоматических систем учета и мониторинга потребления электрической мощности на предприятии, которые обеспечивают агрегацию данных почасового потребления электроэнергии. Данные представлены в виде:

- дата, время (в формате дд, мм, гггг, чч, мин.);
- мощность активная прямая, кВт (общий расход предприятия);
- мощность активная обратная, кВт (расход абонентов предприятия).

Фрагмент массива исходных данных представлен в табл. 1.

Исходные данные о потреблении электроэнергии на предприятии

Дата/время	Мощность, кВт	
	Активная прямая	Активная обратная
08.09.2023 01:00	13 293,84	– 649,50
08.09.2023 02:00	13 177,80	– 662,81
08.09.2023 03:00	12 745,44	– 686,30
...
10.09.2023 22:00	14 209,68	– 698,41
10.09.2023 23:00	13 472,88	– 653,90
11.09.2023 00:00	13 481,52	– 644,44

«Чистое» потребление электрической мощности на предприятии определяется как разность между общей потребляемой мощностью (прямая) и мощностью, потребляемой субабонентами (обратная).

Прогнозирование. Для достижения цели был проведен анализ наиболее популярных инструментов машинного обучения, которые подходят для прогнозирования временных рядов. В качестве основного инструмента был выбран XGBoost, который при проверке показал наименьшую ошибку в прогнозировании данных.

В основе XGBoost лежит алгоритм градиентного бустинга деревьев решений. Градиентный бустинг – это техника машинного обучения для задач классификации и регрессии, которая строит модель предсказания в форме ансамбля слабых предсказывающих моделей, обычно деревьев решений. Обучение ансамбля проводится последовательно, в отличие, например, от бэггинга.

На каждой итерации вычисляются отклонения предсказаний уже обученного ансамбля на обучающей выборке. Следующая модель, которая будет добавлена в ансамбль, будет предсказывать эти отклонения. Таким образом, добавив предсказания нового дерева к предсказаниям обученного ансамбля, мы можем уменьшить сред-

нее отклонение модели, которое является таргетом оптимизационной задачи. Новые деревья добавляются в ансамбль до тех пор, пока ошибка уменьшается, либо пока не выполняется одно из правил «ранней остановки» [6, 7].

Данные о фактической потребляемой электрической мощности на предприятии приходят ежедневно и вносятся в обучающую выборку для модели прогнозирования. Прогноз ведётся на сутки вперед, кроме воскресенья, понедельника и вторника. Прогноз на эти дни формируется в пятницу. Это обусловлено режимом работы эксперта по планированию потребляемой электрической мощности на предприятии и формированию заявки в ОРЭМ. На рис. 1 представлены графики фактических и прогнозных значений потребляемой мощности на предприятия за одни сутки.

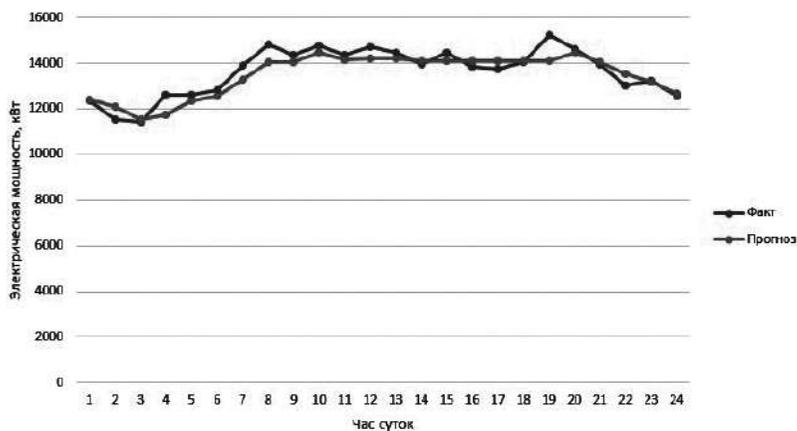


Рис. 1. График потребления электрической мощности на предприятии за сутки

Видно, что прогнозные значения довольно близко лежат к фактическим и повторяют искривление графика, но не точно, что свидетельствует об ошибке между фактическими и прогнозными значениями потребляемой мощности около 2,5%.

На недельном интервале графики фактических и прогнозных значений также близки, но не полностью совпадают, ошибка прогнозирования составляет 3%.

Заключение. Обмен фактическими и прогнозными значениями потребления электрической мощности производится в ежедневном режиме с обсуждением, корректировкой и настройкой модели совместно с экспертом предприятия. В качестве инструмента прогнозирования был выбран XGBoost по причине более гибкой настройки и более высокой точности прогнозирования, по сравнению с аналогичными инструментами машинного обучения. Ошибка прогнозирования в различные периоды времени находится в диапазоне 2,5–3,5%. Принимая это во внимание, авторы в дальнейшей работе планируют усовершенствовать прогнозную модель, для получения более точных результатов прогнозирования.

Литература

1. **Pitjan A., Oprea S., Carutasu G., Petrosanu D., Bara A., Coculescu C.** Devising Hourly Forecasting Solutions Regarding Electricity Consumption in the Case of Commercial Center Type Consumers // *Energies*. 2017. № 10. P. 36.

2. **Tyunkov D.A., Gritsay A.S., Potapov V.I., Khamitov R.N., Blohin A.V., Kondratukova L.K.** Short-term forecast methods of electricity generation by solar power plants and its classification // *Journal of Physics: Conf. Series*. 2019. № 1260. P. 052033.

3. **Singh V.P., Vijay V., Bhatt M.S., Chaturvedi D.K.** Generalized neural network methodology for short term solar power forecasting // *2013 Proceedings of 13th International Conference on Environment and Electrical Engineering – 2013*. P. 6737883.

4. **Li L.L., Cheng P., Lin H.C., Dong H.** Short-term output power forecasting of photovoltaic systems based on the deep belief net // *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. № 9. P. 1687814017715983.

5. Wang J.A., Ran R., Zhou Y. Short-Term Photovoltaic Power Prediction Model Based on an FOS-ELM Algorithm // Applied Sciences. 2017. № 7 (4). P. 423.

6. Tianqi C., Carlos G. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // KDD '16: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining – 2016.

7. XGBoost. [Электронный текст] // URL:<https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=XGBoost> (дата обращения: 15.09.2023).

*Б.А. Староверов, gnatyukb@gmail.com,
Р.Н. Хамитов, apple_27@list.ru,
ОмГТУ, г. Омск*

СОЗДАНИЕ ПОДСИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ КОММЕРЧЕСКОГО УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ АНСАМБЛЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Прогнозирование электропотребления является важной задачей, обеспечивающей эффективную работу электрических сетей и сетевых компаний, оптимизацию закупок и энергоэффективность предприятий. Эта проблема активно исследуется уже много лет. Существует множество методов прогнозирования, однако до сих пор эта задача не решена полностью.

Прогнозирование электропотребления включает в себя множество связанных вопросов и условий. Существуют различные виды прогнозирования: оперативное (на час вперед), краткосрочное (на сутки вперед), долгосрочное (на неделю, на месяц вперед). Также существуют прогнозы как для усредненных показателей, так и для детализированных данных на почасовой основе.

Важным аспектом прогнозирования является тип потребителей, которые могут отличаться по масштабу и характеру. Это влияет на необходимость учета различных факторов для достижения

требуемой точности прогноза. Например, для регионального прогноза важно учитывать время года, тип дня и другие факторы, в то время как для прогноза предприятия важным становится режим работы оборудования и тип технологии.

Существует множество способов и методик для прогнозирования, включая тренды, нейронные сети, фильтры Виннера, рекуррентные методы и нечеткие множества [1]. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки, но главный общий недостаток перечисленных методов заключается в том, что они хорошо работают только для определенных регионов и типов нагрузок, требуя адаптации для других случаев. Поэтому основная цель состоит в разработке универсальной системы, которая сможет применяться для различных видов прогнозирования электропотребления.

В проведенном исследовании был выполнен анализ, выявивший наиболее эффективное применение нейронных сетей для данной задачи [2–6]. В результате была разработана система прогнозирования, обладающая инвариантностью к масштабу и характеру потребителей, для почасового прогнозирования электропотребления на сутки вперед.

В ходе исследования была решена проблема определения минимального входного вектора, необходимого для прогнозирования. После проведенного анализа были выбраны следующие параметры: день недели, месяц и час. Динамическая переменная включала почасовое потребление электроэнергии со сдвигом на пять суток. Таким образом, был сформирован небольшой входной вектор сигналов, состоящий из 8 переменных. Стоит отметить, что входные сигналы не включали показатели погоды или графики нагрузки, что было сделано специально для упрощения системы и обеспечения ее независимости от часовых поясов. Таким образом, система обладает инвариантностью в данном аспекте.

Следующим шагом был выбор подходящего типа нейронной сети из более чем 100 существующих и доступных видов. Было проведено множество экспериментов для определения наиболее подходящей сети для поставленной задачи прогнозирования.

Также была определена структура сети, то есть количество нейронов и слоев. При выборе структуры возникли проблемы недоучивания и переучивания сети, а также определение количества синаптических связей. В связи с отсутствием теоретически обоснованных методов выбора были проведены эксперименты, и эти проблемы были решены.

В итоге, на основе анализа и проведенных экспериментов, была разработана система прогнозирования электропотребления, использующая нейронные сети, но точность прогноза ненамного выигрывала у классических и экспертных методов.

Далее было выявлено, что с целью повышения точности и универсальности прогнозирования целесообразно использовать не одиночные специализированные нейронные сети, а ансамбли из таких сетей [7, 8]. Экспериментальные исследования подтвердили, что применение ансамблей повышает эффективность информационных систем прогнозирования. Пример полученной наиболее эффективной структуры ансамбля представлен на рис. 1.

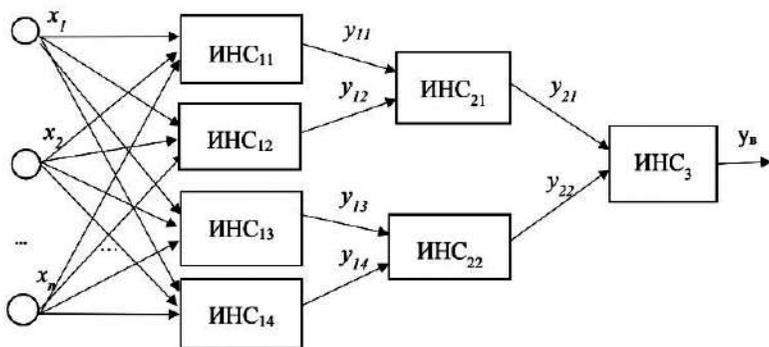


Рис. 1. Трехуровневый ансамбль с минимальным числом нейронных сетей

Известно, что источниками информации для прогнозирования электропотребления могут являться автоматизированные системы технического или коммерческого учета электроэнергии

(АСТУЭ или АСКУЭ). В связи с этим предложено объединить процессы измерения и прогнозирования электропотребления, что может дать положительный эффект при управлении передачей и распределением электроэнергии [9]. У автоматизированных систем учета электроэнергии появится новое интеллектуальное свойство – возможность «предсказания» состояния электросетей. Благодаря этому возможна реализация упреждающего управления, что даст существенное повышение технических и экономических показателей и улучшит качество управления.

Структурная схема подсистемы прогнозирования, построенная на основе ансамбля искусственных нейронных сетей, представлена на рис. 2. Она содержит: базу данных энергопотребления; нейронную сеть, классифицирующую вид графиков нагрузки; нейронные сети, которые осуществляют отдельные прогнозы электропотребления; нейронную сеть, обобщающую результаты прогнозирования отдельных нейронных сетей и за счет этого повышающую точность прогнозирования.

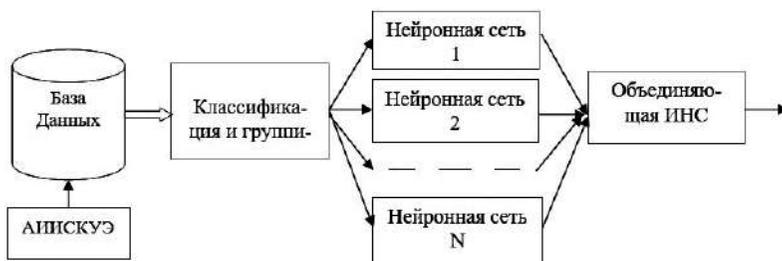


Рис. 2. Схема подсистемы прогнозирования на основе ансамбля нейронных сетей

Выводы. Благодаря проведенным исследованиям определён минимальный набор значимых факторов, который обеспечивает минимальную ошибку, что повышает универсальность данной программы. Экспериментальным методом определены виды сетей, архитектура и состав, которые обеспечивают необходимую точность при данном наборе факторов.

Объединение наиболее эффективных сетей с помощью линейной сети позволяет выровнять график ошибок сети и сделать систему более инвариантной. Включение подсистемы прогнозирования в состав системы измерения электропотребления может повысить качество управления электросетями и ускорить принятие управленческих решений. Таким образом, интеграция измеренных и прогнозных данных о потреблении электроэнергии позволяет осуществлять интеллектуальное управление режимами работы электрических сетей, что приводит к значительному улучшению технико-экономических показателей.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема: «Предиктивное управление потоками энергии электрогенерирующих комплексов Арктики и Крайнего Севера, при стохастических характерах потребления и генерации электрической энергии: теория, синтез, эксперимент», код темы: FENG-2023-0001).

Литература

1. **Khomutov S.O., Serebryakov N.A., Khamitov R.N., Gritsay A.S.** Methodology formation of the training sample short-term forecasting electricity load for an energy supply company using data mining technologies // Journal of Physics: Conference Series: 5. Omsk, 2021. P. 012070. DOI 10.1088/1742-6596/1901/1/012070. – EDN PKBCIS.

2. **Kovalev V., Arkhipova O., Paramzin A.** Renewable energy sustainability in terms of systems analysis // E3S Web of Conferences. Vol. 208. Yekaterinburg: EDP Sciences, 2020. P. 02008. DOI 10.1051/e3sconf/202020802008. – EDN XSPSCI.

3. **Староверов Б. А., Хамитов Р.Н.** Реализация глубокого обучения для прогнозирования при помощи ансамбля нейронных сетей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 4. С. 185–189. DOI 10.24412/2071-6168-2023-4-185-189. – EDN MNHGOP.

4. **Серебряков Н.А., Хамитов Р.Н.** Основы эффективной работы потребителей на электроэнергетическом рынке. Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2022. 84 с.

5. **Серебряков Н. А.** Разработка метода и нейросетевого алгоритма краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления гарантирующего поставщика: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. Н. Новгород, 2021. 169 с. EDN ВТИУСС.

6. **Абдурахманов А.М., Володин М.В., Зыбин Е.Ю., Рябченко В.Н.** Методы прогнозирования электропотребления в распределительных сетях (обзор) // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2016. Том 3. № 1. С. 3–21.

7. **Староверов Б.А., Шведенко В.Н.** Метод синтеза ансамбля нейронных сетей для прогнозирования потребления электроэнергии // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 3. С. 64–66.

8. **Staroverov B.A., Gnatyuk V.A.** Universal energy consumption forecasting system based on neural network ensemble // Optical Memory and Neural Networks. July 2016. Issue 3. Pp. 198–202.

9. **Архипова О.В., Ковалев В.З., Хамитов Р.Н.** Методика моделирования регионально обособленного электротехнического комплекса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 1. С. 173–180. DOI 10.18799/24131830/2019/1/63. –EDN POUNUR.

*М.Е. Малыш, MalyshMY@mpei.ru,
Ю.В. Матюнина, MatiuninaYV@mpei.ru
НИУ «МЭИ», г. Москва*

ПЛАНИРОВАНИЕ ГРАФИКА БАЗОВОЙ НАГРУЗКИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ СПРОСОМ

Управление спросом на электроэнергию (*demandresponse*) – это изменение потребителями графика нагрузки в ответ на изменение цен на электроэнергию с течением времени, или в ответ на стимулирующие платежи, направленные на сокращение потребления в периоды высоких цен на электроэнергию на оптовом рынке. Будем считать, что неявное управление спросом – это стимулирование потребителей за счет дифференцированных по времени суток тарифов и других ценовых сигналов, а явное – через специальные программы управления спросом.

Явное управление спросом на электроэнергию. Для участия в событии явного управления спроса необходимо определить заявляемый и фактический объемы снижения потребления. Основной подход – сравнение фактической нагрузки потребителя с нагрузкой, которая теоретически имела бы место в отсутствие события управления спросом [1]. Методы, реализующие такой подход: график базовой нагрузки; заявленный график; максимальная базовая нагрузка.

Рассмотрим планирование графика базовой нагрузки (ГБН). Для этого необходимо выбрать не менее 20 рабочих дней (их число N). Затем осуществляется расчет ГБН для $(N-10)$ последних дней из выбранной совокупности. Рассчитываются значения среднеквадратического отклонения RMSE и относительного среднеквадратического отклонения RRMSE для каждого из предусмотренных вариантов подстройки. Расчет оформляется в виде таблицы с указанием исходных данных: объема снижения потребления объекта управления и значений почасового потребления электроэнергии энергопринимающего устройства. Также в расчете должны быть представлены полученные результаты – рассчитанные

графики базовой нагрузки, значения RMSE и RRMSE. На сайте Системного оператора [1] предложен «Шаблон расчета (R)RMSE.xlsx».

Решение о возможности применения метода ГБН для определения объема снижения потребления энергопринимающего устройства принимается при одновременном выполнении двух условий:

– относительное среднеквадратическое отклонение ГБН от потребления электроэнергии RRMSE для совокупности рассматриваемых часов не превышает 0,2;

– удвоенное среднеквадратическое отклонение ГБН от потребления электроэнергии RMSE для совокупности рассматриваемых часов не превышает величину индикативного объема снижения потребления энергопринимающего устройства.

При неудовлетворительном результате расчётов по методу ГБН необходимо выбрать другие данные или использовать другой метод.

Минимизация ошибки при построении ГБН с использованием кластерного анализа. Исходя из расчетов параметров оценки минимального объема снижения потребления, можно сделать выводы, что чем больше СКО, тем больше нужно заявить снижение потребления. Поэтому необходимо привести СКО к как можно меньшему значению, исключая графики с самыми маленькими значениями максимума нагрузки и с самыми большими.

График с наиболее низкими значениями принимается в качестве «лучшей практики», к которой нужно стремиться. Задача потребителя – проанализировать технологические процессы в этот день, обусловившие снижение нагрузки. Также необходимо выявить причины появления графика с повышенными нагрузками.

На примере нескольких расчетов величины RMSE и RMSE для мая 2021 г. покажем, каким образом может измениться значение ошибки (RMSE и RMSE) при исключении неподходящих по различным причинам значений. Данные о потреблении электротехнического комплекса, по которым велись расчеты, представлены на рис. 1 и 2. Графики охарактеризованы двумя параметрами – P_{\max} и $P_{\text{средн}}$ (рис. 1), P_{\min} и $P_{\text{средн}}$ (рис. 2).

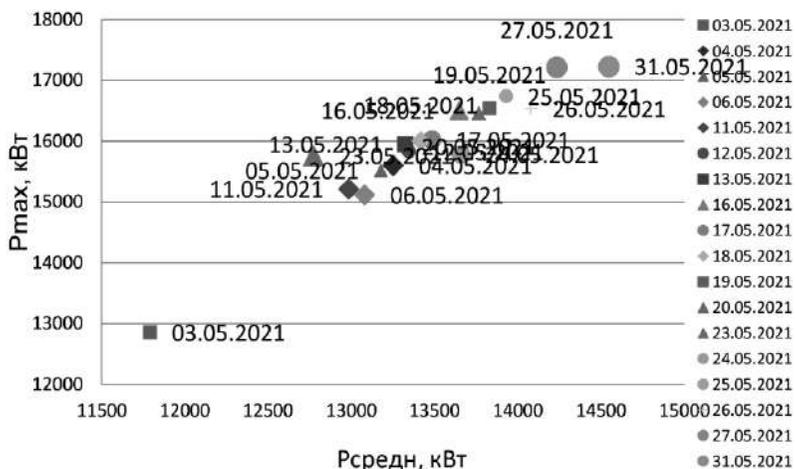


Рис. 1. Распределение графиков нагрузки электротехнического комплекса за будние дни мая 2021 г. по P_{\max} и $P_{\text{средн}}$

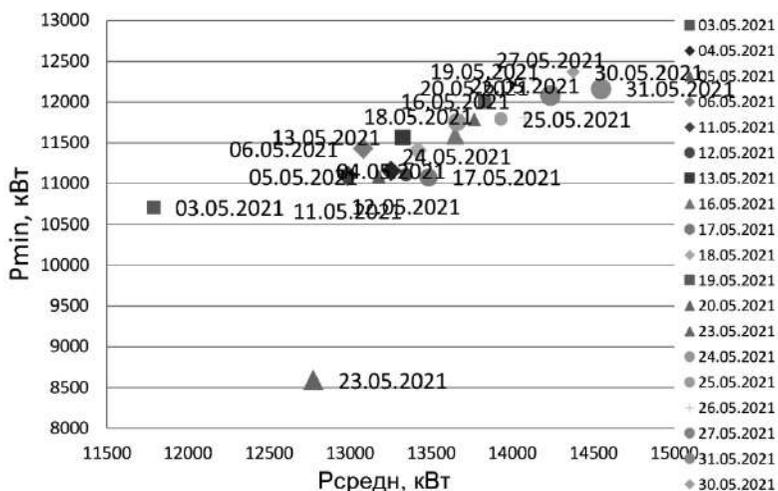


Рис. 2. Распределение графиков нагрузки электротехнического комплекса за будние дни мая 2021 г. по P_{\min} и $P_{\text{средн}}$

На рисунке 1 отчетливо выделяется день 3 мая. Из рисунка 2 видно, что потребление 23 мая и 3 мая значительно ниже и его можно исключить. Приведены результаты расчетов для 3 случаев (табл. 1):

Таблица 1

**Итоги расчетов RMSE и RRMSE
для будних дней за май 2021**

Выборка графиков нагрузки	RMSE без подстройки, кВт	RRMSE без подстройки, о.е
Все будние дни мая	1170	0,078
Без 23 мая	696	0,046
Без 3, 23, 31 мая	641	0,042

По итогам расчетов четко прослеживается уменьшение значений RMSE и RRMSE в два раза при исключении всего одного дня (23 мая) со значительным различием значений для 11 и 15 часов. Следовательно, необходимо выделять и исключать такие дни, даже если потребление различалось только для нескольких часов. Инструментом для этого может стать кластер-анализ по предложенным параметрам.

Отметим, что при исключении из выборки некоторых графиков нагрузки происходит изменение ГБН, по которому учитывается величина снижения нагрузки в часы управления спросом. Следовательно, чем выше значения потребления в ГБН, тем легче реализовать снижение потребления, так как снижение нагрузки будет отсчитываться от более высокой величины. Иллюстрирует это рис. 3, на котором показаны ГБН для трех случаев из табл. 1. Наилучшим будет график с исключением дня 23.05.

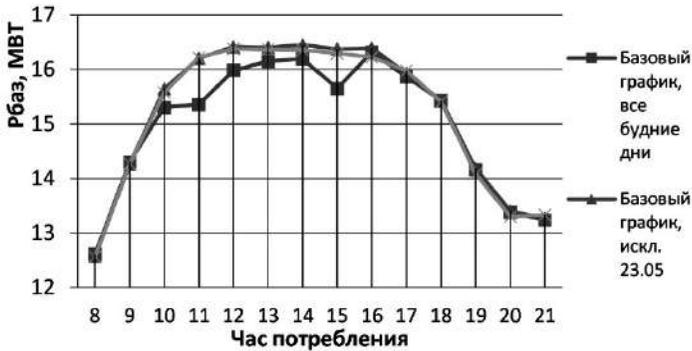


Рис. 3. Графики базовой нагрузки для трех случаев

Неявное управление спросом на электроэнергию. При неявном управлении спросом потребители могут получать выгоду за счет планирования графика нагрузки в зависимости от тарифов на электроэнергию. Можно выделить три способа.

1. По величине ставки за электроэнергию. Для получения выгоды необходимо переносить потребление электроэнергии на ночные часы [2].

2. По часам совокупного максимального потребления, в которые оплачивается мощность на оптовый рынок (публикуются на сайте администратора торговой системы ОАО «АТС» [3]). Нами предложено использовать вероятности назначения таких часов для каждого календарного месяца, по данным за 3 года (2020, 2021, 2022). Снижение нагрузки в наиболее вероятные часы дает значительный экономический эффект.

3. По часам пиковой нагрузки, с использованием которых оплачиваются услуги по передаче электроэнергии (публикуются на сайте Системного оператора [1]). В эти часы нельзя увеличивать нагрузку при планировании переноса с других часов, но можно грамотно регулировать ее.

Эффективный перенос нагрузки с заранее определенных потребителем часов суток дает значительный экономический эффект и может рассматриваться как инструмент неявного управления спросом, который имеет ряд преимуществ (табл. 2).

**Преимущества и недостатки явного
и неявного управления спросом
для электротехнического комплекса (ЭТК)**

Стратегия	Преимущества	Недостатки
Явное управление спросом	<p>Разработанная методика планирования величины снижения нагрузки</p> <p>Известные величины снижения нагрузки в заданные часы</p> <p>Возврат ЭТК «живых» денежных средств</p>	<p>Необходимость точно оценивать величину возможного снижения нагрузки</p> <p>Методика планирования графика требует определенной настройки</p> <p>Дни снижения нагрузки неизвестны заранее, но ЭТК должен находиться в готовности</p> <p>Требуется снижать нагрузку в течение 4 часов подряд, в дневное рабочее время</p> <p>Штрафы за невыполнение планового снижения</p>
Неявное управление спросом	<p>Возможно гибкое планирование снижения нагрузки</p> <p>Объемы снижения максимума не регламентированы</p> <p>Осуществляется в течение одного–двух заранее заданных часов (в каждый рабочий день)</p> <p>Штрафных санкций нет</p>	<p>Отсутствие возврата «живых» денежных средств, поэтому экономия неявная</p> <p>Необходимо оценивать неявную экономию, для чего планировать график нагрузки при управлении спросом и в его отсутствие</p> <p>Неизвестны заранее часы максимума энергосистемы, поэтому нужен вероятностный подход</p> <p>Изменение часов максимума от месяца к месяцу</p>

Для развития системы явного управления спросом на электроэнергию со стороны субъектов электроэнергетики следовало бы увеличить период упреждения при планировании дней и часов

событий управления спросом, чтобы ЭТК мог заранее подготовиться к снижению нагрузки. Кроме того, в настоящее время назначается только 5 дней в календарный месяц для всех участников. Следовало бы в перспективе переходить к равномерному распределению управления спросом на все рабочие сутки месяца.

Для участия в явном управлении спросом необходимо проводить ряд расчетов и заключать договор. При этом электротехнический комплекс должен снижать потребление в назначаемые часы (на протяжении 2, 4 или 8 часов) определенного дня. При невыполнении условий договора экономический эффект снизится или может быть сведен к нулю, также могут быть применены штрафы.

Корректировка графика нагрузки с учетом составляющей тарифа является неявным способом управления спросом и может использоваться ЭТК в качестве «репетиции» перед участием в явном управлении спросом. Электротехнический комплекс может проверить свои возможности по снижению нагрузки без заключения договора и проведения большого количества расчетов.

Далее, оценив свои возможности, электротехнический комплекс может участвовать в явном управлении спросом. После чего следует провести сравнительный анализ эффекта от участия в явном и неявном управлении спросом по экономическим параметрам и параметрам перестройки технологического процесса, на основании которого предприятие может выбрать подходящий способ участия в управлении спросом.

Литература

1. <https://www.so-ups.ru>
2. **Малыш М.Е., Матюнина Ю.В.** Оценка эффективности переноса нагрузки предприятия на ночные часы с использованием кластерного анализа // Промышленная энергетика. 2023. № 3. С. 38–44. DOI 10.34831/EP.2023.96.43.005. – EDN WDSGQW.
3. <https://www.atsenergo.ru/results/rsv/dr>

*Ю.А. Измайлов, IzmailovYA@tpei.ru,
Ю.В. Кошарная, KosharnyaYV@tpei.ru,
НИУ «МЭИ», г. Москва*

УПРАВЛЕНИЕ НАГРУЗКОЙ ПРЕДПРИЯТИЯ КАК СПОСОБ СНИЖЕНИЯ ЗАТРАТ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

Управление нагрузкой – это способность потребителя снижать своё потребление электроэнергии. Управление нагрузкой позволяет промышленному потребителю получить вознаграждение от Системного оператора за поддержание системной надежности [1], а также снизить стоимость приобретаемой электроэнергии на розничном рынке. Настоящий доклад посвящен технико-экономической оценке механизма управления нагрузкой на примере промышленного предприятия Костромской области для целей снижения стоимости потребляемой им электроэнергии и мощности. Предприятие приобретает электроэнергию на розничном рынке электроэнергии и мощности у независимой сбытовой компании по договору энергоснабжения для высокого уровня напряжения. В отношении предприятия на оптовом рынке электроэнергии и мощности зарегистрирована отдельная группа точек поставки. В договоре энергоснабжения зафиксированы условия ценообразования с учетом трансляции фактических затрат на приобретение электроэнергии и мощности на ОРЭМ, затрат на оказание услуг по передаче электроэнергии, а также фиксированная сбытовая надбавка.

На розничном рынке электроэнергии и мощности (РРЭМ) для конечного потребителя цены формируются на каждый час и включают 4 составляющие затрат: 1) стоимость покупки генерируемой электроэнергии и мощности на оптовом рынке – примерно 50%; 2) стоимость услуг по передаче электроэнергии – около 40%; 3) сбытовая надбавка – от 2 до 10%; 4) стоимость инфраструктурных платежей – до 1%.

В составе цены потребитель оплачивает две крупные составляющие: стоимость покупки электроэнергии и стоимость ее передачи до точек поставки [2].

Если разложить на компоненты оплату за генерацию электроэнергии и мощности на оптовом рынке (ОРЭМ), то в среднем в её структуре доля стоимости производства электроэнергии составляет порядка 47%, эта величина включает плату в секторах рынка на сутки вперед и балансирующего рынка. А стоимость оплаты мощности в конечной цене покупки на ОРЭМ составляет 53%, что включает в себя плату конкурентного отбора мощности, конкурентного отбора модернизируемых мощностей, договора предоставления мощности (в том числе возобновляемых источников энергии, генерации на твердо бытовых отходах), надбавки территорий Крыма и Дальнего Востока, надбавки ГЭС/АЭС (рис. 1).

Структура оплаты приобретенной электроэнергии

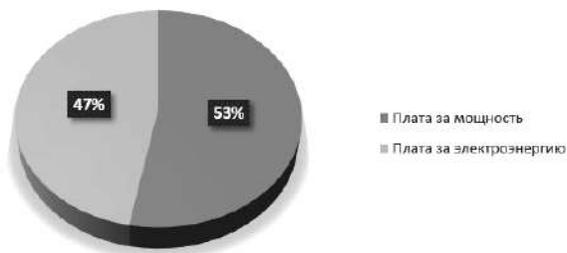


Рис. 1. Структура оплаты приобретенной электроэнергии

Соответственно в части оплаты услуг по передаче электроэнергии распределительной сетевой компании в двухставочном выражении цена электроэнергии (нагрузочные потери) в структуре оплаты составляет 44%, а цена оплаты мощности (содержание сетей) 56% (рис. 2).

Структура оплаты услуг по передаче электроэнергии

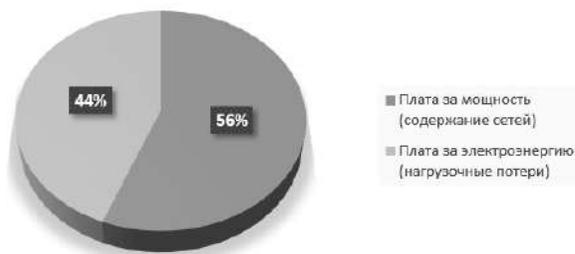


Рис. 2. Структура оплаты услуг по передаче электроэнергии

Таким образом, доля платежей за потребляемую и передаваемую мощность в составе конечной цены электропотребления составляет почти половину всей стоимости. Поэтому управление нагрузкой для рассматриваемого потребителя является действенным механизмом, который значительно повлияет на формирование конечных затрат на электроэнергию.

Поскольку расчеты величин мощности покупки на ОРЭМ и содержания сетей сопряжены с определенными часами рабочих суток в течение месяца, важно выявить закономерность назначения этих часов и сопоставить с ними периоды управления нагрузками потребителей.

Так, для расчета фактической мощности при покупке электроэнергии на ОРЭМ используется один час каждого рабочих суток, определяемый Администратором торговой системы (АТС) по окончании месяца как час максимальной мощности энергосистемы региона. А для определения фактической мощности при оказании услуг на передачу используется величина фактической максимальной мощности потребителя за период из нескольких часов в течение рабочих суток месяца, заданный Системным оператором как диапазон плановых часов пиковых нагрузок энергосистемы [3, 4].

Рассмотрим, каковы закономерности назначения вышеуказанных часов на примере Костромской области, и сопоставим их с профилем нагрузок потребителя данного региона – предприятия деревообрабатывающей промышленности. Для исследуемого предприятия в целом характерен довольно ровный график нагрузки в течение суток, однако снижение мощности несколько раз в течение рабочей смены будет приводить к нарушению технологических цепочек основного производства. Поэтому, с целью достижения максимально экономического эффекта от управления нагрузкой, важнее сконцентрироваться на оптимизации затрат покупной мощности ОРЭМ, а не платы за мощность при её передаче по сетям, в составе конечных затрат на электропотребление.

Анализ фактических часов максимума нагрузки для Костромской области за прошлые периоды, определяемых АТС и размещенных им на официальном сайте [3], показал, что пиковые часы в основном приходились на утренний пик энергосистемы.

Вероятность назначения часов максимума для каждого часа одного года рассчитывалась по формуле:

$$p_{\text{час.макс}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{раб}}} N_{\text{АТС}}^{i-\text{ПИК}}}{N_{\text{раб}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $\sum_{i=1}^{N_{\text{раб}}} N_{\text{АТС}}^{i-\text{ПИК}}$ – суммарное количество попаданий часов максимума в конкретный час за 2022 г.; i – рабочий день в 2022 г.; $N_{\text{раб}} = 247$ – количество рабочих дней в 2022 г.

В таблице 1 представлены результаты анализа вероятности принятия пиковых часов за 2022 год в Костромской области. Как видно, наиболее часто пиковые часы назначались в период с 10:00 до 13:00. Суммарно таких попаданий получилось 210, что дает значение вероятности, в вышеуказанный период равно $k_{\text{вер}} = 0,85$.

Вероятность назначения часов пика в 2022 г.

Час	Количество попаданий в часы пика	Вероятность принятия часом пик, %
10:00 – 11:00	87	35,22
11:00 – 12:00	89	36,03
12:00 – 13:00	34	13,77
Итого	210	85,02

С целью снижения нагрузки исследуемого предприятия в указанные часы необходимо определить перечень электроприемников, отключение которых на три часа не приведет к потерям в производстве основной продукции. При этом есть особая категория электроприемников, которую необходимо исключить из перечня электроприемников, участвующих в управлении нагрузкой. Это электроприемники, относящиеся к аварийной и технологической брони предприятия [5].

Величина технологической брони – это наименьшая потребляемая мощность энергопринимающих устройств потребителя и продолжительность времени, необходимые потребителю для безопасного завершения технологического процесса, цикла производства, внезапное прекращение электроснабжения которых вызывает необратимые нарушения технологического процесса, и (или) опасность для жизни и здоровья людей и окружающей среды. Они определяются по технологическим картам, проектной документации или на основании соглашения сетевой организации и потребителя электроэнергии (мощности). Величина аварийной брони – это наименьшая мощность, энергопринимающих устройств потребителя, обеспечивающая безопасное для жизни и здоровья людей и окружающей среды состояние предприятия с полностью остановленным технологическим процессом. Она определяется замерами или расчетным путем и не может быть выше нагрузки потребителя в нерабочий день. К таким электроприемникам относятся:

дежурное и охранное освещение, охранная и пожарная сигнализация, насосы пожаротушения, связь, аварийная вентиляция, отопление в зимнее время [2].

Таким образом, для управления нагрузкой предприятия предлагается ввести классификацию электроприемников по возможности разгрузки:

1 группа – критичное оборудование, относящееся к аварийной и технологической брони, а также электроустановки, максимально загруженные, останов которых приведет к срыву сроков сдачи продукции;

2 группа – электроустановки, останов которых из-за особенностей технологического процесса невозможен в течение 12-ти часов после получения сигнала о разгрузке, так как это приведет к браку продукции (например, печи с циклом более 12-ти часов и т.п.);

3 группа – электроприемники, не относящиеся к первым двум категориям, останов которых приведет к дополнительным затратам (загрузка оборудования равна продолжительности смены, что приводит к необходимости оплаты сверхурочных часов);

4 группа – электроприемники, не относящиеся к первым двум категориям, останов которых не приведет к дополнительным затратам (оборудование, месячная загрузка которого меньше чем продолжительность смен, что позволит сдвинуть работы по времени в течение месяца без оплаты сверхурочных часов);

5 группа – электроприемники, не относящиеся к технологическому оборудованию, останов которых не влияет на технологический процесс и не приводит к дополнительным затратам (освещение, тепловые завесы, вентиляция и т.п.).

Экономический эффект от управления нагрузкой может быть определен по формуле:

$$S = Ц \cdot k_{\text{вер}} \cdot P_{\text{п}}, \quad (2)$$

где $Ц$ – среднегодовая цена покупки мощности на ОРЭМ за 2022 г.; $k_{\text{вер}}$ – вероятность назначения часов пика в период с 10.00 до 13.00; $P_{\text{п}}$ – объем снижаемой мощности.

В результате, сформировав перечень электроприемников из 4 и 5 групп суммарной мощностью потребления 1 МВт, разгружаясь в рабочие дни в часы с 10:00 до 13:00 и перераспределив эту нагрузку на другие часы суток, предприятие Костромской области смогло получить за месяц экономический эффект в размере

$$882687,84 \text{ руб/МВт} \cdot 0,85 \cdot 1 \text{ МВт} = 750 \text{ 284 руб.}$$

За год экономический эффект от перераспределения нагрузки для исследуемого предприятия может составить порядка 9 млн руб.

Литература

1. **Постановление Правительства РФ** от 20.03.2019 г. № 287 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам функционирования агрегаторов управления спросом на электрическую энергию в Единой энергетической системе России, а также совершенствования механизма ценозависимого снижения потребления электрической энергии и оказания услуг по обеспечению системной надежности» // <https://www.so-ups.ru/functioning/laws/>

2. **Кошарная Ю.В., Матюнина Ю.В.** Нормативно-правовое обеспечение работы потребителей на рынках электроэнергии: учеб. пособие. М.: Издательство МЭИ, 2018. 76 с.

3. **Часы пиковой нагрузки** // <https://www.atsenergo.ru/results/market/calcfacthour>

4. **Плановые часы** пиковой нагрузки системного оператора // https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/2023/pik_chas2023.pdf

5. **Постановление Правительства РФ** от 04.05.2012 г. № 442 «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии» // <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102156905>

Секция 3

РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ, ОРГАНИЗАЦИЙ И УЧРЕЖДЕНИЙ

Е.Н. Соснина, sosnyna@yandex.ru,

Р.Ш. Бедретдинов, bedretdinov@nntu.ru

Е.В. Крюков, kryukov@nntu.ru,

Д.А. Гусев, goosev00@mail.ru,

НГТУ им. П. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ТИРИСТОРНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЯ И МОЩНОСТИ

Согласно исследованиям отечественных и зарубежных ученых перспективным является развитие электроэнергетики в соответствии с концепцией Интернета энергии [1, 2]. Данная технология направлена на превращение электрических сетей из пассивного устройства транспорта и распределения электроэнергии в активное, обеспечивающее энергетическую безопасность и качество электроснабжения [3, 4]. Взаимодействие распределенных источников электроэнергии, ее накопителей и активных потребителей реализуется на основе «горизонтальных» связей и многосторонних сервисов. Такой подход позволяет сохранить преимущества, характерные как для централизованных, так и децентрализованных систем электроснабжения [5, 6], а также расширить взаимодействие производителей и потребителей электроэнергии за счет обеспечения свободных перетоков мощности в распределительных электрических сетях (РЭС).

В настоящее время при построении РЭС, функционирующих по принципу Интернета энергии, основными задачами являются управление потоками мощности и обеспечение качества электро-

энергии. В Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева разработан тиристорный регулятор напряжения и мощности (ТРНМ), который позволяет решить данные задачи [7]. ТРНМ сочетает в себе функции фазоповоротного устройства и РПН, что позволяет решить основные задачи в РЭС, функционирующей по принципу Интернета энергии. Принципиальная схема и принцип работы ТРНМ приведены в [8].

Для исследования функциональных возможностей и режимов работы разработанного устройства в составе РЭС была создана физическая модель участка РЭС, функционирующей по принципу Интернета энергии, с двумя ТРНМ. С использованием физической модели можно получить наглядное представление процессов, происходящих в реальных системах, с учетом характеристик и ограничений, присущих реальным объектам, что сложно формализовать в математических моделях [9].

Структура физической модели РЭС. Однолинейная схема физической модели РЭС с двумя ТРНМ и ее внешний вид показаны на рис. 1.

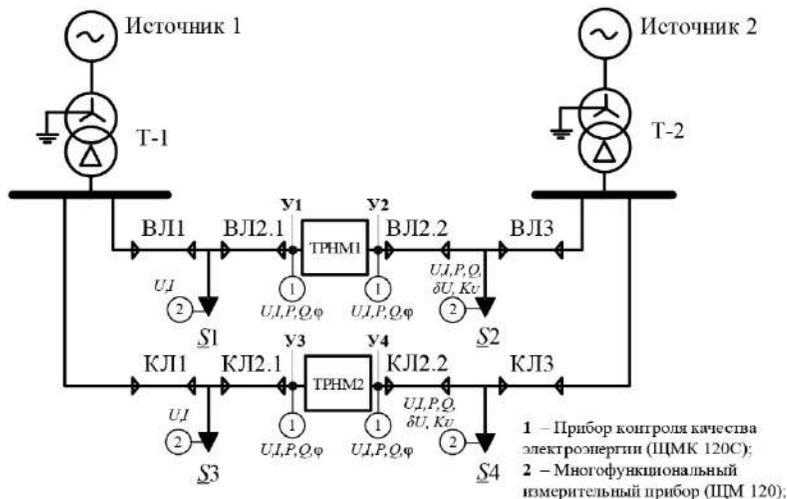


Рис. 1. Однолинейная схема участка РЭС с двумя ТРНМ:

ВЛ – воздушная линия, КЛ – кабельная линия; Т – силовой трансформатор

Физическая модель участка РЭС с двумя ТРНМ представляет собой комплекс функциональных блоков, размещенных на единой конструктивной основе: два источника питания; физические модели двух ТРНМ; блоки линии электропередачи; блоки нагрузки; приборы контроля качества электроэнергии ЩМК 120С и многофункциональные приборы ЩМ 120; система управления.

ТРНМ включает в себя модули продольного и поперечного регулирования. Задачей модуля продольного регулирования является изменение амплитуды напряжения. Модуль поперечного регулирования позволяет изменить фазовый угол напряжения, что влияет на перераспределение потоков мощности. ТРНМ имеет 32 режима регулирования:

– режимы № 0 – 16 (при продольном регулировании режим уменьшения напряжения, при поперечном регулировании режим запаздывания фазового угла напряжения);

– режим № 16 (базовый режим);

– режимы № 16 – 32 (при продольном регулировании режим увеличения напряжения, при поперечном регулировании режим опережения фазового угла напряжения)

Результаты экспериментальных исследований РЭС. Ниже приведены результаты экспериментальных исследований РЭС с ТРНМ в режимах продольного и поперечного регулирования. График изменения напряжения в зависимости от режимов регулирования модуля продольного регулирования ТРНМ 1 показан на рис. 2.

Из графика видно, что после регулирования ТРНМ1 значение напряжения в узле 2 (\underline{U}_2) повышается с 344 В до 377 В и достигает допустимого значения согласно ГОСТ 32144-2013. При этом значение напряжения в остальных узлах практически не меняется. При использовании ТРНМ2 возможно дальнейшее снижение напряжения в узлах.

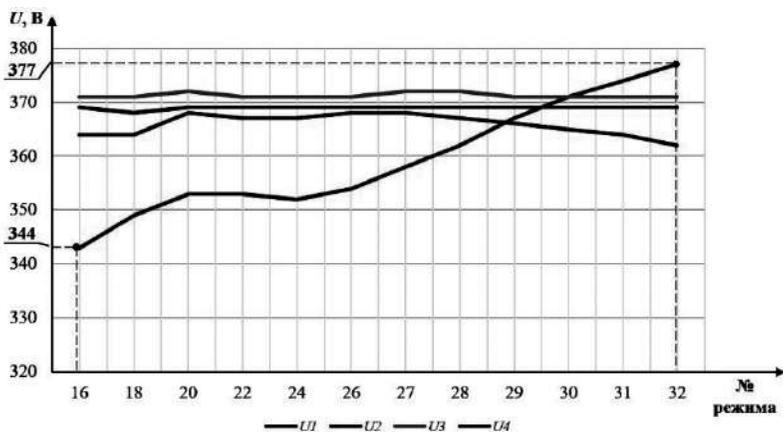


Рис. 2. График изменения напряжения в зависимости от режимов продольного регулирования ТРМ1

Экспериментальные зависимости изменения мощности при поперечном регулировании напряжения ТРМ2 в режиме запаздывания показаны на рис. 3.

При работе модуля поперечного регулирования обеспечивается сдвиг по фазе выходных напряжений относительно входных напряжений в диапазоне $\pm 5^\circ$. Это позволяет регулировать направление и величину потока активной мощности. При этом следует отметить взаимное влияние ТРМ на потокораспределение в рассматриваемой схеме.

Согласно приведенным графикам, в точке У3 наблюдается изменение значений мощностей, причем предполагается изменение направления потока активной мощности. Однако из-за влияния ТРМ1 активная мощность начинает увеличиваться, начиная с режима № 4, и направление сохраняется. В точке У4 потоки активной и реактивной мощностей изменяют направление после 7 режима. Следовательно, ТРМ2 является точкой потокораздела мощностей.

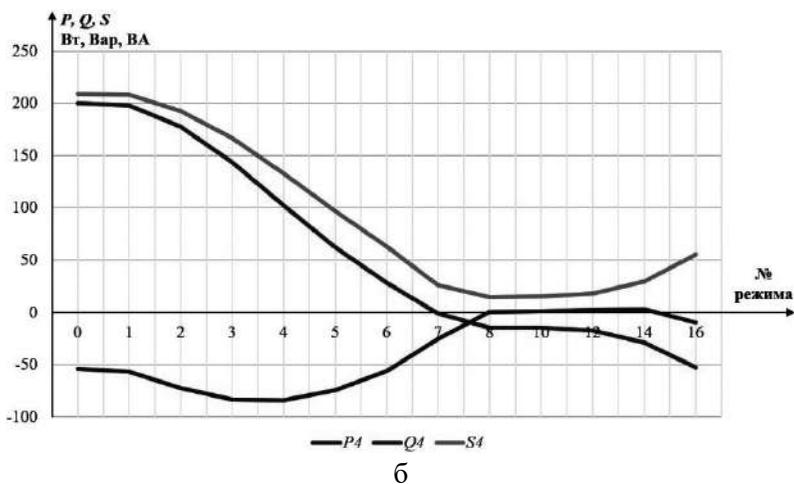
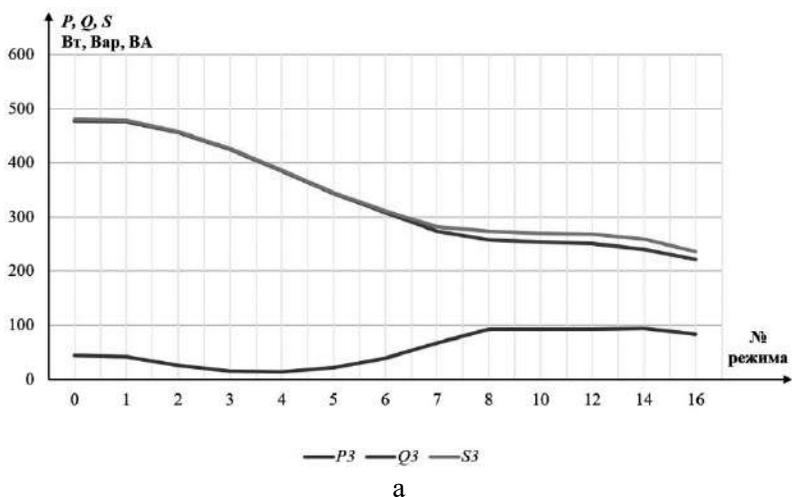


Рис. 3. Графики изменения мощности в точках УЗ (а) и У4 (б)

Заключение. Таким образом, проведенные экспериментальные исследования физической модели РЭС, функционирующий по принципу Интернета энергии, позволили проверить функциональные возможности ТРНМ. Проведены исследования режимов работы

ТРНМ при продольном и поперечном регулировании напряжения в составе РЭС. Установлено, что ТРНМ успешно решают задачи регулирования напряжения и перераспределения потоков мощности. Дальнейшая работа требует исследования взаимного влияния ТРНМ на узлы нагрузки электрической сети в различных режимах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках 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.).

Литература

1. **Suxiu L., Lin L., Xi K., Xingtong C.** Research on the Quantitative Evaluation of the Synergetic Degree of the Energy Internet Industry // 2021 5th International Conference on Power and Energy Engineering (ICPEE), Xiamen, China, 2021. Pp. 227–232. DOI: 10.1109/ICPEE54380.2021.9662644.

2. **Ye H. et al.** Virtual Energy Routing Strategy for Energy Internet with Renewable Energy // 2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition – Asia (ECCE-Asia), Singapore, 2021. Pp. 1459–1463. DOI: 10.1109/ECCE-Asia49820.2021.9479258.

3. **Han X., Wen S., Zhu M., Lin A.** Virtual Energy Router-Based Energy Internet Optimization: Comprehensive Investigation and Discussion // 2020 5th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), Shanghai, China, 2020. Pp. 203–208. DOI: 10.1109/ICPRE51194.2020.9233188.

4. **Li D., Zou Q., Liu X., Kong W., Meng J.** Review on the functional form and development trend of energy internet // 2021 International Conference on Artificial Intelligence, Big Data and Algorithms (CAIBDA), Xi'an, China, 2021. Pp. 128–132. DOI: 10.1109/CAIBDA53561.2021.00034.

5. **Rahouma A., Balda J.C., Adapa R.** A Medium-Voltage SiC Flying Capacitor Converter Design for 25-kV Distribution Systems // 2021 IEEE 12th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Chicago, IL, USA, 2021. Pp. 1–., DOI: 10.1109/PEDG51384.2021.9494228.

6. **Belhamidi M., Lakdja F., Boumediene L., Guentri H.** Analysis of D-SVC and D-STATCOM in Microgrids with Wind Farm Integration // 2022 IEEE International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), Tunis, Tunisia, 2022. Pp. 1–7. DOI: 10.1109/CISTEM55808.2022.10043943.

7. **Asabin A., Sosnina E., Belyanin I., Bedretdinov R., Kryukov E.** Control System of the Thyristor Voltage Regulator. // Proc. 2020 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). Pp. 802–806.

8. **Соснина, Е. Н.** Интеллектуальный регулятор потока мощности для активно-адаптивной электрической сети / Е.Н. Соснина, Е.В. Крюков, Д.А. Гусев // Фёдоровские чтения – 2022: ЛII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, с элементами научной школы для молодежи. М.: Издательский дом МЭИ, 2022. С. 224–233. EDN MEOBER.

9. **Крысанов, В.Н.** Разработка физических моделей объектов энергетики / В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков, Д.П. Лашенов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 7–2 (18–2). С. 39–43. DOI 10.12737/14938. EDN VONCDB.

*А.А. Лансберг, lansbergaa@vk.com,
А.В. Виноградов, winaleksandr@gmail.com,
ФГБНУ «ФНАЦ ВИМ», Москва*

ОБЗОР МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 6-10/0,4 кВ

В настоящее время математическое моделирование является одним из базовых инструментов анализа электрических сетей и исследования режимов их работы.

Так, в работе [1] на примере бытовой электросети многоквартирного жилого дома демонстрируется применение разработанного программного инструмента анализа случайных уровней несинусоидальности, который позволяет разрабатывать мероприятия по минимизации негативного влияния распространения нелинейных нагрузок на режим работы электрооборудования питающей сети.

В [2] разработан программный комплекс для расчета режимов электрических сетей с реализованным в нем модулем расчета надежности на основе матричного метода. Комплекс позволяет применять статистические данные, полученные по результатам наблюдений за действующим электрооборудованием электрических сетей, для определения значения вероятности безотказной работы рассматриваемой сети, исходя из конкретных условий ее эксплуатации. Полученные результаты позволяют выявить вероятность отказа и обеспечить возможность усиления контроля за электрооборудованием в процессе его эксплуатации.

В свою очередь, для исследования режимов работы действующей электрической сети 0,4 кВ, питающей потребителей с несимметричной и несинусоидальной нагрузками, разработана программа, позволяющая производить оценку факторов, искажающих качество электрической энергии и обуславливающих ее потери, соответственно. Результаты имитационного моделирования позволяют повысить качество электроэнергии и снизить дополнительные потери, обусловленные несимметрией, несинусоидальностью и нефункциональными потоками реактивной мощности [3].

Следует отметить, что в настоящее время в электрических сетях 0,4 кВ есть ряд эксплуатационных проблем, связанных с надежностью электроснабжения, качеством электроэнергии и электробезопасностью. Их возможно исследовать с помощью математического моделирования. Так, в работе [4] авторы на

примере воздушных линий электропередачи 0,4 кВ выявили, что ввиду завышенной протяженности сети и низкого сечения используемого провода токи однофазного короткого замыкания в наиболее удаленных точках электрической сети 0,4 кВ имеют низкие значения, приводящие к проблеме обеспечения чувствительности защитных коммутационных аппаратов.

Проблемы электробезопасности также актуальны для кабельных линий электропередачи напряжением до 1 кВ. В [5, 6] исследуются значения токов однофазных и двухфазных коротких замыканий при использовании силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ со схемой соединения обмоток треугольник – звезда с нулем и одиннадцатой группой (D/Yn) для выбора минимального значения, на которое следует настраивать защитный коммутационный аппарат линии.

Ввиду необходимости исследования процессов в электрических сетях до 1 кВ и преимуществ математического (компьютерного) моделирования инженерами команды «Проект РЗА» была разработана модель сети 6-10 0,4 кВ, внешний вид которой представлен на рис. 1 [6].

Для оценки возможности использования модели и достоверности получаемых данных в работе планируется провести сравнительный анализ результатов расчетов токов однофазных коротких замыканий разными способами со значениями, получаемыми при моделировании.

Цель исследования заключается в определении возможности использования математической модели электрической сети 0,4 кВ для изучения режимов ее работы. Для проведения исследования используется математическая модель, разработанная командой «Проект РЗА». Структурная схема используемого функционала модели для расчета значений токов однофазного короткого замыкания представлена на рис. 2.

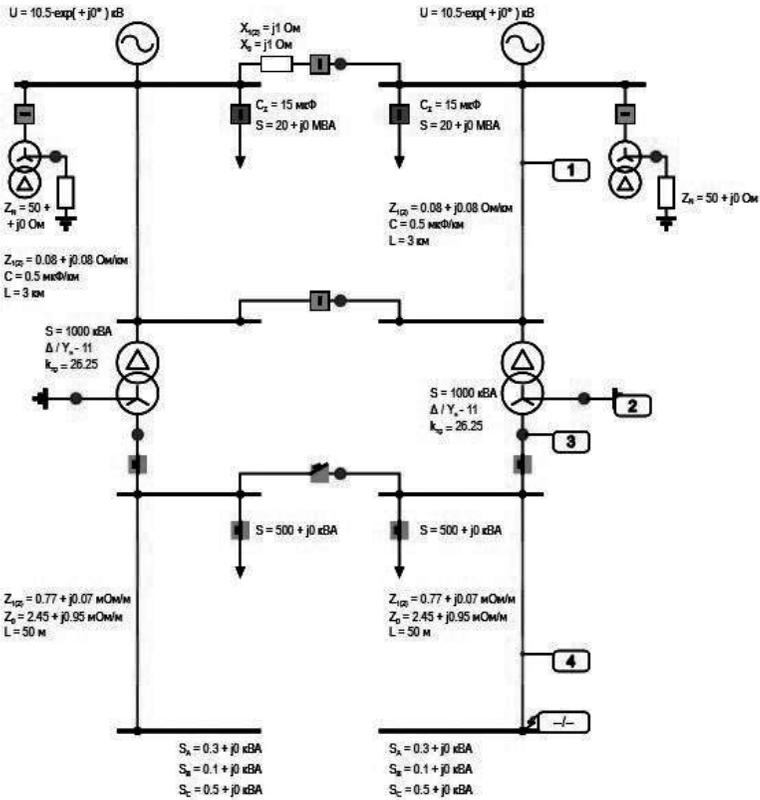


Рис. 1. Схема модели сельской электрической сети 0,4 кВ

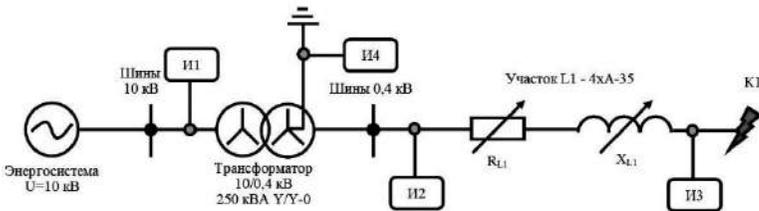


Рис. 2. Структурная схема модели сельской электрической сети 0,4 кВ для изучения режима однофазного короткого замыкания

Представленная на рис. 1 схема электрической сети 0,4 кВ содержит следующие элементы:

1) энергосистему, параметры которой задаются базисным напряжением U_b и током трехфазного короткого замыкания $I_k^{(3)}$;

2) трансформатор мощностью 250 кВА с соотношением напряжений 10/0,4 кВ и схемой и группой соединения обмоток звезда–звезда с нейтральным проводом (Y/Y-0), параметры которого задаются потерями короткого замыкания P_k , напряжением короткого замыкания U_k и отношением индуктивных сопротивлений нулевой и прямой последовательности (X_0/X_1);

3) воздушную линию электропередачи 0,4 кВ L1, выполненную проводом А-35, параметры которой задаются протяженностью L , активными и индуктивными сопротивлениями прямой и нулевой последовательности (R_1, X_1, R_0, X_0);

4) четыре измерительных блока, установленных на вводе трансформатора 10 кВ (И1), на выводе трансформатора 0,4 кВ (И2), в точке короткого замыкания (И3) и в нейтрали обмотки низшего напряжения силового трансформатора 10/0,4 кВ (И4);

5) блок К1, моделирующий аварийную ситуацию в электрической сети 0,4 кВ.

Представленная модель позволяет исследовать режимы работы сельской электрической сети 0,4 кВ при возникновении симметричных и несимметричных токов короткого замыкания, обрывов проводников, которые имитируются блоком К1. Блок К1 позволяет имитировать следующие повреждения:

- 1) однофазное короткое замыкание;
- 2) двухфазное короткое замыкание;
- 3) двухфазное короткое замыкание на землю;
- 4) трехфазное короткое замыкание;
- 5) обрыв фазы;
- 6) обрыв двух фаз;
- 7) обрыв трех фаз.

В процессе моделирования измерители И1 – И4 позволяют измерять в точке установки:

- 1) фазные токи;
- 2) линейные токи;
- 3) составляющие токов прямой, обратной и нулевой последовательности;
- 4) ток нейтрали;
- 5) фазные напряжения;
- 6) междуфазные напряжения;
- 7) составляющие напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности;
- 8) утроенное значение напряжения нулевой последовательности и ток нейтрали.

Моделирование осуществляется с использованием метода симметричных составляющих, в ходе которого все элементы схемы задаются сопротивлениями и указывается базисное напряжение модели, что позволяет осуществить расчет фазных токов и других электрических параметров.

Для расчета сопротивления системы значение тока трехфазного короткого замыкания на вводе 10 кВ трансформатора было принято 1 кА, поскольку токи такой величины характерны для сельских электрических сетей 10 кВ [8]. Для линии 0,4 кВ был выбран проводник марки А-35 в связи с тем, что среди голых неизолированных проводов он является наиболее распространенным в сельских электрических сетях 0,4 кВ по сравнению с другими марками и сечениями проводников [9]. Протяженность линии будем моделировать до значения 1000 м, так как наибольшая средняя протяженность воздушных линий электропередачи 0,4 кВ в Центральном и Приволжском федеральных округах РФ, которые обслуживаются электросетевыми организациями ПАО «Россети Центр» и ПАО «Россети Центр и Приволжье» – 985 м [10].

Одним из недостатков модели является невозможность использования трансформаторов всех номинальных мощностей согласно ГОСТ 9680-77 «Трансформаторы силовые мощностью 0,01 кВ·А и более. Ряд номинальных мощностей». Так, в качестве

питающего силового трансформатора (СТ) следовало использовать ТМ-100, при этом разработанная модель не позволяет задавать трансформаторы мощностью менее 250 кВА. Отметим, что трансформаторы мощностью 250 кВА широко распространены – в «Орелэнерго» их численность составляет 802 единицы, т.е. 13% от общего числа трансформаторов 6206 [11].

Для оценки адекватности данных, получаемых с помощью разработанной модели, были рассчитаны токи однофазного короткого замыкания по упрощенному методу петли фаза–ноль, предложенному И.А. Будзко и Т.Б. Лещинской [12], а также в соответствии с ГОСТ 28249-93 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ».

Расчет токов однофазного короткого замыкания по методу И.А. Будзко и Т.Б. Лещинской производится следующим образом:

$$I_{кз}^1 = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_T}{3} + Z_{\phi-0}},$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение сети, В; Z_T – полное сопротивление трансформатора току однофазного замыкания на корпус, Ом; $Z_{\phi-0}$ – полное сопротивление петли фаза–ноль от трансформатора до точки КЗ, Ом.

В электроустановках, питающихся от понижающих трансформаторов напряжением до 1 кВ, значение тока однофазного короткого замыкания в соответствии с ГОСТ 28249-93 рассчитывается как

$$I_{кз}^1 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{ср.нн}}{\sqrt{(2 \cdot r_1 + r_0)^2 + (2x_1 + x_0)^2}},$$

где $U_{ср.нн}$ – среднее номинальное напряжение сети, в которой произошло замыкание, В; r_1, x_1 – соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности

цепи КЗ, Ом; r_0 , x_0 – соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления нулевой последовательности цепи КЗ, Ом.

Следует отметить, что исследуемый режим однофазного короткого замыкания по ГОСТ 26522-85 «Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения» - это режим короткого замыкания на землю в трехфазной электроэнергетической системе с глухо или эффективно заземленной нейтралью силового трансформатора, при котором с землей соединяется только одна фаза. В связи с этим, согласно теории переходных процессов, примем в настоящем исследовании за особую (поврежденную) фазу А, параметры которой будут отличаться от параметров других фаз; по ней будет протекать ток короткого замыкания, при этом в других он будет отсутствовать, т.е. они будут работать в режиме холостого хода. Также следует отметить, что в точке короткого замыкания напряжение поврежденной фазы А будет равно 0 В.

Результаты расчетов тока однофазного короткого замыкания с использованием трех методов представлены на рис. 3.

Ток однофазного короткого замыкания на выводе трансформатора 0,4 кВ по ГОСТ 28249-93 составляет 2107 А, по методу И.А. Будзко и Т.Б. Лещинской – 2115 А, по модели «Проект РЗА» – 2150 А. При этом значения токов однофазного короткого замыкания в наиболее удаленной точке (1000 м от трансформатора) составили: по ГОСТ 28249-93 – 121 А; по методу И.А. Будзко и Т.Б. Лещинской – 115 А; по модели «Проект РЗА» – 86 А. Также отметим, что значение тока однофазного короткого замыкания по модели «Проект РЗА» на удалении 500 м от трансформатора составляет 167 А, по ГОСТ 28249-93 – 233 А, по методу И.А. Будзко и Т.Б. Лещинской – 219 А.

Следовательно, в наиболее удаленной точке расхождение результатов составляет 29 %. При этом на шинах 0,4 кВ ввиду больших значений токов однофазного короткого замыкания расхождение составляет не более 2 %. Разность результатов на удалении 500 метров от вывода силового трансформатора составляет 24 %.



Рис. 3. Результаты расчетов токов однофазного короткого замыкания в электрической сети 0,4 кВ при использовании трансформатора ТМ-250 и провода А-35

Таким образом, возможно использование модели сельской электрической сети 6-10/0,4 кВ, разработанной инженерами «Проект РЗА» для расчета токов однофазного короткого замыкания.

В заключение отметим, что модель можно использовать и для решения других задач, например, для моделирования режимов работы сети 6-10 кВ с пунктами сетевого секционирования и резервирования [13–15].

Литература

1. Янченко С.А., Рыжкова Е.Н., Цырук С.А. Программный инструмент анализа случайных уровней показателей качества электроэнергии бытовых электросетей // Промышленная энергетика. 2023. № 5. С. 46–54.

2. **Агеев В.А., Душутин К.А., Репьев Д.С., Казаков Д.В.** Исследование надежности электрических сетей с применением статистических данных // Промышленная энергетика. 2023. № 3. С. 2–8.

3. **Наумов И.В., Федоринова Э.С., Якупова М.А.** Минимизация последствий искажения качества электрической энергии при несимметрично-несинусоидальном электропотреблении // Промышленная энергетика. 2023. №3. С. 52–61.

4. **Сорокин Н.С., Виноградова А.В.** Расчет трёхфазных и однофазных коротких замыканий в электрических сетях 0,4 кВ для проверки чувствительности защитных аппаратов // Агротехника и энергообеспечение. 2020. № 4 (29). С. 25–34.

5. **Попов М.Г., Лapidус А.А., Соловьева С.Н.** Особенности выбора расчетного вида короткого замыкания при определении чувствительности защитных аппаратов в сетях 0,4 кВ // Релейная защита и автоматизация. 2022. № 2 (47). С. 11–15.

6. **Solovjeva S.N., Lapidus A.A., Bobko Y.A.** Improving the methods for calculating the heating of low voltage cables // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIconRus 2020. P. 883–887.

7. **Проект РЗА.** Лаборатория РЗА. URL: <https://pro-rza.ru/laboratoriya-rza/> (дата обращения: 22.08.2023 г.).

8. **Виноградов А.В., Капитонов А.И., Лансберг А.А., Сорокин Н.С., Фомин И.Н.** Определение токов коротких замыканий в сельской электрической сети 10 кВ, секционированной реклоузерами для осуществления дистанционного контроля их срабатывания // Вестник аграрной науки Дона. 2021. № 1 (53). С. 34–43.

9. **Балабин А.А., Виноградов А.В., Лансберг А.А.** Анализ работы и рекомендации по совершенствованию системы накопления электрической энергии, установленной в сельской электрической сети 0,4 кВ // Агроинженерия. 2022. Т. 24. № 1. С. 72–79.

10. **Виноградов А.В., Лансберг А.А., Сорокин Н.С.** Характеристика электросетевых компаний по количеству и протяженности линий электропередачи, мощности подстанций // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69. № 2 (47). С. 31–41.

11. **Лансберг А.А., Виноградов А.В., Виноградова А.В.** Структура парка силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ на примере электросетевой организации филиала ПАО «Россети Центр» – «Орелэнерго», обслуживающей сельские электрические сети // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 5. С. 34–45.

12. **Электроснабжение сельского хозяйства** / И.А. Будзко, Т.Б. Лещинская, В.И. Сукманов. М.: Колос, 2000. 536 с.

13. **Фомин И.Н., Беликов Р.П.** Разработка алгоритма дистанционного контроля отключения секционирующего выключателя линии электропередач // Вестник аграрной науки. 2018. № 4 (73). С. 98–105

14. **Фомин И.Н., Беликов Р.П.** Запрет включения АВР выключателя в кольцевой сети // Вестник Орловского государственного аграрного университета. 2017. № 4 (67). С. 93–99.

15. **Фомин И.Н., Беликов Р.П.** Алгоритм дистанционного контроля головного выключателя линии электропередачи // Вестник Орловского государственного аграрного университета. 2016. № 4 (61). С. 72–77.

Р.Н. Пудовинников, roman73-73@yandex.ru,

В.В. Вахнина, vvahнина@yandex.ru,

ФГБОУ ВО «ТГУ», Тольятти

МОДИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Среди прикладных программных комплексов (ПК), ориентированных на численные расчеты, широкое распространение получил ПК MATLAB [1]. ПК стал мировым стандартом в области

современного математического и научно-технического программного обеспечения. Пакет расширения Simulink ПК MATLAB предназначен для математического моделирования линейных и нелинейных динамических систем и устройств, представленных своей функциональной блок-схемой. При этом Simulink содержит наборы готовых блоков, позволяющих создавать модели сложных систем по обработке сигналов, а библиотека SimPowerSystems включает блоки источников электрической энергии, электрических машин, устройств силовой электроники, измерительных и контрольных устройств, электротехнических элементов, позволяющих создать модель достаточно сложной системы электроснабжения (СЭС). При работе с Simulink пользователь имеет возможность модернизировать библиотечные блоки, создавать свои собственные, а также составлять новые библиотеки блоков. Данная особенность используется при моделировании в ПК MATLAB воздействия геомагнитных возмущений на сложные системы электроснабжения, т.к. отсутствие библиотеки моделей, позволяющей моделировать воздействие геомагнитных возмущений, затрудняет создание моделей СЭС для исследования процессов распространения геоиндуцированных токов (ГИТ) в ее элементах.

Одной из особенностей геомагнитных возмущений является то, что они способны охватывать всю территорию, на которой расположена СЭС [2]. В этом случае ГИТ воздействуют одновременно на все силовые трансформаторы и автотрансформаторы с заземленными нейтральными обмотками высокого напряжения (ВН). Поэтому геомагнитные возмущения, вызванные повышенной геомагнитной активностью, являются глобальным возмущающим воздействием, в отличие от всех других видов возмущений в СЭС (например, коротких замыканий, коммутаций мощного электрооборудования, грозных разрядов).

В модель СЭС входит набор стандартных элементов: генераторы, повышающие и понижающие трансформаторы, линии электропередач, нагрузка. Одним из основных элементов СЭС явля-

ются линии электропередачи (ЛЭП), которые служат для транспортировки электроэнергии и связывают электростанции, подстанции и потребителей.

В качестве стандартной модели ЛЭП общепринята Π -образная схема замещения, изображённая на рис. 1 [3], где обозначены параметры:

- r_L – активное сопротивление продольной ветви;
- x_L – индуктивное сопротивление продольной ветви;
- b_L – реактивная проводимость поперечной ветви;
- g_L – активная проводимость поперечной ветви.

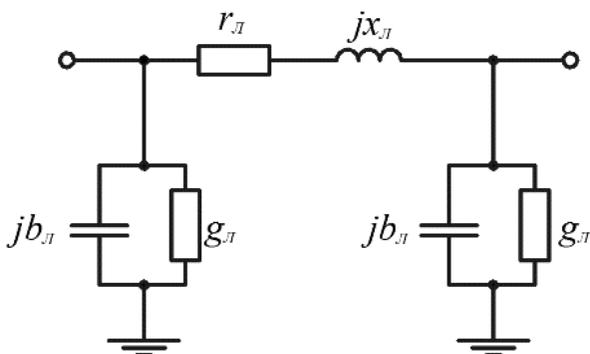


Рис. 1. Стандартная Π -образная схема замещения ЛЭП

Для определения параметров Π -образной схемы замещения ЛЭП используют погонные параметры – погонные сопротивления r_0 , x_0 и проводимости b_0 и g_0 , которые являются справочными (каталожными) данными, их можно найти в электротехнических справочниках по известным марке, сечению фазного провода, количеству проводов в фазе и классу напряжения ЛЭП. Пример диалогового окна ввода и редактирования параметров ЛЭП представлен на рис. 2.

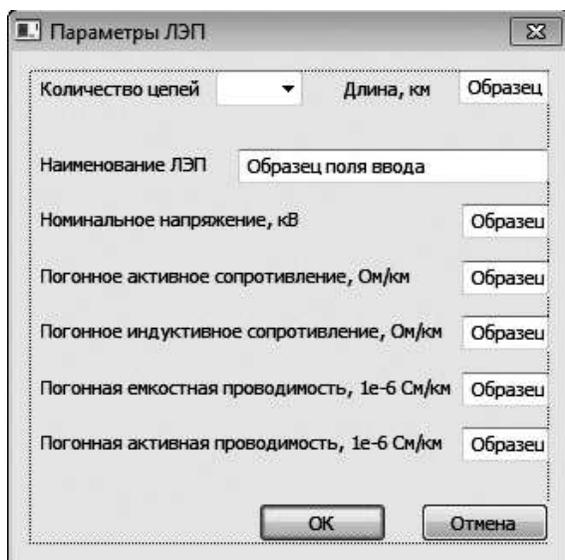


Рис. 2. Диалоговое окно редактирования параметров ЛЭП

Формулы для расчёта параметров П–образной схемы замещения должны выбираться с учётом соотношения длины ЛЭП и длины волны переменного напряжения и тока (≈ 6000 км) на частоте 50 Гц.

1. При длине ЛЭП менее 5% длины волны ($l \leq 300$ км) допустимо не учитывать распределённость параметров линии.

2. При длине ЛЭП от 5 до 10% длины волны ($300 < l \leq 600$ км) распределенный характер параметров линии может учитываться с помощью поправочных коэффициентов K_r , K_x , K_b .

3. При длине ЛЭП более 10% длины волны ($l > 600$ км) необходимо учитывать волновые свойства линии, при этом используются коэффициент затухания α_0 и коэффициент фазы β_0 .

Расчётные выражения для определения параметров П–образной схемы замещения ЛЭП длиной $l \leq 300$ км, $300 \text{ км} < l \leq 600$ км, $l > 600$ км представлены в табл. 1.

Параметры П-образной схемы замещения ЛЭП

Название параметра ЛЭП	Формула для определения параметра ЛЭП	
	$l \leq 300$ км	$300 \text{ км} < l \leq 600$ км
Активное сопротивление продольной ветви	$r_{\text{Л}} = r_0 \cdot l \cdot \frac{1}{n_c}$	$r_{\text{Л}} = K_r \cdot r_0 \cdot l \cdot \frac{1}{n_c}, K_r = \left(1 - \frac{l^3}{3} \cdot x_0 \cdot b_0\right)$ $r_{\text{Л}} = \left(\sqrt{\frac{x_0}{b_0}} \cdot [sh(\beta_0 \cdot l) \cdot \cos(\alpha_0 \cdot l)]\right) \cdot \frac{1}{n_c}$ $\alpha_0 = \sqrt{x_0 \cdot b_0} \cdot \left(1 + \frac{r_0^2}{8 \cdot x_0^2}\right), \beta_0 = \frac{r_0}{2} \cdot \sqrt{\frac{b_0}{x_0}}$
Индуктивное сопротивление продольной ветви	$x_{\text{Л}} = x_0 \cdot l \cdot \frac{1}{n_c}$	$x_{\text{Л}} = K_x \cdot x_0 \cdot l \cdot \frac{1}{n_c}, K_x = 1 - \frac{l^2}{6} \cdot \left(x_0 \cdot b_0 - r_0^2 \cdot \frac{b_0}{x_0}\right)$ $x_{\text{Л}} = \left(\sqrt{\frac{x_0}{b_0}} \cdot [sh(\beta_0 \cdot l) \cdot \sin(\alpha_0 \cdot l)]\right) \cdot \frac{1}{n_c}$
Реактивная проводимость поперечной ветви	$b_{\text{Л}} = \left(\frac{1}{2} \cdot b_0 \cdot l\right)$	$b_{\text{Л}} = \left(\frac{1}{2} \cdot K_b \cdot b_0 \cdot l\right) \cdot n_c, K_b = \frac{K_r + 3}{2 \cdot (K_r + 1)}$ $b_{\text{Л}} = \left(\frac{b_0}{\sqrt{x_0}} \cdot \frac{\sin(\alpha_0 \cdot l)}{ch(\beta_0 \cdot l) + \cos(\alpha_0 \cdot l)}\right) \cdot n_c$
Активная проводимость поперечной ветви	$g_{\text{Л}} = \left(\frac{1}{2} \cdot g_0 \cdot l\right)$	$g_{\text{Л}} = \left(\frac{1}{2} \cdot g_0 \cdot l\right) \cdot n_c$ $g_{\text{Л}} = \left(\frac{b_0}{\sqrt{x_0}} \cdot \frac{sh(\alpha_0 \cdot l)}{ch(\beta_0 \cdot l) + \cos(\alpha_0 \cdot l)}\right) \cdot n_c$

Для анализа влияния глобального возмущающего воздействия на СЭС в ПК MATLAB разработана модифицированная модель линии электропередачи, которая формируется путём дополнения стандартной П-образной модели, изображённой на рис. 1, моделью заземляющего устройства с плавающим потенциалом φ_i при $R_i = 0$ (приведена на рис. 3).



Рис. 3. Условно-графическое обозначение (а) и схема замещения (б) заземляющего устройства с плавающим потенциалом

Схема замещения одной фазы модифицированной линии электропередачи показана на рис. 4.

В таблице 2 представлены дифференциальные уравнения и уравнения баланса токов, полученные для одной фазы модифицированной математической модели ЛЭП, приведенной на рис. 4.

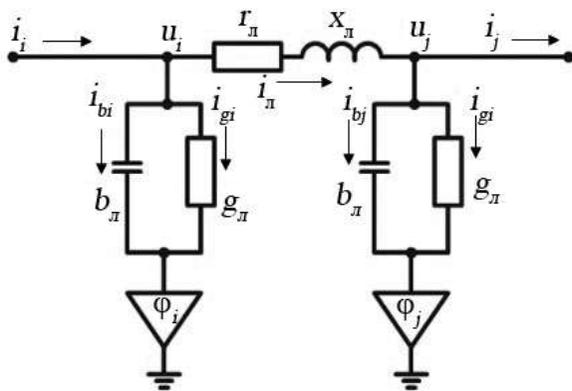


Рис. 4. Схема замещения одной фазы модифицированной модели ЛЭП

Дифференциальные уравнения и уравнения баланса токов одной фазы модифицированной модели ЛЭП

Дифференциальные уравнения переходного процесса	
изменения напряжения i -го узла	$\frac{du_i}{dt} = \frac{\omega_{\text{НОМ}}}{b_{\text{Л}}} \cdot \left[i_i - i_{\text{Л}} - g_{\text{Л}} \cdot (u_i - \varphi_i) \right] + \frac{d\varphi_i}{dt}$
изменения напряжения j -го узла	$\frac{du_j}{dt} = \frac{\omega_{\text{НОМ}}}{b_{\text{Л}}} \cdot \left[i_{\text{Л}} - i_j - g_{\text{Л}} \cdot (u_j - \varphi_j) \right] + \frac{d\varphi_j}{dt}$
изменения фазного тока	$\frac{di_{\text{Л}}}{dt} = \frac{\omega_{\text{НОМ}}}{x_{\text{Л}}} \cdot (u_i - u_j - r_{\text{Л}} \cdot i_{\text{Л}})$
Уравнения баланса токов	
i -го узла	$i_i = i_{\text{Л}} + i_{bi} + i_{gi}; \quad i_{gi} = g_{\text{Л}} \cdot (u_i - \varphi_i);$ $i_{bi} = \frac{b_{\text{Л}}}{\omega_{\text{НОМ}}} \cdot \left(\frac{du_i}{dt} - \frac{d\varphi_i}{dt} \right)$
j -го узла	$i_j = i_{\text{Л}} - i_{bj} - i_{gj} = g_{\text{Л}} \cdot (u_j - \varphi_j);$ $i_{bj} = \frac{b_{\text{Л}}}{\omega_{\text{НОМ}}} \cdot \left(\frac{du_j}{dt} - \frac{d\varphi_j}{dt} \right)$

Следует отметить, что при отсутствии глобального возмущающего воздействия в дифференциальных уравнениях переходного процесса и уравнениях баланса токов, приведенных в табл. 2, необходимо принимать $\varphi_i = \varphi_j = 0$. Тогда модифицированная математическая модель ЛЭП трансформируется в стандартную П-образную модель.

На рисунке 5 представлена трёхфазная схема замещения модифицированной математической модели ЛЭП, которая составлена без учёта взаимной индуктивности фазных проводов. Дифференциальные уравнения переходного процесса и уравнения баланса токов для каждой фазы А, В, С трёхфазной модифицированной

модели ЛЭП записываются аналогично уравнениям для одной фазы на основании соответствующих уравнений, приведенных в табл. 2 для математической модели одной фазы ЛЭП.

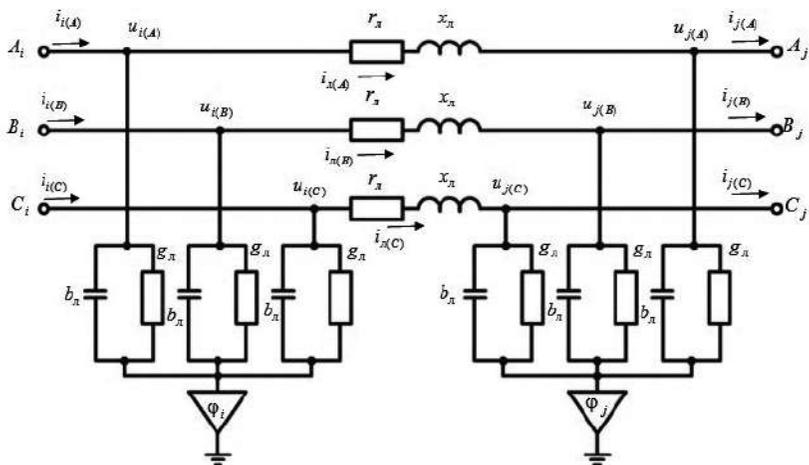


Рис. 5. Трёхфазная схема замещения модифицированной математической модели ЛЭП

Так как при воздействии геомагнитных возмущений геиндуцированные токи способны изменить режим функционирования СЭС [4], важной задачей является определение начальных условий для расчёта переходного процесса, вызванного глобальным возмущающим воздействием. Исходными данными для определения начальных условий в трёхфазной схеме замещения модифицированной модели ЛЭП (для ЛЭП – начальные значения напряжений на конденсаторах и токов индуктивностей) служат результаты расчёта предшествующего установившегося режима методом уравнений узловых напряжений.

В силу симметрии предшествующего установившегося режима можно записать следующие соотношения для начальных значений междуфазных напряжений:

$$\begin{aligned} u_{i(AB)}^{(0)} &= \sqrt{2} \cdot U_i \cdot e^{j \cdot \delta_i}; & u_{j(AB)}^{(0)} &= \sqrt{2} \cdot U_j \cdot e^{j \cdot \delta_j}; \\ u_{i(BC)}^{(0)} &= \sqrt{2} \cdot U_i \cdot e^{j \cdot (\delta_i - \frac{2\pi}{3})}; & u_{j(BC)}^{(0)} &= \sqrt{2} \cdot U_j \cdot e^{j \cdot (\delta_j - \frac{2\pi}{3})}; \\ u_{i(CA)}^{(0)} &= \sqrt{2} \cdot U_i \cdot e^{j \cdot (\delta_i + \frac{2\pi}{3})}; & u_{j(CA)}^{(0)} &= \sqrt{2} \cdot U_j \cdot e^{j \cdot (\delta_j + \frac{2\pi}{3})}, \end{aligned}$$

и начальных значений фазных токов:

$$\begin{aligned} i_{L(A)}^{(0)} &= \sqrt{2} \cdot I_L \cdot e^{j \cdot \delta_L}; & i_{L(B)}^{(0)} &= \sqrt{2} \cdot I_L \cdot e^{j \cdot (\delta_L - \frac{2\pi}{3})}; \\ i_{L(C)}^{(0)} &= \sqrt{2} \cdot I_L \cdot e^{j \cdot (\delta_L + \frac{2\pi}{3})}, \end{aligned}$$

где U_i, U_j – междуфазные (линейные) напряжения i -го и j -го узлов в предшествующем установившемся режиме (действующее значение); δ_i, δ_j – начальные фазы соответствующих узловых напряжений относительно напряжения балансирующего узла; I_L – ток фазного провода ЛЭП в предшествующем установившемся режиме (действующее значение); δ_L – начальная фаза тока фазного провода в предшествующем установившемся режиме.

Таким образом, для анализа воздействия геомагнитных возмущений на системы электроснабжения разработана модифицированная модель воздушной линии электропередачи, которая получена путем дополнения стандартной модели в виде П-образной схемы замещения моделью заземляющего устройства с плавающим потенциалом. Математические модели линии электропередачи разработаны в форме системы дифференциальных уравнений и алгебраических уравнений баланса токов в узлах схемы замещения.

Литература

1. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2014. 288 с.
2. **Пилипенко В.А.** Воздействие космической погоды на наземные технологические системы // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7. № 3. С. 72–110.
3. **Герасименко А.А., Федин В.Т.** Передача и распределение электрической энергии. М.: КНОРУС, 2012. 648 с.
4. **Тренькин А.А., Воеводин С.В., Коблова О.Н., Селемир В.Д., Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Черненко А.Н.** Исследование воздействия сильной магнитной бури на объединенную энергетическую систему центра России // Доклады Российской академии наук. Физика, Технические науки. 2023. Т. 508. С. 64–67.

С.А. Гагарин, gagarinel@mail.ru, ТГУ, Тольятти

ПРИЧИНЫ НЕПРАВИЛЬНОЙ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ НА РОСТОВСКОЙ АЭС. ОСТАТОЧНАЯ НАМАГНИЧЕННОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Для обеспечения надежной работы энергосистемы все линии электропередачи, энергетическое оборудование электрических станций и подстанций оснащаются устройствами релейной защиты и автоматики.

Устройства релейной защиты (РЗ) должны правильно функционировать при всех видах коротких замыканий ЛЭП и оборудования, обеспечивать быстродайствующую и селек-

тивную защиту. Некорректная работа устройств РЗ может привести к ухудшению и развитию аварийной ситуации вместо ее локализации.

На объектах электроэнергетики Российской Федерации известны случаи неправильной работы устройств РЗ с тяжелыми для энергосистемы последствиями. Одним из них является случай неправильного срабатывания РЗ при трехфазном коротком замыкании (КЗ) на открытом распределительном устройстве (ОРУ) 500 кВ Ростовской АЭС (РоАЭС).

Авария на Ростовской АЭС. 4 ноября 2014 г. в соответствии с разрешенной заявкой на вывод ВЛ 500 кВ «Южная» на ОРУ 500 кВ РоАЭС были начаты операции по вводу в работу выключателей В-50, В-51.

В результате ошибочных действий оперативного персонала при включении выключателя В-50 было подано напряжение на включенный заземляющий разъединитель ЗРС в ячейке 17 (рис. 1). Вследствие возникновения трехфазного КЗ излишним срабатыванием первого комплекта дифференциальной защиты шин отключились ВЛ 500 кВ «Тихорецк» и четвертая система шин выключателями В-50, В-62, В-32 и В-2-4 [1].

Излишним действием 1-ой зоны дистанционных защит последовательно отключились:

– ВЛ 500 кВ «Шахты» выключателем В-41 от дополнительного комплекта ПДЭ-2001;

– ВЛ 500 кВ «Южная» выключателем В-60 от комплекта основных защит ШЭ2710 582;

– ВЛ 500 кВ «Будденовск» выключателем В-61 от 2-го комплекта резервных защит ШЭ2710 591.

По причине снижения напряжения на собственных нуждах блока №1 действием защит системы возбуждения генератора Г-1 отключились выключатели В-10 и В-11.

Неправильная работа защит присоединений открытого распределительного устройства 500 кВ РоАЭС привело к отключению электростанции от энергосистемы и отделением последней на изолированную работу [2] (схема после аварии представлена на рис. 2).

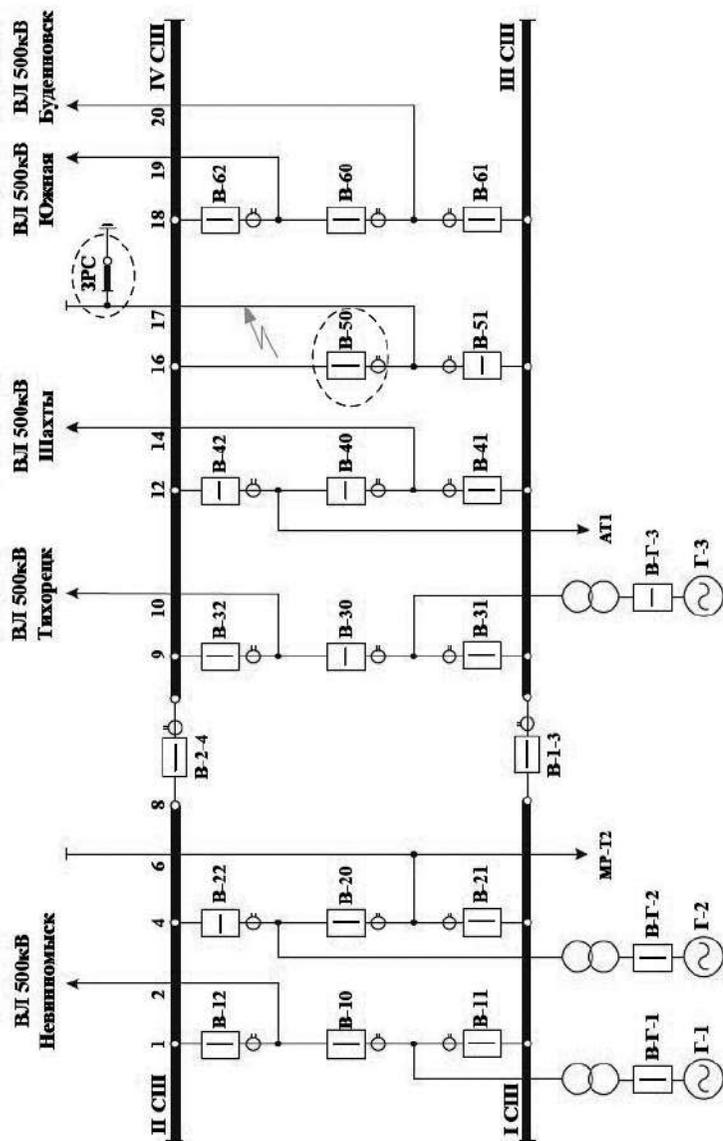


Рис. 1. Открытое распределительное устройство 500 кВ РодЭС в момент аварии

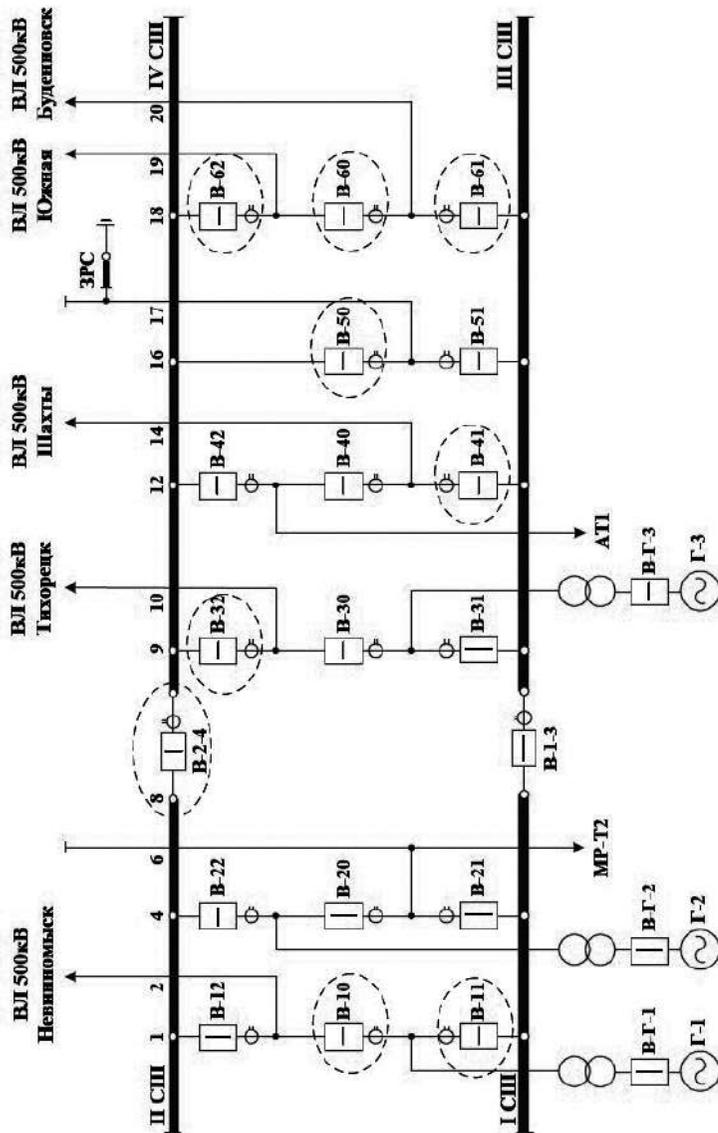


Рис. 2. Открытое распределительное устройство 500 кВ Р0АЭС после аварийных отключений

Причины неправильной работы устройств релейной защиты. Для выяснения причин неправильного функционирования релейной защиты на Ростовской АЭС в соответствии с актом Ростехнадзора была сформирована комиссия из представителей Акционерного общества «Системный оператор Единой энергетической системы», Акционерного общества «Росэнергоатом», крупных энергетических и производственных компаний, а также научно-исследовательских институтов (рис. 3) [1].

По результатам работы комиссии было установлено, что причиной неправильной работы первого комплекта дифференциальной защиты шин 500 кВ стало отсутствие блокировки по 2-й гармонике в панели защит [3].



Рис. 3. Состав комиссии по расследованию причин аварии на РоАЭС

Остаточная намагниченность ТТ и протекание тока КЗ с аperiodической составляющей привели к насыщению трансформатора тока выключателя В-50 и появлению второй гармоники в цепях защиты шин, что вызвало ее ложное срабатывание (рис. 4).



Рис. 4. Причины отключения IV системы шин 500 кВ и ВЛ 500 кВ «Тихорецк»

Неправильная работа защит ВЛ 500 кВ «Шахты», ВЛ 500 кВ «Тихорецк», ВЛ 500 кВ «Буденновск» также были обусловлены насыщением трансформаторов тока апериодической составляющей токов КЗ и наличием остаточной намагниченности магнитопроводов ТТ (рис. 5).

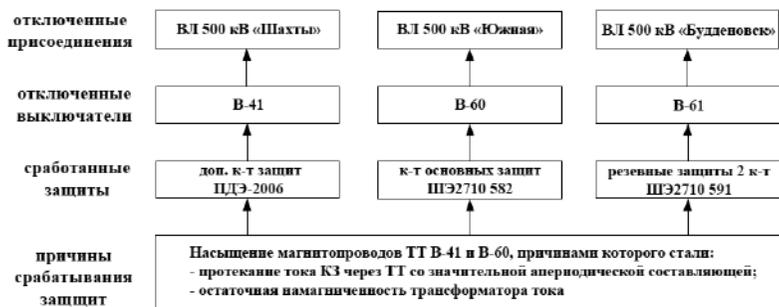


Рис. 5. Причины отключения ВЛ 500 кВ «Шахты», ВЛ 500 кВ «Южная», ВЛ 500 кВ «Буденновск»

Специалистами ОАО «ВНИИР» была создана цифровая модель аварийной ситуации на РоАЭС с помощью программно-аппаратного комплекса реального времени RTDS [4]. Выполнено моделирование электромагнитных процессов, которое показало, что при остаточной намагниченности 61% насыщение ТТ выключателя В-60 (общего для ВЛ-500 кВ «Южная» и ВЛ 500 кВ «Буденновск») наступает уже на 3-м периоде, 86% – на 2-м, 40 % – на 4–5-м периодах (рис. 6).

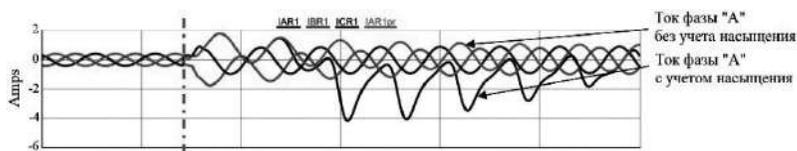


Рис. 6. Переходный процесс при моделировании трехфазного КЗ вблизи шин ОРУ 500 кВ с насыщением ТТ выключателя В-60

Остаточная намагниченность трансформаторов тока. Остаточная намагниченность является свойством электромагнитных ТТ с классом точности Р. Её наличие и величина случайны и

зависят от различных причин (рис. 7). Остаточная намагниченность трансформаторов тока может существовать длительно, ее величина достигает максимального значения 86%. Остаточная намагниченность трансформатора тока снимается только принудительным размагничиванием магнитопровода.

Уровень остаточной намагниченности трансформаторов тока влияет на точность трансформации тока из первичной обмотки во вторичную, от чего напрямую зависит работа устройств релейной защиты.



Рис. 7. Причины возникновения остаточной намагниченности ТТ

Устройства для измерения остаточной намагниченности ТТ. Для определения параметров трансформаторов тока, снятия электрических характеристик, а также измерения остаточной намагниченности ТТ в настоящее время успешно применяются микропроцессорные комплексы диагностики измерительных трансформаторов тока.

Наиболее известным из них является анализатор параметров ТТ СТ-Analyzer, разработанный компанией Omicron (Австрия). Данный анализатор имеет широкий спектр функций:

- снятие характеристики намагничивания ТТ и определение точек перегиба;
- определение коэффициента трансформации;
- определение полной и угловой погрешностей;
- определение коэффициента безопасности;
- определение неизвестных паспортных данных ТТ;
- измерение остаточной намагниченности.

Важно отметить, что устройство CT-Analyzer имеет также функцию размагничивания трансформатора тока после проведения измерений.

В связи с санкциями европейских стран в отношении Российской Федерации на отечественном рынке сегодня представлены анализаторы других производителей – это универсальный измерительный прибор PCT200 компании Popena (Китай) и отечественный прибор РЕТОМ-ТТ (разработка НПП «Динамика», г. Чебоксары). Данные устройства не уступают по своему функционалу австрийскому аналогу CT-Analyzer и могут использоваться для снятия электрических характеристик ТТ, измерения остаточной намагниченности и размагничивания трансформатора тока после проведенных измерений.

Выводы. Основной причиной неправильного функционирования устройств релейной защиты на ОРУ-500 кВ РoАЭС явилось наличие остаточной намагниченности ТТ, которая способствовала насыщению трансформаторов при протекании токов внешнего КЗ.

Для исключения случаев насыщения ТТ по причине остаточной намагниченности следует контролировать уровень намагниченности сердечников трансформаторов тока и при необходимости выполнять их принудительное размагничивание.

Современные микропроцессорные устройства диагностики ТТ позволяют измерять остаточную намагниченность и выполнять размагничивание сердечников трансформаторов тока, что минимизирует вероятность насыщения измерительных трансформаторов и, как следствие, повышает надежность работы устройств релейной защиты.

Литература

1. **Воробьев В.С.** О неправильной работе устройств РЗА в переходных режимах при насыщении трансформаторов тока [Электронный ресурс]. Доклад на заседании НП «НТС ЕЭС» и НТС ПАО «Россети» 11.09.2015, г. Москва. URL: http://www.cigre.ru/research_commitets/ik_rus/b5_rus/B.C.%20Воробьев.pdf.

2. **О мерах** по недопущению неправильной работы устройств релейной защиты [Электронный ресурс]. Письмо Министерства энергетики РФ от 02.04.2019 г. № ЧА-3440/10. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565996025>.

3. **Вопросы** координации работы релейной защиты и измерительных трансформаторов тока [Электронный ресурс]. Протокол совместного заседания НП «НТС ЕЭС» и НТС ПАО «Россети» от 11.09.2015, г. Москва. URL: https://www.nts-ees.ru/sites/default/files/protokol_sekcii_rzia_11.09.15.pdf.

4. **Моделирование** электромагнитных переходных процессов при аварийных событиях на Ростовской АЭС (04.11.14) с использованием программно-аппаратного комплекса RTDS [Электронный ресурс]. Центр моделирования электроэнергетических систем ОАО «ВНИИР». URL: http://www.cigre.ru/research_commitets/ik_rus/b5_rus/novosti/A.A.%20Наволочный.pdf.

А.В. Стариков, star58@mail.ru,

В.Д. Костюков, kostyukovvlad@yandex.ru,

СамГТУ, Самара

АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА ПРИ СНИЖЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ И РАЦИОНАЛЬНОМ СМЕЩЕНИИ ЦЕНТРА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Промышленный сектор является ключевым потребителем электрической энергии. В зависимости от сферы деятельности, специфики работы и трудоёмкости технологического процесса применяется разнообразное электрооборудование: электродвигатели, трансформаторы, силовые преобразователи, устройства релейной защиты и многое другое [1, 2]. Перспективным направлением на сегодняшний день является замена в мощных и высокоскоростных энергетических машинах традиционных подшипников скольжения на электромагнитные подшипники. Активный магнитный подвес роторов электромашин предоставляет

широкие возможности и открывает новые перспективы во многих областях технической деятельности [3]. Применение электромагнитных подшипников позволяет исключить масляную систему и повысить коэффициент полезного действия агрегатов за счет снижения затрат на трение [3].

В настоящее время разработкой и изготовлением электромагнитных подшипников занимаются следующие зарубежные компании [4, 5]: MBI (Magnetic Bearings, Inc.), США; JMB (Japan Magnetic Bearings Co., Ltd), Япония; Mecos Traxler AG (Mechanics Control Systems), Швейцария; AVCON (Advanced Controls Technology, Inc.), США; Center for Magnetic Bearings, США; Revolve Technologies Inc., Канада; High Speed Technology, Финляндия; WMB (Waukesha Magnetic Bearings), США; SKF S2M, Швеция.

Среди отечественных производителей следует отметить [4, 5]: Псковскую инженерную компанию (ПИК), ОАО «Корпорацию «ВНИИЭМ» (ФГУП «НПП ВНИИЭМ»). Разработчики электромашин, применяющие активные магнитные подшипники: АО «НИИ-турбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» (г. Казань), ООО Завод «Калининградгазавтоматика» (г. Калининград).

Ведущими компаниями-поставщиками являются [5]: Calnetix Technologies, LLC (Калифорния); MAN Diesel & Turbo (Германия); Schaeffler Group (Германия); Celeroton AG (Швейцария); Facility EAST GmbH (Германия); Evico (Германия); Foshan Genesis (Китай); LCM (Италия); Magnetal (Швеция); Waukesha Bearings (Великобритания).

Комплексное изучение электромагнитных подшипников позволит повысить их техническую эффективность, модернизировать конструктивные особенности, минимизировать общее потребление электрической энергии. Рациональный подход ко всем стадиям дальнейшего внедрения отечественных электромагнитных подшипников в промышленный сектор сделает возможным оптимизацию процесса производства, проектирования и пусконаладочных работ.

К достоинствам электромагнитных подшипников можно отнести [3]:

- высокую износостойкость (длительный период эксплуатации, уменьшение эксплуатационных издержек);
- отсутствие смазочных жидкостей/веществ (экологичность, пожаробезопасность);
- отсутствие системы подготовки/подачи смазки: насосов, фильтров, уплотнителей, маслосборников);
- стабильное функционирование при высоких скоростях вращения (уменьшение габаритов электромашин, применение в высокоскоростном электрооборудовании);
- малое потребление электрической энергии (энергоэффективность, снижение расходов на электроэнергию, низкие тепловые потери);
- неприхотливость к окружающему воздействию (функционирование в диапазоне температур от – 150 до + 450 °С, в условиях вакуума, при радиационном излучении, в химически агрессивных средах);
- невосприимчивость к загрязнению (большой зазор).

Электронная система управления электромагнитным подшипником позволяет [3]: контролировать положение оси ротора; регулировать жесткость демпфирование подвеса; применять датчики для получения данных о процессе функционирования.

Недостатки электромагнитных подшипников [3]: необходимость внешнего источника электроснабжения; сложность реализации системы управления; высокая стоимость; большие габариты. Для технического обслуживания требуется высококвалифицированный (подготовленный) персонал.

Традиционная схема электромагнитного подвеса ротора вращающихся машин состоит из двух радиальных и одного двухстороннего осевого подшипников [6], которым необходим внешний источник электроснабжения. Потребляемая электроэнергия идет на поддержание ротора в требуемом положении и нагрев обмоток электромагнитов.

Для решения этой проблемы применяется смещение центра магнитной системы для компенсации веса ротора [6]. Такой подход позволяет снизить напряжения питания и повысить энергетическую эффективность электромагнитных опор. Необходимо также учесть, что электромагнитный подшипник является принципиально неустойчивым объектом управления, стабильная работа которого обеспечивается специально разработанной электронной системой управления [6, 7].

В докладе ставится задача анализа работоспособности электромагнитных подшипников при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения ротора и снижении напряжения питания от внешнего источника. Объект исследования – электромагниты, разработанные для электромагнитного подвеса ротора опытного образца турбонагнетателя 6ТК-Э дизеля локомотива [6]. В рассматриваемом агрегате масса ротора $m = 36$, а опорное напряжение широтно-импульсного преобразователя $U = 60$ В. Принимается, что ротор турбонагнетателя расположен горизонтально, то есть компенсация веса ротора осуществляется радиальными электромагнитными подшипниками.

Расчет показывает, что при смещении центра магнитной системы радиального электромагнитного подшипника по каждой оси на величину $\epsilon_y = 92 \cdot 10^{-6}$ м (рис. 1) при равных токах $I_1 = I_3$ и $I_2 = I_4$ в противоположных магнитах будет происходить полная компенсация веса ротора G . Это позволяет снизить опорное напряжение питания до $U = 50$ В [6].

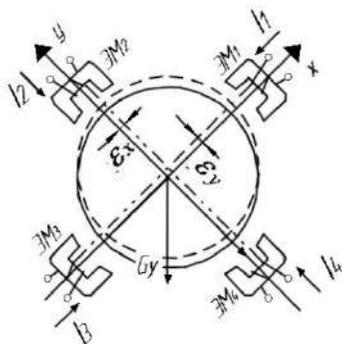


Рис. 1. Расчетная схема радиального электромагнитного подшипника

Проведем моделирование трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником при рациональном смещении центра магнитной системы относительно оси вращения, компенсирующем вес ротора, и оценим ее работоспособность. Расчетная модель системы управления электромагнитным подшипником, набранная в программе Matlab Simulink, приведена на рис. 2 – 4. Она учитывает, что цифровой регулятор содержит интегральный регулятор с постоянной времени $T_u = 0,008$ с, пропорциональный регулятор с коэффициентом передачи $k_n = 2$ и пропорционально-дифференциальный регулятор с коэффициентом передачи $k_{pd} = 2$ и постоянной времени $T_{pd} = 0,079$ с.

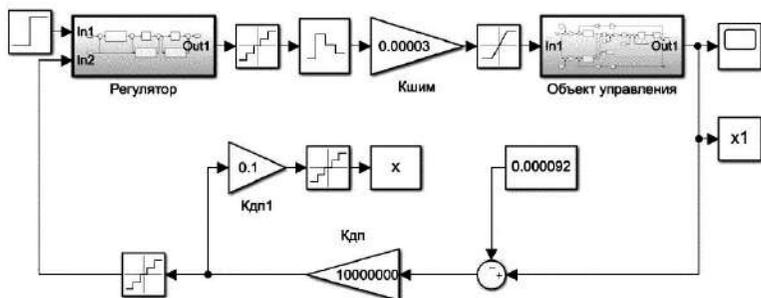


Рис. 2. Расчетная модель системы управления электромагнитным подшипником

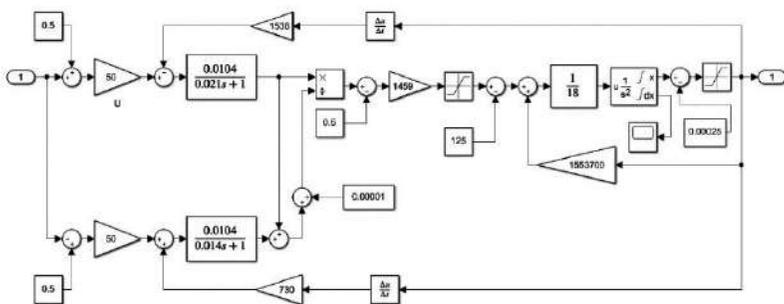


Рис. 3. Расчетная модель электромагнитного подшипника как объекта управления

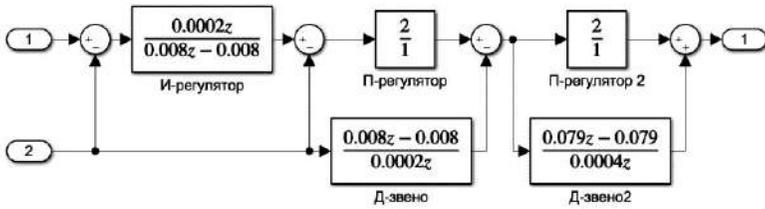


Рис. 4. Расчетная модель цифрового регулятора

Параметры электромагнитного подшипника объекта управления рассчитаны для смещенного на 92 мкм центра магнитной системы относительно оси вращения. Расчетная модель позволяет рассчитать процесс всплытия ротора со страховочных подшипников, установленных с зазором величиной 250 мкм (рис. 5). При этом для обеспечения смещения центра магнитной относительно оси вращения применен способ смещения сигнала датчика положения ротора на требуемую величину.

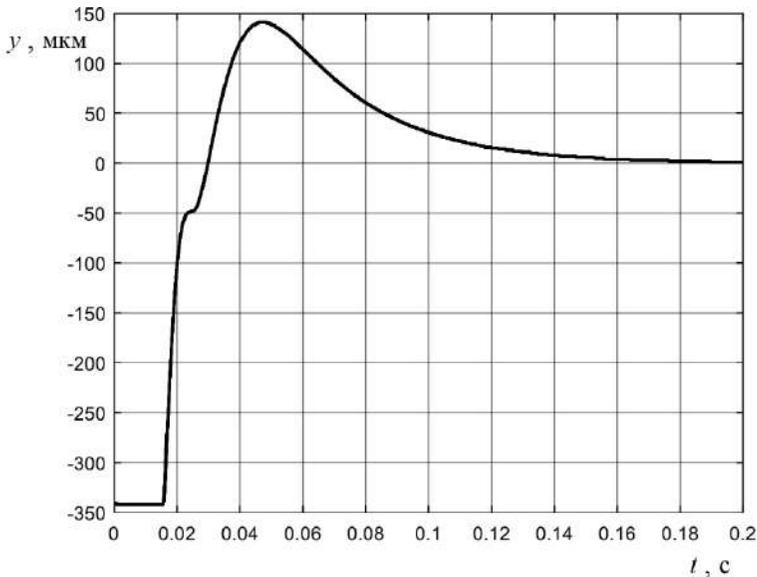


Рис. 5. График всплытия ротора со страховочных подшипников при опорном напряжении 50 В

Полученный график показывает, что при смещении центра магнитной системы по каждой координате на $\epsilon_y = 0,000092$ м относительно оси вращения ротора и напряжении питания электромагнитов до 50 В ротор уверенно всплывает со страховочных подшипников. При этом система управления продолжает устойчиво работать и при пониженном напряжении 50 В. Это приведет к повышению энергетической эффективности электромагнитного подшипника за счет снижения потребляемой мощности пропорционально квадрату отношения напряжений, то есть на 30% [7]. Кроме того, снижение напряжения питания обеспечивает уменьшение температуры нагрева обмоток электромагнитов, что упрощает требования к их охлаждению.

Литература

1. **Костюков В.Д.** Краткосрочное планирование загрузки энергоблоков ТЭС с учётом генерации солнечных электростанций в системе // Фёдоровские чтения – 2022. Тр. 52 Всероссийской научно-практ. конф. М.: Издательский дом МЭИ, 2022. С. 407–414.
2. **Быстрицкий Г.Ф.** Основы энергетики: учебник. М.: КНОРУС, 2012. 352 с.
3. **Журавлёв Ю.Н.** Активные магнитные подшипники: теория, расчёт, применение. СПб.: Политехника, 2003. 206 с.
4. **Обзор глобального подшипникового рынка** – основные производители и тенденции. Мировой рынок подшипников [Электронный ресурс]. URL: <https://aprom.by/cgi-bin/news.pl?words=20191113> (Дата обращения: 05.09.2023).
5. **Активные электромагнитные подшипники:** корпорация ВНИИЭМ [Электронный ресурс]. URL: http://www.vniiem.ru/ru/uploads/files/neftegaz/mpodves_buklet.pdf (Дата обращения: 05.09.2023).
6. **Стариков А.В., Костюков В.Д.** Анализ работы электромагнитных подшипников при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения и вариации напряжения питания //

Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». Т. 31. 2023. № 1. С. 103–123.

7. Стариков А.В., Рокало Д.Ю., Костюков В.Д. Анализ устойчивости системы управления электромагнитным подшипником с учётом вариации его параметров // Вопросы электротехнологии, № 2 (39), 2023. С. 66–73.

*В.В. Вахнина, VVVahnina@yandex.ru,
Е.В. Марков, markovevg@yandex.ru, ТГУ, Тольятти*

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ГРАФИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ТРЕУГОЛЬНИКА ДЮВАЛЯ

Мониторинг и диагностика электрооборудования, в частности силовых трансформаторов, уже много лет привлекает к себе значительное внимание. Для обслуживающих организаций очень важно как можно раньше обнаружить развивающиеся дефекты. Хроматографический анализ растворенных газов (ХАРГ) является одним из наиболее полезных методов обнаружения развивающихся дефектов в маслonaполненных силовых трансформаторах. Одним из наиболее часто используемых графических методов ХАРГ является метод треугольника Дюваля [1]. Данный метод позволяет достаточно легко и точно отслеживать развивающиеся дефекты в динамике, благодаря графическому представлению. В докладе подробно описан метод треугольника Дюваля и разработана графическая программа на базе программного комплекса MATLAB.

Метод треугольника Дюваля для высоковольтного оборудования с масляной изоляцией, в основном трансформаторов, был разработан Мишелем Дювалем в 1974 г. [1]. Он основан на использовании трех углеводородных газов: CH_4 (метан), C_2H_4 (этилен) и

C_2H_2 (ацетилен), которые выделяются при повышении уровня энергии газообразования в работающих силовых трансформаторах. Указанный метод доказал свою точность и надежность в течение многих лет и в настоящее время набирает популярность. Одним из достоинств метода является то, что он всегда позволяет выявить развивающийся дефект, с низким процентом ошибочных результатов. Недостаток – он не способен определять нормальное состояние старения трансформатора, следовательно, метод треугольника Дюваля необходимо использовать в совокупности с другими методологиями ХАРГ.

Особенностью метода Дюваля является то, что диагностика неисправностей осуществляется на основе визуализации расположения растворенных газов на треугольной карте (рис. 1). Как правило, обнаруживаются четыре типа дефектов, а именно: частичный разряд, разряды высокой и низкой мощности (электрический дефект), сочетание электрических и термических дефектов и точки перегрева в различных температурных диапазонах (термический дефект) [2]. Указанные типы будут определяться в 7 отдельных зонах, показанных в табл. 1. Поскольку ни одна область не соответствует нормальному состоянию старения трансформатора, интерпретация результатов приведет к обнаружению любого из упомянутых дефектов.

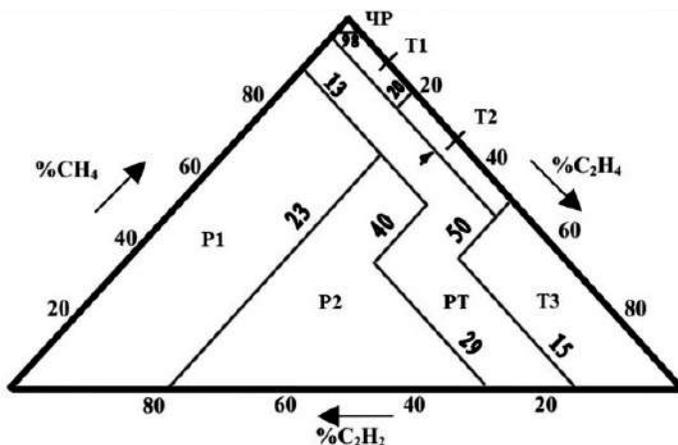


Рис. 1. Треугольник Дюваля

**Виды предполагаемых дефектов
по методу треугольника Дюваля**

Обозначение	Вид предполагаемого дефекта	Описание дефекта
ЧР	Частичные разряды	Разряды типа холодной плазмы (короны) в газовых пузырьках или пустотах с возможным образованием парафина в бумажной изоляции
P1	Разряды низкой мощности	Частичные разряды искрового типа, вызывающие пробой, обугленные пробои в бумажной изоляции. Низкоэнергетическая дуга, вызывающая обугленные перфорации или следы на поверхности бумажной изоляции, с образованием частиц углерода в масле
P2	Разряды высокой мощности	Разряды в бумажной изоляции или масле, сопровождающиеся силовым замыканием, приводящие к значительному повреждению бумажной изоляции, образованию больших частиц углерода в масле, расплавлению металла, срабатыванию защиты и газового реле
T1	Термический дефект, $T < 300 \text{ }^\circ\text{C}$	Бумажная изоляция становится коричневатой ($> 200 \text{ }^\circ\text{C}$) или обугливается ($> 300 \text{ }^\circ\text{C}$)
T2	Термический дефект $300, < T < 700 \text{ }^\circ\text{C}$	Карбонизация бумажной изоляции, образование частиц углерода в масле
T3	Термический дефект, $T > 700 \text{ }^\circ\text{C}$	Обширное образование частиц углерода в масле, окрашивание металла ($800 \text{ }^\circ\text{C}$) или плавление металла ($> 1000 \text{ }^\circ\text{C}$)
PT	Совокупность термических и электрических дефектов	Переходные состояния между электрическими и термическими дефектами

В представленном методе три стороны треугольника выражены в треугольных координатах (P1, P2, P3), представляющих относительные пропорции CH_4 , C_2H_4 и C_2H_2 от 0 до 100 для каждого газа. Представленные газы имеют единицу измерения ppm, следовательно, должны быть преобразованы в треугольные координаты перед нанесением на треугольник. Сначала должна быть рассчитана сумма трех величин, $\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_2$, а затем относительная доля трех газов:

$$P1 = \% \text{CH}_4 = \frac{100 \times \text{CH}_4}{\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_2},$$

$$P2 = \% \text{C}_2\text{H}_4 = \frac{100 \times \text{C}_2\text{H}_4}{\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_2},$$

$$P3 = \% \text{C}_2\text{H}_2 = \frac{100 \times \text{C}_2\text{H}_2}{\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_2}.$$

Например, если результаты ХАРГ следующие: $\text{CH}_4 = 70$ ppm, $\text{C}_2\text{H}_4 = 110$ ppm, $\text{C}_2\text{H}_2 = 35$ ppm, то $P1 = 35\%$, $P2 = 55\%$, $P3 = 10\%$, это соответствует только одной точке, обозначенной R в правой части треугольника (рис. 2), и определяется как дефект T3.

Разработка программы графического представления метода треугольника Дюваля. Для улучшения визуализации и сокращения времени на расчеты полученных результатов ХАРГ была разработана программа графического представления. Интерфейс программы разработан в среде MATLAB с применением графического редактора (GUI) [3]. Программа обеспечивает диагностику ХАРГ в режиме реального времени.

Пользовательский интерфейс интуитивно понятен (рис. 3). Используется только мышь, курсор действует как кнопка переключения. Первый щелчок активирует ползунок и позволяет точно настроить три параметра (CH_4 , C_2H_4 и C_2H_2). После окончания представления значений будет показана область дефекта и его обозначение. Можно заморозить данную позицию, щелкнув второй раз в области треугольника.

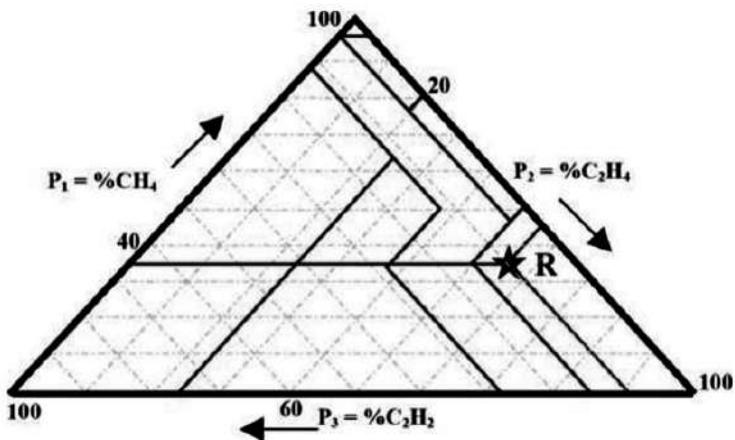


Рис. 2. Пример отображения точки в системе координат



Рис. 3. Интерфейс программы

Разработанная программа графического представления по методу треугольника Дюваля в среде MATLAB способна быстро и четко определять вид предполагаемого дефекта силового трансформатора, имеет возможность мониторинга силового трансформатора в динамике его жизненного цикла. Программа существенно сокращает время расчетов, тем самым упрощает обработку больших массивов информации.

Апробация разработанной программы. Для оценки эффективности и корректной работы разработанной программы графического представления были использованы десять образцов масла из баков трехфазных двухобмоточных силовых трансформаторов с расщепленной обмоткой мощностью 25 МВА напряжением 110 кВ (табл. 2).

Таблица 2

**Результаты ХАРГ силовых трансформаторов
ТРДН-25000/110**

№ образца масла	Концентрации газов, ppm (* 10 ⁻⁴ % об.)		
	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
1	21	12	27
2	102	162	542
3	3452	1389	7
4	7873	6991	34
5	10501	17702	749
6	164	234	691
7	85	109	315
8	11	12	38
9	129	154	236
10	1108	1779	1827

После переноса расчетных данных в интерфейс программы производится диагностика дефектов. В таблице 3 приведены фактические дефекты, выявленные при ремонте и результаты применения программы графического представления.

**Результаты исследования образцов масла
на основе графического метода треугольника Дюваля**

№ образца масла	Фактические дефекты	Результаты графического метода треугольника Дюваля
1	Следы дугообразования	Разряды малой мощности
2	Следы дугообразования	Разряды малой мощности
3	Термический дефект	Термический дефект $300 < T < 700$ °С
4	Термический дефект	Термический дефект $300 < T < 700$ °С
5	Термический дефект	Термический дефект $T > 700$ °С
6	Следы дугообразования	Разряды малой мощности
7	Следы дугообразования	Разряды малой мощности
8	Следы дугообразования	Разряды малой мощности
9	Следы дугообразования	Разряды большой мощности
10	Следы дугообразования	Разряды большой мощности

В результате выполненного сравнения фактических дефектов трансформатора с результатами работы программы видно, что программа интерпретировала развивающиеся дефекты с точностью 100%. Как показано в таблице 3, разработанная программа дала правильную интерпретацию в 10 образцах масла из 10. Однако для оценки окончательной точности необходимо использовать более обширный массив данных образцов трансформаторного масла.

Выводы.

1. В исследовании рассмотрен наиболее часто используемый графический метод для определения развивающихся дефектов – треугольник Дюваля. Выполнен анализ графического метода ХАРГ треугольника Дюваля, который основан на использовании трех углеводородных газов: CH_4 (метан), C_2H_4 (этилен) и C_2H_2 (ацетилен) с интерпретацией по 7 видам дефектов. Разработана программа графического представления по методу треугольника Дюваля в среде MATLAB с использованием (GUI), которая способна быстро и четко определять вид предполагаемого дефекта силового трансформатора.

2. Результат выполненного исследования предоставленных образцов масла десяти силовых трансформаторов мощностью 25 МВА напряжением 110 кВ показал, что точность диагностики фактических дефектов разработанной программой составила 100%, однако необходимо использовать более обширный массив данных.

3. Разработанная программа графического представления метода треугольника Дюваля дает возможность мониторинга силового трансформатора в динамике его жизненного цикла, существенно сокращает время расчетов, упрощает обработку больших массивов информации, что приводит к повышению эффективности ранней диагностики силовых трансформаторов.

Литература

1. **Duval M.** Fault gases formed in oil-filled breathing EHV power transformers – The interpretation of gas analysis data // IEEE PAS Conference. № C 74 476-8. 1974.

2. **Duval M., Dukarm J.** Improving the Reliability of Transformer Gas-in-Oil Diagnosis // IEEE Electrical Insulation Magazine. Vol. 21. № 4. 2005. P. 21–27.

3. **Дьяконов В.П.** MATLAB. Полный самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2012. 768 с.

*А.А. Дюдяков, dyudyakov1997@mail.ru,
С.А. Янченко, YanchenkoSA@tpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва*

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНЫМ ФИЛЬТРОМ, УСТОЙЧИВЫЙ К ИСКАЖЕНИЯМ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ

Гибридный фильтр (ГФ) является средством подавления высших гармоник (ВГ) тока, отличающимся высокой эффективностью и гибкостью благодаря сочетанию активного фильтра (АФ) и пассивного фильтра (ПФ) гармоник. Последовательное соединение ПФ с АФ без трансформатора обеспечивает подавление последовательного и параллельного резонанса, компенсацию реактивной мощности, а также подавление ВГ в широком спектре [1–3]. Кроме того, большое падение напряжения на ПФ позволяет использовать более низкое напряжение звена постоянного тока (ЗПТ) инвертора АФ и, следовательно, снижает мощность активной части.

Для реализации ГФ используются различные системы управления, такие как управление с обратной связью [2], комбинированное управление с прямой и обратной связью в d - q системе координат [3–5]. Все они имеют ограничения, включая проблемы с устойчивостью [6], кроме того, косвенное регулирование тока ГФ не обеспечивает быстрого отклика системы управления [7]. Также ГФ с управлением при помощи гистерезисного регулятора тока позволяет обеспечить динамическое регулирование реактивной мощности [1, 7–9]. Кроме того, эффективность традиционного ГФ, реализованного на теории мгновенной реактивной мощности (p - q регулирование) [10], значительно ухудшается при подаче несбалансированного искаженного сетевого напряжения [11,12]. Эти проблемы традиционного алгоритма управления ГФ рассматриваются в настоящем докладе. Вместо типичного подхода к вычислению

опорного тока, основанного на фильтрации ВГ в системе $\alpha\beta$ координат, предлагается алгоритм на основе расширенного фильтра Калмана, который обеспечивает быструю и точную идентификацию ВГ с устойчивостью к искажениям напряжения сети.

Моделирование гибридного фильтра. На рис. 1,а показана рассмотренная конфигурация ГФ [1–3], состоящая из ПФ, настроенного на 7-ю гармонику, и последовательного бестрансформаторного АФ на основе трехфазного инвертора напряжения (ИН), управляемого напряжением сети, током нагрузки или током сети. В качестве нелинейной нагрузки используется 6-импульсный мостовой выпрямитель мощностью 10 кВт с LC-фильтром, являющийся источником 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоники тока. Неидеальные условия питания, включая искажение напряжения и несимметрию, воспроизводятся управляемым источником сетевого напряжения.

Работу схемы можно проанализировать, рассмотрев ее представление для частот гармоник, отличных от основной (рис. 1,б). В этом случае ГФ может быть представлен как источник напряжения следующей величины:

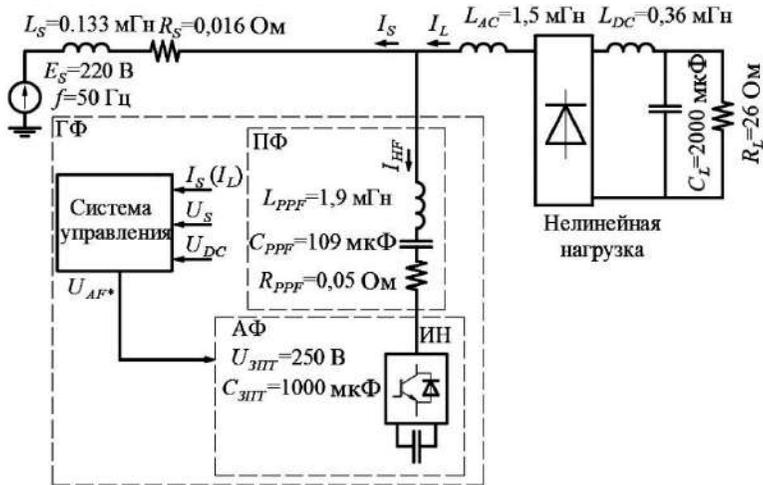
$$U_{AF} = I_{Sh} \cdot K, \quad (1)$$

где I_{Sh} – гармонические составляющие питающего тока, K – коэффициент усиления обратной связи.

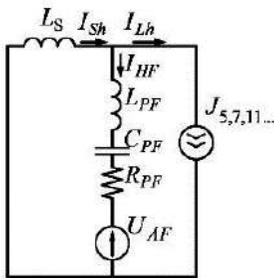
Эффективность подавления гармоник при помощи ГФ на определенной частоте при синусоидальном напряжении питания можно оценить, используя соотношение между гармоническим током сети I_{Sh} и гармоническим током нагрузки I_{Lh} , полученное из рис. 1,б:

$$I_{Sh}/I_{Lh} = Z_{PPF}/(K + Z_{PPF} + Z_S), \quad (2)$$

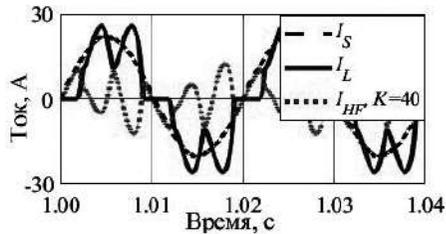
где Z_S – сопротивление сети, Z_{PPF} – сопротивление ПФ.



а



б



в

Рис. 1. Схема моделируемого ГФ (а) со схемой замещения ГФ (б) и кривыми тока сети I_S , тока нагрузки I_L и тока ГФ I_{HF} (в)

Из (2) следует, что эффективность ГФ (т.е. улучшение характеристик фильтрации ПФ, компенсация гармоник, создаваемых нелинейной нагрузкой, параллельное и последовательное резонансное демпфирование) в основном зависит от значения коэффициента усиления K , которое должно быть достаточно большим, как показано на рис. 2, для того, чтобы обеспечить достаточный уровень компенсации [1–3]. В следующих разделах для представленной модели подробно изучено влияние реализации системы управления на эффективность ГФ в реальных условиях электросети.

Алгоритм управления на основе p - q регулирования. На рисунке 2 показана схема управления для ГФ с помощью традиционного p - q регулирования. Компенсирующее гармоническое напряжение, подаваемое на ГФ, может быть получено с помощью следующих вычислений в системе $\alpha\beta$ координат [13]:

$$\begin{bmatrix} U_{HF\alpha} \\ U_{HF\beta} \end{bmatrix} = \frac{K}{(u_\alpha^2 + u_\beta^2)} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha & -u_\beta \\ u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_\sim \\ q_\sim + q_{PI} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где p , q – переменные составляющие активной и реактивной мощности в системе координат $\alpha\beta$, обусловленные нелинейной нагрузкой; q_{PI} – выходной сигнал пропорционально-интегрального (PI) регулятора для управления постоянным напряжением ИН; u_α , u_β , $U_{HF\alpha}$, $U_{HF\beta}$ – питающее и опорное напряжения алгоритма управления в системе отсчета $\alpha\beta$.

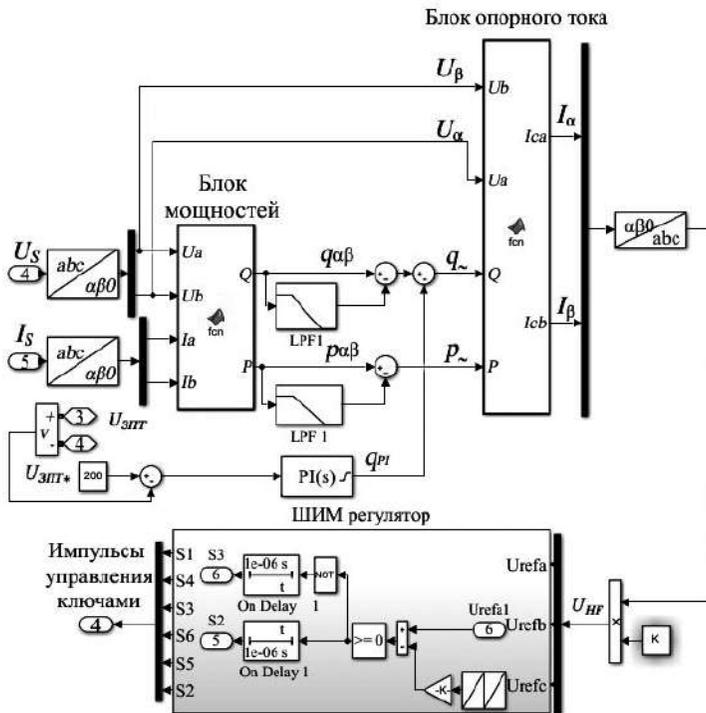


Рис. 2. Схема системы управления на основе p - q регулирования

Для точного определения гармонического спектра, подлежащего компенсации, в (3) u_a и u_b не должны содержать ВГ, также напряжение сети должно быть симметричным. Однако это не тот случай, когда напряжение сети искажено, что впоследствии искажает опорное напряжение ГФ, значительно снижая его эффективность.

Алгоритм управления на основе фильтра Калмана. Рассмотренный выше недостаток р-q регулирования устраняется при управлении ГФ с помощью расширенного фильтра Калмана, обеспечивающего выявление ВГ.

В данном случае опорный ток для компенсации ВГ при помощи ГФ определяется гармоническим током нагрузки I_{Lh} и током для заряда емкости ЗПТ инвертора I_{chr} (рис. 3):

$$I_{HF} = I_{Lh} + I_{chr} = \{I_{L1}(t) - I_L(t)\} + \{e_{PI} \cdot \sin(\omega_{SI}(t) \cdot t + \varphi_{IS}(t) + \pi/2)\}, \quad (4)$$

где I_{L1} – величина основной гармоники тока нагрузки; I_L – измеряемый ток нагрузки; e_{PI} – выходной сигнал с PI регулятора; ω_{SI} и φ_{IS} – частота и фаза основной гармоники напряжения сети.

Из (4) следует, что эффективность ГФ, управляемого с помощью фильтра Калмана, в основном зависит от того, насколько точно определены величина основного тока нагрузки, а также частота и фазовый угол напряжения питания. Это достигается путем применения фильтров Калмана к измеряемым сигналам, которые обеспечивают быструю и точную оценку спектров гармоник независимо от уровней искажений [14].

Рассматриваемый сигнал представляется в виде ряда Фурье следующим образом:

$$y(t) = \sum_{k=1}^m r_k \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t + \varphi_k). \quad (5)$$

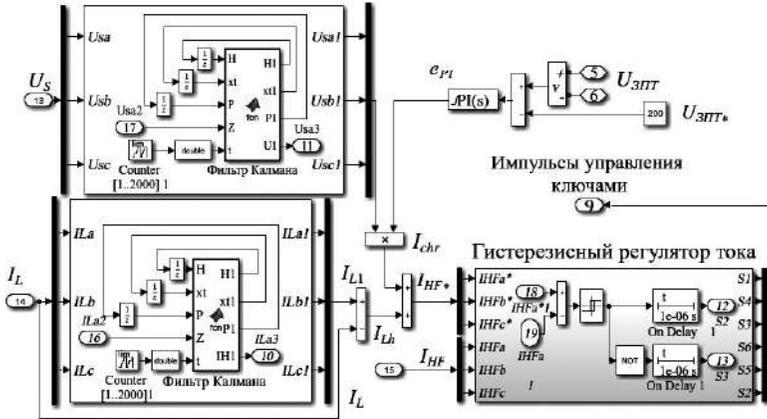


Рис. 3. Схема системы управления на основе фильтра Калмана

Здесь переменные $r1(t), \dots, r_m(t)$, $\omega(t)$, $\varphi_1(t), \dots, \varphi_m(t)$ для m наиболее значимых гармоник тока нагрузки могут быть использованы для формирования вектора состояния \mathbf{x} , который полностью определяет сигнал u на временном шаге t :

$$\mathbf{x}(t) = [r_1(t), \dots, r_m(t), \omega(t), \varphi_1(t), \dots, \varphi_m(t)]^T. \quad (6)$$

Представление вектора (6) во временной области:

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}(t)) = \sum_{k=1}^m r_k(t) \cdot \sin(k\omega(t)t + \varphi_k(t)). \quad (7)$$

В каждый момент времени t соответствующая оценка $\hat{\mathbf{x}}(t)$ может быть определена с использованием предыдущей оценки $\hat{\mathbf{x}}(t-1)$ и разницы между измеренным значением $z(t)$ и оценкой во временной области $\mathbf{h}(\mathbf{x}(t))$:

$$\hat{\mathbf{x}}(t) = \hat{\mathbf{x}}(t-1) + \mathbf{G}(t) \cdot [z(t) - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}(t-1))], \quad (8)$$

где $\mathbf{G}(t)$ – коэффициент усиления Калмана, определенный для момента времени t как

$$\mathbf{G}(t) = \mathbf{P}(t) \cdot \mathbf{H}^T(t) \cdot (\mathbf{H}(t) \cdot \mathbf{P}(t) \cdot \mathbf{H}^T(t) + \mathbf{R})^{-1}. \quad (9)$$

Здесь $\mathbf{H}(t)$ – якобиан размера $[2m + 1] \times 1$, представляющий частные производные от $h(t)$ по $\mathbf{x}(t)$:

$$\mathbf{H}(t) = \frac{d\mathbf{h}(t-1)}{d\mathbf{x}(t-1)} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\omega}(t-1) \cdot t + \hat{\phi}_1(t-1)) \\ \dots \\ \sin(\hat{\omega}(t-1) \cdot t + \hat{\phi}_m(t-1)) \\ \sum_{k=1}^m \hat{r}_k \cdot t \cdot \cos(k \cdot \hat{\omega}(t-1) \cdot t + \hat{\phi}_k(t-1)) \\ \hat{f}_1(t-1) \cdot \cos(\hat{\omega}(t-1) \cdot t + \hat{\phi}_m(t-1)) \\ \dots \\ \hat{f}_m(t-1) \cdot \cos(\hat{\omega}(t-1) \cdot t + \hat{\phi}_m(t-1)) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$\mathbf{P}(t)$ – поправка на ковариационную матрицу ошибок, вычисляется для следующего такта следующим образом:

$$\mathbf{P}(t+1) = \Phi \cdot [\mathbf{P}(t) - \mathbf{G}(t) \cdot \mathbf{H}(t) \cdot \mathbf{P}(t)] \cdot \Phi^T + \mathbf{Q}, \quad (11)$$

\mathbf{Q} – ковариационная матрица процесса размером $[2m+1] \times [2m+1]$, определяющая случайное изменение переменных в пределах $\mathbf{x}(t)$;

\mathbf{R} – ковариационная матрица шума измерений.

Вычисление (7) – (11) на каждом такте позволяет получить апостериорную оценку вектора состояния $\hat{\mathbf{x}}(t)$, содержащую величины гармоник, фазовые углы и основную частоту анализируемого сигнала. Основные этапы описанной процедуры Калмана показаны на блок-схеме (рис. 4).



Рис. 4. Блок-схема расширенного фильтра Калмана для управления ГФ

Анализ алгоритма эффективности ГФ в условиях искаженного напряжения сети. Эффективность фильтра в установившемся режиме предложенного алгоритма управления на основе фильтра Калмана при синусоидальном симметричном напряжении питания обеспечивает тот же уровень компенсации гармоник тока (рис. 5, синие столбцы), что и при управлении ГФ при помощи р-q регулирования.

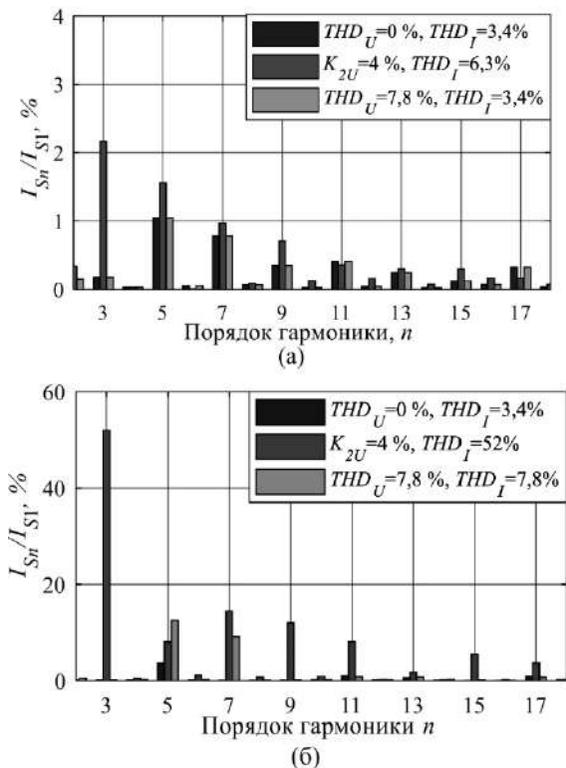


Рис. 5. Формы сигналов моделируемых токов для р-q регулирования и предложенного подхода с использованием фильтра Калмана при синусоидальном напряжении питания

Проанализированы компенсирующие характеристики НРФ с двумя рассмотренными алгоритмами управления при искаженном (6 % от 5-й и 5 % от 7-й гармоник напряжения)

и несбалансированном (K_{2U} составляет 4 %) напряжении питания. Соответствующие результаты представлены на рис. 5,а и 5,б.

Как и ожидалось, НРФ с p - q регулированием демонстрирует высокую чувствительность к качеству питающего напряжения (рис. 5,б), что приводит к значительному снижению эффективности компенсации при несинусоидальности (желтые столбцы, рис. 5,б) и особенно при несимметрии напряжения питания (красные столбцы, рис. 5,б) в сравнении с идеальным случаем сбалансированного синусоидального напряжения (рис. 5,б, синие полосы).

Напротив, снижение эффективности ГФ с предложенным алгоритмом управления на основе фильтра Калмана гораздо менее заметно: значения основных компенсированных гармоник при несинусоидальном (желтые полосы, рис. 5,а) и несимметричном (красные столбцы, рис. 5,а) напряжениях показывают сопоставимые уровни с теми, которые были измерены для идеального случая (синие столбцы, рис. 5,а).

Вывод. В работе проанализирована эффективность подавления ВГ при ГФ, состоящем из пассивной части и последовательно подключенного инвертора напряжения для двух подходов к реализации системы управления: традиционной p - q теории и предложенного алгоритма на основе фильтра Калмана. Модели ГФ с рассматриваемыми системами управления, разработанные в среде Matlab Simulink показали снижение эффективности подавления ВГ для p - q регулирования и устойчивость эффективности предложенного алгоритма управления на основе фильтра Калмана при искаженном напряжении сети. Ввиду устойчивости предложенного алгоритма управления на основе фильтра Калмана к искажениям сетевого напряжения он является более предпочтительным для применения в условиях реальных электрических сетей. В дальнейшем планируется изучение предложенного алгоритма с целью реализации экспериментального прототипа на базе микроконтроллера LAUNCHXL-F28379D.

Литература

1. **Lam C., Wong M., Han Y.** (2011) Investigation of LC-hybrid active power filters in resonances prevention and compensation capabilities // Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics & Electronics, Macao, China, 6–7 Oct. 2011, 21–24.
2. **Jou H., Wu K., Wu J., Li C.** (2008) Novel power converter topology for three-phase four-wire hybrid power filter // Power Electronics, IET. 1:164–173.
3. **Tangtheerajaronwong W., Hatada T., Wada K., Akagi H.** (2007) Design and Performance of a Transformerless Shunt Hybrid Filter Integrated Into a Three-Phase Diode Rectifier // IEEE Transactions on Power Electronics, 22(5):1882–1889.
4. **Srianthumrong S., Akagi H.** (2003) A medium-voltage transformerless AC/DC power conversion system consisting of a diode rectifier and a shunt hybrid filter // IEEE Transactions on Industry Applications, 39(3): 874–882.
5. **Akagi H., Srianthumrong S., Tamai Y.** (2003) Comparisons in circuit configuration and filtering performance between hybrid and pure shunt active filters // 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, Salt Lake City, UT, USA, 12–16 Oct. 2003, 1195–1202.
6. **Bula D., Pasko M.** (2014) Stability analysis of hybrid active power filter // Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences. 62:279–286.
7. **Lam C., Wong M.** (2013) Design and Control of Hybrid Active Power Filters. Springer.
8. **Lam C., Wong M.** (2009) System and control design of a hybrid active power filter in three-phase four-wire system // 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA), Hong Kong, China, 20–22 May 2009, 1–5.
9. **Lam C., Wong M.** (2012) Adaptive DC-Link Voltage-Controlled Hybrid Active Power Filters for Reactive Power Compensation // IEEE Transactions on Power Electronics 27(4): 1758–1772.

10. **Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A.** (1983) Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase currents // IEEE Transactions on Power Electronics 27(4): 1758–1772.
11. **Watanabe E., Aredes M.** (2004) The p-q theory for active filter control: some problems and solutions // Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica. 15(1):78–84.
12. **Huang S., Wu J.** (1999) A control algorithm for three-phase three-wired active power filters under nonideal mains voltages // IEEE Transactions on Power Electronics 14(4):753–760.
13. **Singh B., Chandra A., Al-Haddad K.** (2015) Power Quality Problems and Mitigation Techniques. Wiley.
14. **Uener M.** (1991) Frequency, Amplitude, and Phase Tracking of Nonsinusoidal Signal in Noise with Extended Kalman Filter. Thesis, Naval Postgraduate School.

*А.Р. Денисова, denisova_ar@mail.ru,
О.Д. Семенова, ollivka@bk.ru, КГЭУ, Казань*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА НА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В настоящее время в электрических сетях сложно поддерживать должный уровень качества электроэнергии. Это связано с повсеместным вводом полупроводниковых управляющих систем, являющихся нелинейными нагрузками и источниками высших гармоник тока и напряжения. Без них в наше время невозможна автоматизация производственных и хозяйственных процессов в различных сферах. К распространенной нелинейной нагрузке можно отнести источники бесперебойного питания, преобразователи частоты (ПЧ), светодиодное освещение, пускорегулирующую аппаратуру газоразрядных ламп, промышленные термических установок, сварочное оборудование, содержащее полупроводниковые выпрямители и др.

При наличии высокочастотных гармонических составляющих затрудняется компенсация реактивной мощности, сокращается срок службы изоляции электрических машин и аппаратов, возрастает аварийность в кабельных сетях [1–5]. Зачастую возникают сбои в работе систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи [6, 7]. Высшие гармоники напряжения и тока оказывают влияние на значения коэффициента мощности и вращающего момента электродвигателей. Большой проблемой в электрических сетях, содержащих источники высших гармоник, является компенсация реактивной мощности с помощью батарей конденсаторов (БК). Было выявлено, что подключение батарей конденсаторов совместно с вентильными преобразователями (рис. 1) вызывает возникновение в этих сетях резонансных явлений. В этом случае оказывается невозможной нормальная эксплуатация конденсаторных установок без применения специальных мероприятий, направленных на устранение перегрузки конденсаторов.

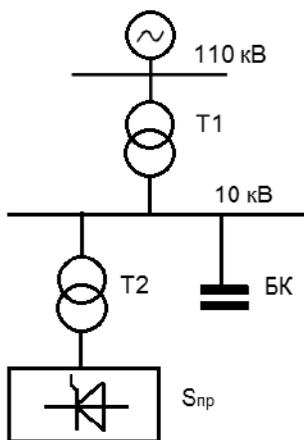


Рис. 1. Схемы электроснабжения мощного вентильного преобразователя с подключенной к шинам БК

Резонансный режим характеризуется нулевым значением суммарной реактивной проводимости резонансного контура:

$$\frac{\omega L}{R_1^2 + \omega^2 L^2} = \frac{\frac{1}{\omega C}}{R_2^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}},$$

где L – суммарная индуктивность разветвленной части сети, C – суммарная емкость разветвленной части сети, R_1 и R_2 – активные сопротивления параллельных частей сети.

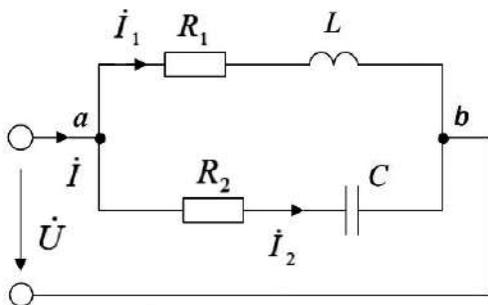


Рис. 2. Электрическая сеть с режимом резонанса токов

Для определения резонансной частоты в данной сети можно использовать выражение:

$$\omega = \sqrt{\frac{L - CR_\Sigma^2}{CL^2}},$$

где R_Σ – суммарное активное сопротивление сети.

В тяговых и промышленных электросетях с вентильными преобразователями перегрузки зафиксированы при резонансе на частотах гармоник даже весьма высоких порядков (40 – 50), в сетях с электродуговыми печами и сварочными установками – на частотах 3 – 7-й гармоник [4, 5]. Батареи конденсаторов в таком режиме не выполняют своих функций и вследствие необратимых физико-химических процессов, протекающих под воздействием полей высших гармоник, выходят из строя.

В сетях, питающих нелинейную нагрузку, установка конденсаторов должна выполняться с установкой устройств защиты от высших гармоник. Самым простым решением может быть установка защитных фильтрующих реакторов на параллельную работу вместе с конденсаторами. В этом случае в цепи необходимо создать резонанс напряжений на частоте, меньшей наименьшей гармоники ν , возникающей при работе нелинейной нагрузки. Для этого индуктивное сопротивление реактора на частоте 50 Гц определяется из условия:

$$x_p \geq \frac{x_c}{\nu^2} = \frac{U_{\text{БК ном}}^2}{\nu^2 Q_{\text{БК ном}}},$$

где $Q_{\text{БК ном}}$ – реальная суммарная мощность батареи конденсаторов, $U_{\text{БК ном}}$ – номинальное напряжение батареи конденсаторов.

В остальных случаях в качестве защиты от высших гармоник применяются резонансные фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) на основе конденсаторов, фильтрующих реакторов, индуктивностей и шунтирующих резисторов. Основным недостатком резонансных фильтров является их ограниченность только одной резонансной частотой.

В настоящее время на смену резонансных фильтров постепенно приходят активные фильтры гармоник (АФГ) [7]. АФГ состоит из силовой части, построенной на IGBT-транзисторах и системы управления. Принцип работы АФГ состоит в активной генерации компенсирующего тока в противофазе с током гармонических искажений нагрузки, что приводит к получению тока синусоидальной формы. АФГ являются универсальным средством, которые могут выполнять одновременно несколько функций: снижение уровня высших гармонических составляющих, коррекция коэффициента мощности, уменьшение потерь мощности, уменьшение фликера и др. АФГ представляют собой «гибкие» устройства, это значит, что параметры АФГ изменяются в зависимости от режима работы сети характеристик нагрузки. Принцип действия АФГ заключается в генерировании силовой электроникой необходимых

гармонических составляющих тока для снабжения нелинейных потребителей, чтобы форма синусоидальной кривой имела минимальные отклонения от нормы.

Для выявления проблем, связанных с высшими гармониками в низковольтных сетях, нами проводились измерения гармонических составляющих напряжения коммунально-бытовых электроприемников (ЭП) многоквартирного дома. В их число входят электроприборы с однофазными асинхронными и универсальными коллекторными двигателями, источники питания бытовой электроники и компьютерной техники со схемами пассивной и активной коррекции, освещение (все виды, кроме ламп накаливания), инверторы напряжения систем управления, микроволновые печи, преобразователи частоты, установленные на лифты, и другое [8, 9].

Исследование проводилось с помощью анализатора качества электроэнергии AR5, который способен одновременно фиксировать все необходимые параметры, включая гармонические составляющие до 49 порядка. В результате подключения анализатора качества на вводном щите многоквартирного дома был получен график трехсуточного измерения коэффициента нелинейных искажений напряжения сети (рис. 3).

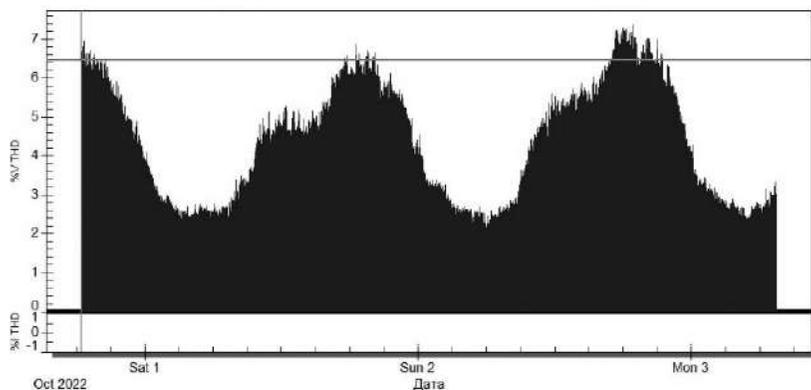


Рис. 3. График трехсуточного измерения коэффициента нелинейных искажений напряжения сети в квартире многоквартирного дома

Из рисунка видно, что коэффициент искажения синусоидальности напряжения зависит от уровня потребления электроэнергии бытовыми ЭП. Во время максимального потребления электроэнергии в вечерние часы коэффициент искажения синусоидальности напряжения возрастает до 7,4 %, а в ночные часы снижается до 2,1 %. Это позволяет сделать вывод, что бытовые ЭП служат причиной ухудшения качества электроэнергии, а сохранение несинусоидальной формы напряжения в ночные часы объясняется тем, что недогруженный трансформатор на трансформаторной подстанции приобретает свойства нелинейного элемента из-за ферромагнитных свойств [10].

Измерение напряжения сети многоквартирного дома производилось параллельно измерению коэффициента нелинейных искажений напряжения в течение трех суток (рис. 4).

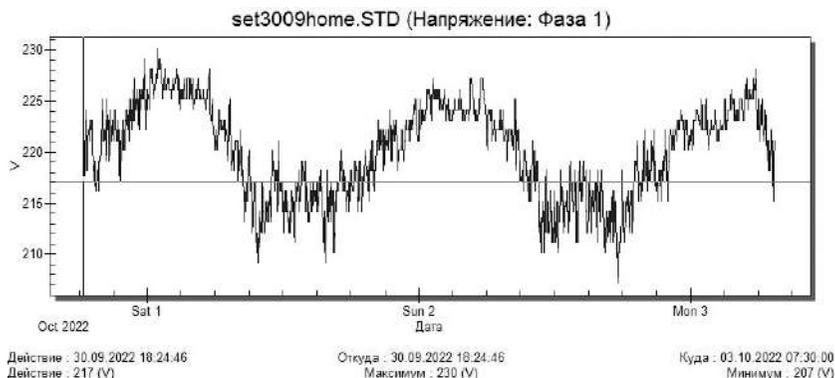


Рис. 4. График трехсуточного измерения напряжения сети многоквартирного дома

Во время максимального потребления электроэнергии в вечерние часы происходит падение напряжения до 207 В, а в периоды минимального электропотребления в ночные часы напряжение находится в пределах от 217 до 230 В.

Решить проблему можно реализовать двумя способами:

– установкой КБ на шинах трансформаторной подстанции с использованием фильтрующего реактора, который не позволит ему войти в резонанс под воздействием источников высокочастотных возмущений ЭП;

– установкой на шинах питающей трансформаторной подстанции АФГ.

АФГ могут параллельно осуществлять компенсацию реактивной мощности и стабилизацию напряжения сети. Их функционирование и применение регламентируется ГОСТ Р 59031-2020. Также в бытовых сетях возможно использование гибридных решений. В этом случае устанавливается нерезонансная система коррекции коэффициента мощности (КБ) и активный фильтр для снижения уровня высших гармоник.

Планируется разработка программного комплекса, который позволит определить оптимальный способ подавления высших гармоник коммунально-бытовой сети. Для этого необходимо производить оценку амплитудно-частотной характеристики сопротивления в различных конфигурациях сети при проектировании ФКУ, производить подбор оптимального способа подавления высших гармоник, а также оценку потерь мощности и расчет возможного ущерба от нарушения ПКЭ для определения экономической эффективности внедряемых в сеть устройств.

Заключение. Переход на повсеместную автоматизацию различных технологических и бытовых процессов, цифровизация электротехнических систем влечет за собой увеличение в них полупроводниковых нелинейных элементов. Поэтому в настоящее время недостаточно осуществлять только коррекцию коэффициента мощности. Изменения структуры нагрузки и сети делают фильтрацию гармоник всё более и более важной, особенно для систем, которые могут войти в резонанс под воздействием высших гармоник. Нами предложен способ защиты – использование фильтрующих реакторов на параллельную работу вместе с БК. В этом случае в цепи создается резонанс напряжений на частоте, меньшей наименьшей гармоники ν , возникающей при работе нелинейной нагрузки.

Литература

1. **Дюдяков А.А., Янченко С.А.** Снижение эффективности работы гибридного фильтра в реальных электрических сетях // Промышленная энергетика. 2023. № 4. С. 40–47. DOI 10.34831/EP.2023.68.35.006. – EDN PVCYMT.

2. **Артюхов И.И., Молот С.В.** Качество электроэнергии в системах электроснабжения котельных и центральных тепловых пунктов при оснащении насосов частотно-регулируемым электроприводом // Градостроительство и архитектура. 2017. Т. 7, № 1(26). С. 138–144. DOI 10.17673/Vestnik.2017.01.23. – EDN YRDUKF.

3. **Портнягин Н.Н., Ершов М.С., Барбасов П.Ю., Чернев М.Ю.** Моделирование влияния величины нелинейной нагрузки на качество электроэнергии промышленных электротехнических систем // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2017. Т. 60, № 1. С. 61–66. DOI 10.17213/0136-3360-2017-1-61-66. – EDN XWZQHL.

4. **Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К., Калюжный Д.Н.** Особенности выбора батарей конденсаторов в электрических сетях с источниками интергармоник // Электротехника и электромеханика. 2017. № 5. С. 67–70. DOI 10.20998/2074-272X.2017.5.11. – EDN ZMJFAN.

5. **Анучин А.С., Двоглазов П.В., Козаченко В.Ф., Трофимов С.А.** Оптимизация цифровых регуляторов тока для мощных вентильно-индукторных электроприводов // Промышленная энергетика. 2016. № 11. С. 36–42.

7. **Маклаков А.С., Гасияров В.Р., Белый А.В.** Энергосберегающий электропривод на базе двухзвенного преобразователя частоты с активным выпрямителем и автономным инвертором напряжения // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т. 1, № 1. С. 23–30. – EDN SKFUGP.

8. Янченко С.А., Рыжкова Е.Н., Цырук С.А. Программный инструмент анализа случайных уровней показателей качества электроэнергии бытовых электросетей // Промышленная энергетика. 2023. № 5. С. 46–54. DOI 10.34831/EP.2023.53.16.006. – EDN SPTRME.

9. Дюдяков А.А., Янченко С.А., Михеев Д.В. Анализ эффективности работы гибридного фильтра // Промышленная энергетика. 2022. № 7. С. 26–38. DOI 10.34831/EP.2022.79.15.004. – EDN KEJDRS.

10. Тукшаитов Р.Х., Семенова О.Д. О характере зависимости коэффициентов мощности и нелинейных искажений тока от уровня потребляемой мощности трансформаторами // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля – 2022. Передовые технологии и современные тенденции: материалы Международной научно-методической конференции. Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2022. С. 361–364.

*Р.М. Петрова, 1998renata@mail.ru,
Е.И. Грачева, grachieva.i@bk.ru, КГЭУ, Казань
Л.И. Абдуллин, abdullin.linar@mail.ru
АО «Сетевая компания», Казань*

ПАРАМЕТРЫ НАДЕЖНОСТИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ СИСТЕМ ВНУТРИЗАВОДСКОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В настоящее время актуальна разработка алгоритмов и моделей для увеличения достоверности вероятностных оценок параметров надежности электроустановок и повышения качества эксплуатации внутрицехового электроснабжения [1]. Как известно, режимы эксплуатации электрооборудования также влияют на надежность работы цеховых сетей [2].

Научной новизной предлагаемой работы является уточнение алгоритмов оценки надежности функционирования кабельных линий 0,4 кВ, используемых во внутриводском электрообеспечении, с использованием эксплуатационных данных. Проанализируем на примере одного предприятия эксплуатационные характеристики кабельных линий АВВГ-0,4 кВ сечением $S = 2,5 - 240 \text{ мм}^2$ (различных заводов-изготовителей).

Вычислим значение вероятности времени безотказной работы – $P(t)$ и значение вероятности времени появления отказа $Q(t)$ [3]:

$$P(t) = \frac{F\left(\frac{T_{\text{средн}} - t_n}{\sigma_{\text{скв}}}\right)}{F\left(\frac{T_{\text{средн}}}{\sigma_{\text{скв}}}\right)}, \quad (1)$$

$$Q(t) = 1 - P(t) = \frac{\int_0^t e^{-\frac{(t_n - T_{\text{средн}})^2}{2\sigma_{\text{скв}}^2}} dt}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\text{скв}}}, \quad (2)$$

где t_n – продолжительность экспериментального исследования, лет; $T_{\text{средн}}$ – значение среднего времени наработки до выхода из строя кабельной линии, лет; $\sigma_{\text{скв}}$ – значение среднеквадратического отклонения времени наработки до выхода из строя, лет; F – значение функции Лапласа.

Экспериментальные значения величин функций $P^*(t_i)$ и $Q^*(t_i)$:

$$P^*(t_i) = \frac{N_{\text{общ}} - n_{i,\text{сум}}(t)}{N_{\text{общ}}}, \quad (3)$$

$$Q^*(t_i) = 1 - P^*(t_i) = \frac{n_{i,\text{сум}}(t)}{N_{\text{общ}}}, \quad (4)$$

где $n_{i,\text{сум}}(t)$ – суммарное количество вышедших из строя единиц оборудования, шт.; $N_{\text{общ}}$ – общее количество исследуемых единиц оборудования, шт.

Из 72 кабельных линий АВВГ-0,4 кВ сечением $S = 2,5 - 240 \text{ мм}^2$ в интервале исследования $t = 35$ лет вышло из строя 65 линий, при этом за первые 20 лет не было выходов из строя. Вычислим $P_{кл}^*(t_i)$ и $Q_{кл}^*(t_i)$:

$$P_{кл}^*(t = 1 \div 20) = \frac{72 - 0}{72} = 1,000, \quad Q_{кл}^*(t = 1 \div 20) = \frac{0}{72} = 0,000,$$

$$P_{кл}^*(t = 25) = \frac{72 - 5}{72} = 0,931, \quad Q_{кл}^*(t = 25) = \frac{5}{72} = 0,069,$$

$$P_{кл}^*(t = 35) = \frac{72 - 65}{72} = 0,097, \quad Q_{кл}^*(t = 35) = \frac{65}{72} = 0,903.$$

Данные вычислений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты исследования работоспособности кабельных линий АВВГ-0,4 кВ за интервал наблюдений 35 лет

Интервал наблюдений, t_i , годы	Общее число исследуемых кабельных линий			Значение функций распределения вероятностей по эксплуатационным данным	
	вышедших из строя за каждый год наблюдений, n_i , шт	общее число неработоспособных, $n_{i, сум}(t)$	работоспособных, I_i	$P_{кл}^*(t_i)$	$Q_{кл}^*(t_i)$
1	0	0	72	1,000	0,000
2...19	0	0	72	1,000	0,000
20	0	0	72	1,000	0,000
21	1	1	71	0,986	0,014
22	0	1	71	0,986	0,014
23	1	2	70	0,972	0,028
24	1	3	69	0,958	0,042
25	2	5	67	0,931	0,069
26	3	8	64	0,889	0,111
27	3	11	61	0,847	0,153
28	4	15	57	0,792	0,208
29	6	21	51	0,708	0,292
30	7	28	44	0,611	0,389
31	9	37	35	0,486	0,514
32	11	48	24	0,333	0,667
33	10	58	14	0,194	0,806
34	3	61	11	0,153	0,847
35	4	65	7	0,097	0,903

Тогда время средней наработки на отказ [3, 4]:

$$\bar{T}_{\text{средн.кл}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{общ.кл}}} t_{i\text{кл}}}{N_{\text{общ.кл}}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{общ.кл}}} n_{i\text{кл}} \cdot t_{\text{ср}i}}{N_{\text{общ.кл}}} \quad (5)$$

где $N_{\text{общ.кл}}$ – общее число всех исследуемых кабельных линий, шт.; $n_{i\text{кл}}$ – число отказавших кабельных линий на i -ом временном интервале.

Не рассматривая первые 20 лет наблюдений (т.к. число вышедших из строя кабельных линий за каждый год равно нулю), вычислим величину среднеквадратического отклонения времени безотказной работы [3, 4]:

$$\sigma_{\text{скв.кл}} = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(t_{i\text{кл}} - T_{\text{средн.кл}})^2}{t}} \quad (6)$$

По результатам вычислений получаем: $\sigma_{\text{скв.кл}} = 1,6$ года; $T_{\text{средн.кл}} = 30$ лет.

Теоретическая функция вероятности времени безотказной работы рассчитывается по формулам (1) – (2). Определим $P_{\text{кл}}(t)$ и $Q_{\text{кл}}(t)$ для кабельных линий АВВГ-0,4 кВ:

$$P_{\text{кл}}(t=1) = \frac{F(8,5)}{F(8,824)} = \frac{1,000}{1,000} = 1,000,$$

$$Q_{\text{кл}}(t=1) = 0,000,$$

$$P_{\text{кл}}(t=20) = \frac{F(2,9)}{F(8,824)} = \frac{0,998}{1,000} = 0,998,$$

$$Q_{\text{кл}}(t=20) = 1 - 0,998 = 0,002.$$

Данные вычислений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты оценок характеристик надежности

Интервал наблюдений, t_i , годы	Значение $\frac{T_{\text{средн}} - t}{\sigma_{\text{скв}}}$	Значение функции $F\left(\frac{T_{\text{средн}} - t}{\sigma_{\text{скв}}}\right)$	$\frac{T_{\text{средн}}}{\sigma_{\text{скв}}}$	$F\left(\frac{T_{\text{средн}}}{\sigma_{\text{скв}}}\right)$	Функция распределения	
					$P_{\text{кпл}}(t)$	$Q_{\text{кпл}}(t)$
1	8,5	1,000	8,824	1,000	1,000	0,000
2	8,2	1,000			1,000	0,000
3	7,9	1,000			1,000	0,000
4	7,6	1,000			1,000	0,000
5	7,4	1,000			1,000	0,000
6	7,1	1,000			1,000	0,000
7	6,8	1,000			1,000	0,000
8	6,5	1,000			1,000	0,000
9	6,2	1,000			1,000	0,000
10	5,9	1,000			1,000	0,000
11	5,6	1,000			1,000	0,000
12	5,3	1,000			1,000	0,000
13	5,0	1,000			1,000	0,000
14	4,7	1,000			1,000	0,000
15	4,4	1,000			1,000	0,000
16	4,1	1,000			1,000	0,000
17	3,8	1,000			1,000	0,000
18	3,5	1,000			1,000	0,000
19	3,2	0,999			0,999	0,001
20	2,9	0,998			0,998	0,002
21	2,6	0,996			0,996	0,004
22	2,4	0,991			0,991	0,009
23	2,1	0,980			0,980	0,020
24	1,8	0,961			0,961	0,039
25	1,5	0,929			0,929	0,071
26	1,2	0,880			0,880	0,120
27	0,9	0,811			0,811	0,189
28	0,6	0,722			0,722	0,278
29	0,3	0,616			0,616	0,384
30	0,0	0,500			0,500	0,500
31	-0,3	0,384			0,384	0,616
32	-0,6	0,278			0,278	0,722
33	-0,9	0,189			0,189	0,811
34	-1,2	0,120			0,120	0,880
35	-1,5	0,071			0,071	0,929

На рисунке 1 даны графические зависимости изменения во времени $P_{кл}^*(t_i)$, $Q_{кл}^*(t_i)$, $P_{кл}(t)$ и $Q_{кл}(t)$.

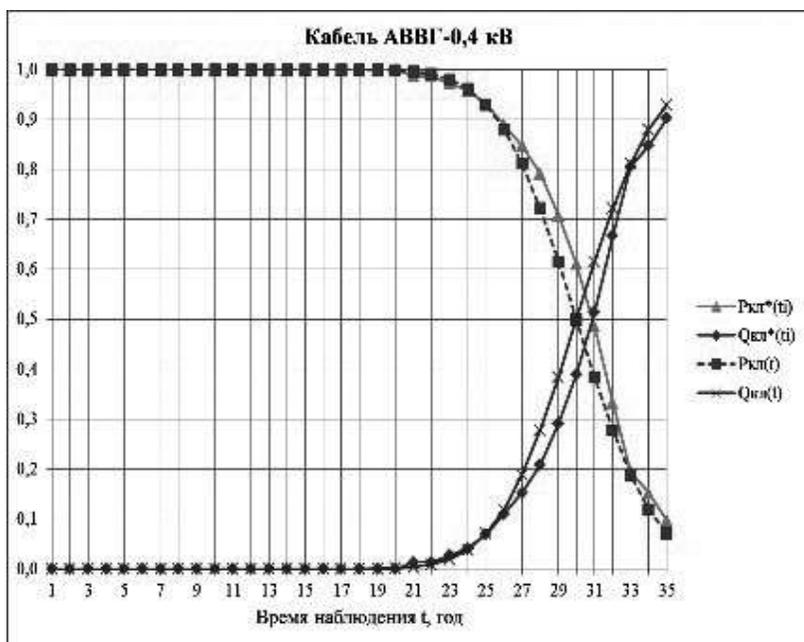


Рис. 1. Графические зависимости изменения во времени $P_{кл}^*(t_i)$, $Q_{кл}^*(t_i)$, $P_{кл}(t)$, $Q_{кл}(t)$ для кабельных линий АВВГ-0,4 кВ

Для кабельных линий АВВГ-0,4 кВ $P_{кл}(t)$ оценивается величиной не менее 0,847 в интервале первых 27 лет работы (при паспортном значении срока эксплуатации в 25 лет), что показывает соответствие данного параметра допустимой величине для нормативного периода эксплуатации, принимаемого по требованиям ГОСТ 12434-83.

Алгоритм проверки установленного закона распределения исследуемых параметров кабельных линий. Критерий Пирсона (или критерий χ^2) применяется для проверки гипотезы H_0 о том, что случайная величина подчиняется нормальному закону распределения [5, 6]. При $\chi^2 > \chi^2_{табл}$, гипотезу H_0 отвергают, при $\chi^2 \leq \chi^2_{табл}$ – гипотезу принимают.

При проверке по критерию Пирсона (χ^2) воспользуемся формулой:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(Q_{кл}^*(t_i) - Q_{кл}(t))^2}{Q_{кл}(t)}, \quad (7)$$

где $Q_{кл}^*(t_i)$ – экспериментальные результаты расчета; $Q_{кл}(t)$ – теоретические результаты расчета.

Исключив первые 18 значений, где $Q_{кл}(t) = 0$, получаем $\chi^2_{кл} = 0,127$. Число степеней свободы [5, 6] определяется как

$$s = n - z - 1, \quad (8)$$

где n – количество интервалов (в данном случае $n=17$); z – число параметров распределения.

Для рассматриваемого примера $s = 17 - 2 - 1 = 14$, где $z = 2$, так как вычислялось два параметра надежности: время безотказной работы и время появления отказа. Далее по справочной таблице [6] определим $\chi^2_{табл} = 6,6$ (для $s = 14$ и $z = 2$, при вероятности 0,95). Тогда $\chi^2_{кл} \leq \chi^2_{табл}$ ($0,127 \leq 6,6$).

Следовательно, выборочные данные наблюдений достоверны, соответствуют нормальному закону распределения и согласуются с фактическими данными. Нет оснований отвергать гипотезу H_0 о нормальности распределения. Нормальный закон распределения можно считать верно подобранным и оптимальным для расчетов вероятности времени безотказной работы и вероятности времени появления отказов электрооборудования.

Выводы. В представленном докладе определены закономерности изменения значений $P_{кл}^*(t_i)$, $Q_{кл}^*(t_i)$, $P_{кл}(t)$, $Q_{кл}(t)$ для кабельных линий АВВГ-0,4 кВ. Полученные данные рекомендуется использовать для корректировки регламентов проведения текущего обслуживания и капитальных ремонтов систем внутривзаводского электроснабжения.

Установлено, что параметры надежности исследуемых кабельных линий АВВГ-0,4 кВ при фактических режимах эксплуатации соответствуют паспортным срокам службы.

Проведенная проверка исследуемых случайных величин показала, что теоретические и эмпирические функции параметров надежности подчиняются нормальному закону распределения.

Литература

1. **Конюхова Е.А., Киреева Э.А.** Надежность электроснабжения промышленных предприятий. Библиотечка электротехника. Выпуск 12(36). М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. 93 с.

2. **Петрова Р.М., Грачева Е.И.** Надежность и перегрузочная способность силовых трансформаторов // Фёдоровские чтения – 2022: ЛП Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (с элементами научной школы для молодежи). М.: Издательский дом МЭИ, 2022. С. 233–240.

3. **Петрова Р.М., Абдуллизянов Э.Ю., Грачева Е.И., Valtchev S., Yousef Ibragim.** Исследование вероятностных характеристик надежности электрооборудования внутрицеховых систем электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. № 1 (57). С. 93–105.

4. **Gracheva E., Petrova R.M., Valtchev S., Sinyukova T.** Study of Probability Characteristics of the Reliability of Electrical Equipment in Internal Power Supply Systems. 2023 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Nevsehir, Turkiye, 2023. Pp. 460–465. DOI: 10.1109/GPECOM58364.2023.10175821.

5. **Грачева Е.И., Садыков Р.Р., Хуснутдинов Р.Р., Абдуллизянов Р.Э.** Исследование параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов по эксплуатационным данным промышленных предприятий // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2019. № 1–2. С. 13–17.

6. **Математическая статистика** / В.М.Иванова, В.Н. Калинина, Л.А. Нешумова и др. М.: Высшая школа; 1981. 371 с.

Л.Р. Романов, RomanovL.R@yandex.ru
О.В. Крюков, o.v.kryukov@mail.ru
ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород

РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

В настоящее время приоритетным направлением государственной политики Российской Федерации на период до 2035 года является процесс реформирования и развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) страны [1, 2]. Основными потребителями электроэнергии в ТЭК являются электротехнические комплексы и системы промышленного назначения, которые потребляют порядка 75 % всей генерируемой мощности. В свою очередь, электротехнические комплексы релейной защиты и автоматики (РЗА) играют ключевую роль в обеспечении надежного электропитания промышленных объектов, так как они предназначены для ликвидации повреждений и аварийных режимов, возникающих в электрических сетях на уровне различных электроустановок, распределительных устройств и комплектных трансформаторных подстанций [3].

Корректная работа систем РЗА напрямую влияет на качество выявления аварийных режимов, а также на исключение ложных и излишних срабатываний. В свою очередь, неправильная работа защит может стать причиной значительного экономического, материального и экологического ущерба.

Анализ функционирования устройств РЗА. Систематизация результатов технического учета и анализа функционирования электротехнических комплексов РЗА по данным системного оператора за 2019–2022 гг. с классификацией по видам и причинам неправильной работы представлена на рис. 1 и 2 [4]. Классификация видов неправильного функционирования комплексов РЗА представлена на рис. 1, основные технические причины неправильного

функционирования комплексов РЗА на рис. 2. Можно сделать вывод, что в среднем количество неправильных срабатываний находится в пределах от 3 до 4 % от общего количества срабатываний [5, 6].

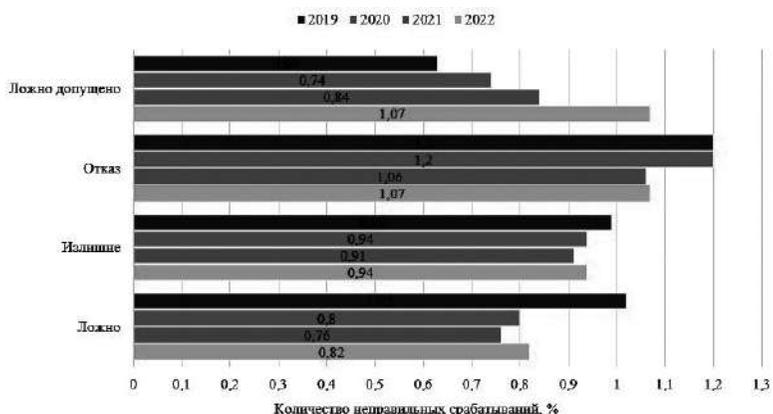


Рис. 1. Классификация неправильного функционирования комплексов РЗА

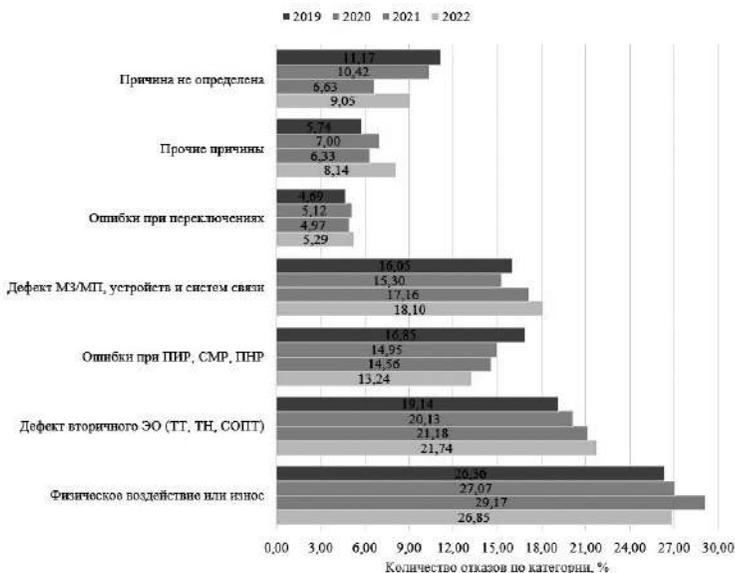


Рис. 2. Классификация технических причин неправильного функционирования комплексов РЗА

Таким образом, исходя из официального отчета АО «СО ЕЭС» о результатах функционирования устройств РЗА в ЕЭС России, можно констатировать, что частыми техническими причинами неисправности комплексов РЗА являются некачественное проектирование, монтаж и наладка устройств релейной защиты и автоматики (14–16 %). Однако наиболее распространенной причиной является их физический износ (26–29 %), а также дефекты во вторичных цепях (19–22 %) и в оборудовании вторичных цепей. Стоит отметить, что по данным ПАО «ФСК ЕЭС» и их ДЗО суммарное количество устаревших устройств РЗА в настоящее время составляет около 50 %. Кроме того, большая часть систем релейной защиты (76 %) все еще остается на электромеханической элементной базе, из которой 62 % устройств уже имеет срок службы выше нормативного.

Для стабильного развития ТЭК Российской Федерации необходимо продолжать осуществлять модернизацию как объектов электроэнергетики, так и электрических распределительных сетей, в том числе производить замену технически и морально устаревших электромеханических защит на микропроцессорные терминалы (МПТ). Опыт применения МПТ показывает снижение количества случаев неправильной работы по причине износа, также у МПТ со временем снижается интенсивность отказов программного обеспечения (ПО) [6].

Модернизация электроэнергетических систем не ограничивается только заменой элементной базы релейной защиты, она также включает в себя развитие самих электрических сетей, в частности, переход к цифровым активно-адаптивным сетям с интеллектуальной системой автоматизации и управления в соответствии с программой инновационного развития ПАО «Россети» [7]. В последнее время стало увеличиваться число различных источников малой и распределенной генерации. В свою очередь, данные изменения будут оказывать негативное влияние на работу систем РЗА, а именно на их эффективность (чувствительность, селективность, быстродействие), так как большинство существующих алгоритмов релейных защит копирует принципы работы, заложенные еще на электромеханической элементной базе.

В условиях развивающейся электроэнергетики использование устаревших методик в алгоритмах релейной защиты является нецелесообразным и способно привести к увеличению числа ложных срабатываний, тем самым снижая надежность электроснабжения. Таким образом, актуальной задачей является разработка и внедрение усовершенствованных алгоритмов защит в существующие комплексы РЗА.

Вариант усовершенствования токовых защит. Одним из многообещающих способов для решения вышеописанной проблемы совершенствования защит электрических сетей 6–35 кВ является применение многопараметрических защит, построенных на основе информационной теории Шеннона [8–10].

Опираясь на данный принцип, возможно реализовать алгоритм многопараметрической токовой защиты, используя различные параметры сети. Алгоритм работы и принятия решения предлагаемой защиты представлен на рис. 3. В частности, в данном докладе рассматриваются только многопараметрические токовые защиты, так как они являются наиболее распространенными видами защит в распределительных сетях 6–35 кВ.

Для синтеза усовершенствованного алгоритма токовой защиты воспользуемся параметрами аварийного режима, в частности, наиболее простым для вычисления параметром такого режима является чисто аварийный ток, вычисляемый по формуле (1):

$$\underline{I}_{\text{ав}} = \underline{I} - \underline{I}_{\text{н}}, \quad (1)$$

где $\underline{I}_{\text{ав}}$ – чисто аварийный ток; \underline{I} – ток, измеряемый защитой; $\underline{I}_{\text{н}}$ – ток доаварийного (запомненного) режима.

Таким образом, основной идеей алгоритма является нахождение значений приращения токов по каждой из фаз, как $dI/dt \approx \Delta I/\Delta t$ при значении $\Delta t \approx 0,02$ секунды, что равно одному периоду промышленной частоты 50 Гц. При таком подходе обработка изме-

ренных значений, переданных от трансформаторов тока к терминалу релейной защиты, сводится к нахождению следующей разности токов (2):

$$\Delta I = I(t) - I(t - 0,02), \quad (2)$$

где $I(t)$ – действующее значение тока, измеряемого защитой в произвольный момент времени; $I(t - 0,02)$ – действующее значение тока доаварийного (запомненного) режима.

В соответствии с принципом многомерности в предлагаемом алгоритме имеется возможность вводить и другие параметры аварийного режима электрической сети, чтобы дополнить защиту новыми измерительными органами (ИО), как было показано на рис. 3. В текущем исследовании рассматривался эффект от внедрения в алгоритм дополнительного ИО по фазе чисто аварийного тока, в основе которого лежит такой же порядок вычисления, как и для чисто аварийного тока (2).

Таким образом получим двухпараметрическую токовую защиту:

$$I_{ав} = I(t) - I(t - 0,02); \quad (3)$$

$$\varphi_{ав} = \varphi(t) - \varphi(t - 0,02), \quad (4)$$

где $I(t)$, $\varphi(t)$ – действующее значение тока и его фазы; $I(t-0,02)$, $\varphi(t-0,02)$ – действующее доаварийное (запомненное) значение тока и его фазы.

Исходя из (3) и (4) можно сделать вывод, что в предлагаемой конфигурации ИО защита оперирует в двумерном пространстве. В связи с этим уставочные области срабатывания будут вводиться в виде сеточных функций, что упростит внедрение алгоритма в существующие терминалы РЗА.

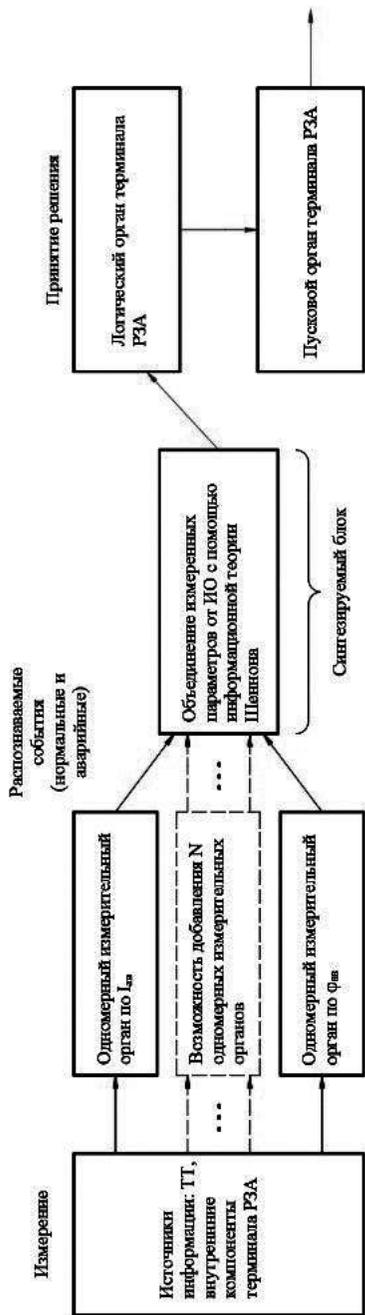


Рис. 3. Обобщенный алгоритм принятия решения многопараметрической токовой защитой

Для корректной работы алгоритма необходимо ввести критерии срабатывания пусковых органов релейной защиты. С учетом опытных данных уставка срабатывания защиты будет вычисляться следующим образом:

$$I_{сз} = K_{отс} \cdot I_{нб\ max}; \quad (5)$$

$$\varphi_{сз} = K_{отс} \cdot \varphi_{нб\ max}, \quad (6)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки $K_{отс} = 1,1$, учитывающий погрешность измерительных преобразователей; $I_{нб\ max}$ – максимальный аварийный ток небаланса; $\varphi_{нб\ max}$ – максимальная аварийная фаза тока небаланса.

Математическое имитационное моделирование двухпараметрической токовой защиты. Для проверки и последующего анализа информационной ценности предложенного алгоритма токовой защиты, оперирующей чисто аварийным током и его фазой, необходимо произвести математическое имитационное моделирование. Для подобных целей подходит программный комплект *PSCAD*. По результатам моделирования множества режимов на статистической модели можно выявить, различает ли предложенный алгоритм нормальные и аварийные режимы в электрической сети.

В качестве объекта для имитационного моделирования был выбран участок электрической сети 10 кВ с односторонним питанием. Система заземления нейтрали – изолированная. Рассматриваемая часть сети является довольно распространенным вариантом сетей электроснабжения вдоль трассовых трубопроводов, а также сельских сетей [10, 11]. Конфигурация моделируемого участка распределительной сети показана на рис. 4, имитационная модель на рис. 5.

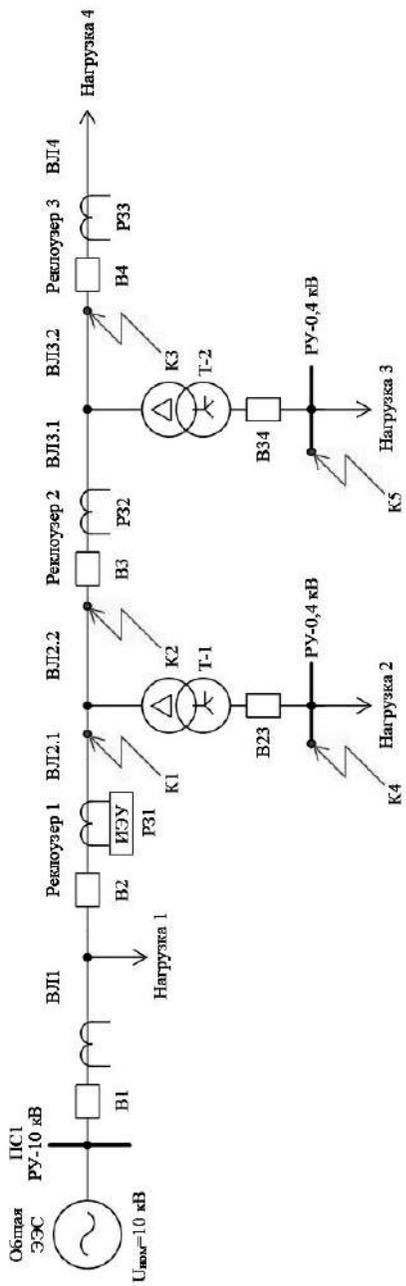


Рис. 4. Принципиальная схема участка электрической сети 10 кВ с односторонним питанием

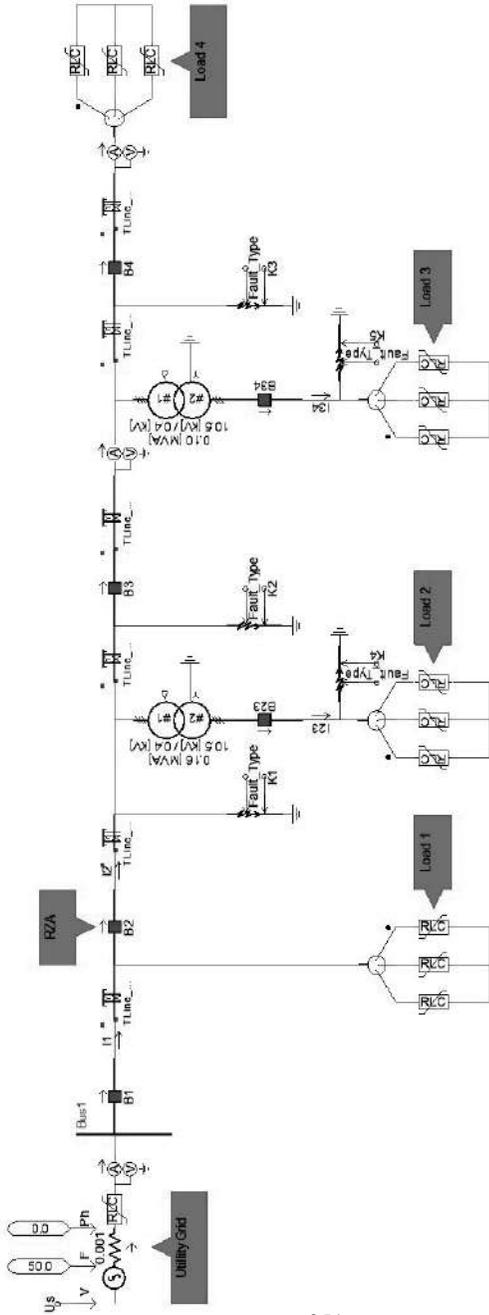


Рис. 5. Схема имитационной модели участка электрической сети 10 кВ в PSCAD

В качестве критерия для оценки эффективности предложенного алгоритма многопараметрической токовой защиты по сравнению с традиционными решениями в релейной защите можно применить критерий оценки по количеству информации (энтропии) на основе информационной теории Шеннона [9]. Указанный способ позволяет рассматривать любой вид релейной защиты как информационную систему, а также однозначно определить относительные вероятности правильного и ошибочного распознавания режима исследуемого алгоритма защиты. Собранные статистические данные моделирования показывают увеличение эффективности распознаваемости аварийных режимов защитой при введении дополнительного ИО по фазе чисто аварийного тока (4) в дополнение к ИО по чисто аварийному току (3).

Выводы. Разработан способ усовершенствования традиционной токовой защиты посредством применения алгоритма двухпараметрической токовой защиты с измерительными органами по чисто аварийному току и его фазе ($\varphi_{ав}$, $I_{ав}$). По результатам проведенного имитационного моделирования предложенная защита показывает прирост до 10 % в способности к распознаванию различных режимов по сравнению с классической токовой защитой, т.е. повышается вероятность правильного распознавания аварийного режима, тем самым повышается надежность электроснабжения.

Литература

1. **Vasenin A.B., Kryukov O.V., Serebryakov A.V.** Adaptive control algorithms of autonomous generator complexes // Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты. Труды МКЭЭЭ-2016. М.: МЭИ. С. 133–135.

2. **Подшивалов Е.С., Крюков О.В.** Перспективы развития систем электроснабжения объектов АПК на базе распределенной энергетики // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70. № 1 (50). С. 45–52.

3. **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.

4. **Информация** о результатах функционирования устройств РЗА в ЕЭС России в 2023 году. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-base/rza/rza-account-analys/rza-results-info/2023/> (дата обращения 14.09.2023).

5. **Ипполитов В.А., Горохова Н.Б., Груздев В.В.** Структуры и направления развития электротехнических комплексов релейной защиты и автоматики // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2023. № 7 (168). С. 40–48.

6. **Ипполитов В.А., Погодина С.А., Романов Л.Р., Крюков О.В.** Способ диагностики электротехнических комплексов релейной защиты и автоматики цифровых подстанций // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2023. № 8 (169). С. 32–41.

7. **Программа** инновационного развития ПАО «Россети» на период 2016–2020 гг. с перспективой до 2025 г. https://www.rosseti.ru/investment/policy_innovation_development/doc/innovation_program.pdf.

8. **Шарыгин М.В., Куликов А.Л., Петров А.А.** Синтез универсального многомерного измерительно-пускового органа релейной защиты // Электричество. 2020. № 1. С. 4–11.

9. **Шарыгин М. В., Куликов А.Л.** Защита и автоматика систем электроснабжения с активными промышленными потребителями: монография // Н.Новгород: НИУ РАНХиГС. 2017. 284 с.

10. **Шарыгин М. В. Романов Л.Р., Крюков О.В.** Совершенствование токовых защит реклоузеров в распределительных сетях 6–35 кВ // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения): Материалы МНТК. Том 3. Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2023. – С. 336–339.

11. **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.

ОСОБЕННОСТИ РЕЛЕЙНОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

При формировании режима электропотребления предприятия на него накладываются различные ограничения: режимные, организационно-производственные, технологические, эксплуатационные; также необходимо учитывать и показатели качества электроэнергетики [1].

Режимные ограничения по потреблению активной (АМ) и реактивной мощности (РМ) следует рассматривать в двух аспектах: зависимые и независимые.

Зависимые – регламентированы приказом Министерства промышленности и энергетики РФ № 49 от 22.02.2007 г.; режимы вводятся энергоснабжающими организациями в виде усредненных за получасовые (часовые) промежутки времени значений РМ (Q_3) на периоды максимальных нагрузок энергосистемы (ΔT_{\max}), минимальных нагрузок (ΔT_{\min}), на специальные договорные периоды суток ($\Delta T_{\text{дог}}$); непосредственно влияют на формирование графика нагрузки по АМ и РМ предприятия.

Независимые – работа электротехнического комплекса влечёт за собой постоянное изменение параметров работы электрической сети. Режимные ограничения следует рассматривать с особой тщательностью.

Организационно-производственные ограничения определяют возможность планировать и осуществлять работу участков (цехов) предприятия в ритме, обеспечивающем выполнение производственной программы с учетом социальных и физиологических требований.

Технологические ограничения, регламентирующие длительность и диапазон увеличения (уменьшения) нагрузки технологических установок, согласно требованиям правил безопасности и эксплуатации, предлагается задавать усредненными получасовыми

(часовыми) промежутками времени, минимально необходимыми значениями АМ предприятия и соответствующими этим величинам значениями РМ.

Эксплуатационные ограничения регламентируют пределы изменения текущих и усредненных за получасовые (часовые) промежутки времени значений АМ и РМ электроустановок и электроприемников в соответствии с требованиями правил безопасности и эксплуатации электроустановок.

В [1] автор рассмотрел режимные ограничения при нормальной работе электрооборудования. В данном докладе рассматриваются эксплуатационные и технологические ограничения. Эти ограничения задаются уставками защит, однако автор, работая в «МРСК Сибири» – «Красноярскэнерго» в должности ведущего инженера по расследованию технологических нарушений (аварий), увидел в этих понятиях принципиальную разницу.

Обеспечение безопасной эксплуатации электрооборудования электрических станций, подстанций и электрических распределительных сетей, как любого опасного производства, является важнейшим требованием технологического процесса. Известно, что грамотное составление акта технологического нарушения (ТН) с указанием истинной причины, планирование и последующее выполнение организационных и технических мероприятий – основа для исключения в дальнейшем подобных ТН.

Наиболее часто встречающиеся причины ТН: старение изоляции в результате длительной эксплуатации, перекрытие изоляции, усталость металла, схлест проводов ВЛ, различные стихийные явления (длительный снегопад, дожди), динамический удар и др.

Производство электроэнергии, по определению, является опасным и имеет автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУТП), которая состоит из автоматизированной системы управления по электротехнической части АСУТП ЭЧ и автоматизированной системы управления по тепло-

механической и гидромеханической части, которые можно объединить в технологическую АСУТП ТЧ. Понятие технологической защиты, является не очень распространённым, однако встречается, например, в нормативном документе [2].

Каждая часть АСУТП состоит из подсистем защит: АСУТП ЭЧ включает релейную защиту, противоаварийную автоматику, телемеханику (РЗАиТ), которые, согласно ПУЭ, разделяются на «защиту на отключение» и «защиту на сигнал». В АСУТП ТЧ применяют терминологию «предупредительная сигнализация» и «защита».

На первый взгляд, можно сказать, что «защита на отключение» АСУТП ЭЧ аналогична понятию «защита» АСУТП ТЧ, а «защита на сигнал» аналогична понятию «предупредительная сигнализация» АСУТП ТЧ. По мнению автора, следует обратить внимание, что несмотря на схожесть функциональных значений, защиты АСУТП ЭЧ и АСУТП ТЧ принципиально отличаются по построению и содержанию, следовательно, смешивать их в единую подсистему АСУТП, недопустимо.

Тем не менее, в современных нормативных документах имеет место объединение электрических и технологических защит. Примером может служить термин «работа защиты на сигнал», который означает неисправность в АСУТП ЭЧ, но допускает продолжение её работы. В АСУТП ТЧ приведённый термин означает отключение посредством защиты. На первый взгляд, различие незначительно, но это препятствует правильному пониманию предназначения технологических защит, правильному их построению и реализации.

Следует отметить, что опыт использования электрических защит на электростанциях и подстанциях огромный и длительный, чего не скажешь о технологических защитах.

Актуальность доклада состоит в том, что до настоящего времени отсутствуют нормативные документы по выполнению технологических защит, а ведь именно по ним должно осуществляться техническое оснащение, обеспечивающее безопасную работу электростанций и подстанций по технологическим параметрам; как

следствие, в высших и средних учебных заведениях отсутствует раздел курса по технологическим защитам. А ведь АСУТП ТЧ является важнейшей подсистемой АСУТП и предназначена для предотвращения разрушений при возникновении аварийной ситуации. Примерами здесь могут служить множество аварий на электростанциях и подстанциях, один из ярких – авария на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 г. [3].

Схематично структура АСУТП, состоящая из подсистем АСУТП ЭЧ и АСУТП ТЧ, представлена на рис. 1. Эти подсистемы контролируют работу релейной защиты, автоматики, телемеханики (РЗАиТ) и технологических защит (ТЗ) соответственно. В состав РЗАиТ входят блоки предупредительной сигнализации (ЭлПС) и срабатывания защит (ЭлСЗ) электрической части оборудования. В свою очередь, ТЗ состоит из блока предупредительной сигнализации (ТПС) и блока срабатывания аварийной защиты (ТАЗ) для вывода оборудования в безопасное состояние во избежание физического разрушения.

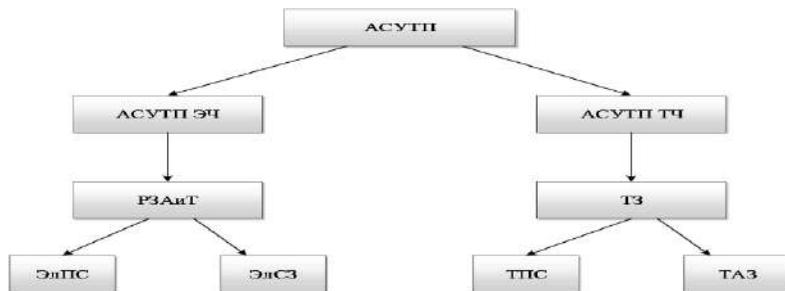


Рис. 1. Структурная схема АСУТП

Задача АСУТП ТЧ – предотвращение аварийной ситуации (разрушения) в случае возникновения предаварийной ситуации в технологическом процессе управляемого объекта, посредством исполнительных органов защиты. Для создания корректно работающей АСУТП ТЧ, отвечающей нормам безопасности, представим на рис. 2 структурную схему технологической сигнализации и защит (блок ТЗ).

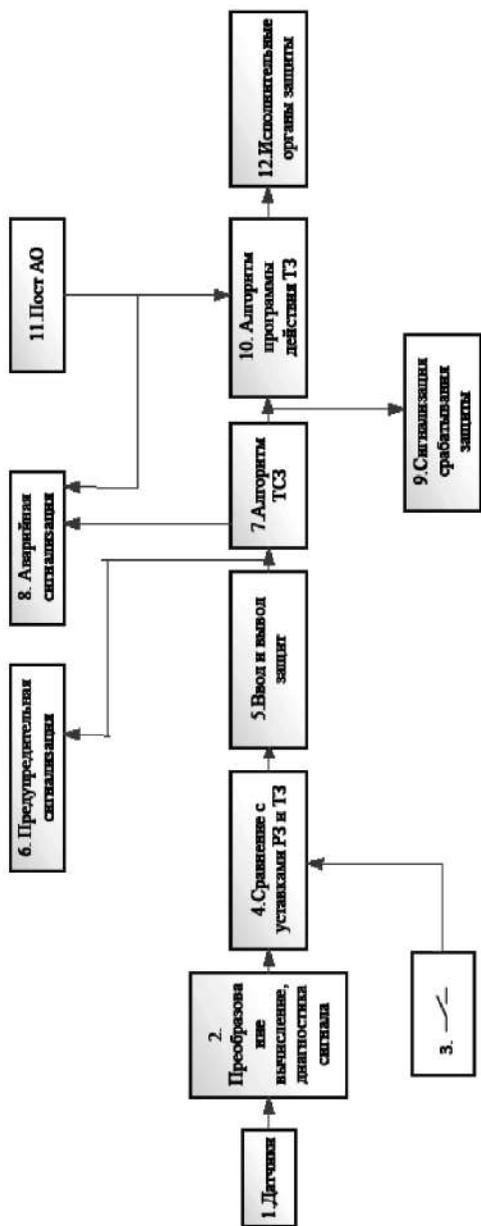


Рис. 2. Структурная схема технологической сигнализации и защиты

Подсистема АСУТП ТЧ содержит следующие функциональные блоки: 1 – измерение параметра; 2 – диагностика сигнала, его вычисление и преобразование; 3 – дискретный сигнал неисправности; 4 – сравнение измеряемых и вычисляемых параметров (дискретный сигнал неисправности сравнивается с уставками предупредительной сигнализации и защиты); 5 – ввод–вывод сигнализации и защит по соответствующим признакам; 6 – предупредительная сигнализация; 7 – формирование алгоритма защиты и выдача команды в программу действия защиты, срабатывание блока ТЗ; 8 – аварийная сигнализация; 9 – сигнализация отключения оборудования от защиты; 10 – осуществление алгоритма программы действия от защит; 11 – пост аварийной остановки работы оборудования, действия диспетчера; 12 – исполнительные органы защиты, приведение защищаемого оборудования в безопасное состояние.

Блоки 4 – 8 образуют ядро ТЗ, в котором осуществляется процесс контроля всего периода предаварийной ситуации – от начала срабатывания предупредительной сигнализации до срабатывания защиты. Здесь формируется и осуществляется алгоритм ТЗ АСУТП ТЧ. Последовательная цепь 1, 2, 4, 5, 7, 10, 12 – технологическая защита по контролируемому параметру. Последовательная цепь 3, 4, 5, 7, 10, 12 – технологическая защита по отключению технологического оборудования. Пост аварийного останова (АО) служит для непосредственного включения исполнительных органов защиты, задача которых привести объект управления в безопасное состояние.

При возникновении предаварийной ситуации отказ любого из блоков последовательной цепи 1, 2, 4, 5, 7, 10, 12 или 3, 4, 5, 7, 10, 12 в структурной схеме ТЗ может привести к отказу (несрабатыванию) защиты и как следствие, к аварии, то есть к физическому разрушению управляемого объекта. Обязанность диспетчера – контролировать правильность работы алгоритма ТЗ в предаварийной ситуации и выполнять все действия согласно инструкции. В случае нарушения работы алгоритма ТЗ или его отказа, диспетчеру следует вмешаться и произвести воздействие на исполнительные органы защиты, вплоть до аварийного останова.

При возникновении предаварийной ситуации предлагается построение алгоритма технологической сигнализации и защит по двум правилам.

Правило 1 – при выходе контролируемого параметра из рабочего диапазона и достижения им предупредительной уставки срабатывает технологическая предупредительная сигнализация (ТПС), по которой диспетчер, согласно инструкции, принимает соответствующие меры для возврата параметра в рабочий диапазон. ТПС информирует диспетчера о возможном возникновении аварийной ситуации.

Правило 2 – если действия диспетчера не привели к нормализации параметра, а, наоборот, параметр ухудшился и достиг аварийной уставки, то срабатывает защита АСУТП ТЧ (блок 7) со светозвуковой сигнализацией и указанием причины срабатывания. Такая защита называется технологической аварийной защитой (ТАЗ). Обе защиты являются следствием срабатывания АСУТП.

Назначение ТЗ – защитить оборудование от физического разрушения, привести его в безопасное состояние (блок 12).

Как видно из структурной схемы ТЗ, предупредительная и аварийная сигнализации являются неотъемлемыми частями технологической защиты, которые выполняют свои строго определённые функции и никогда не отключатся при введённой защите (блок 5), даже в случае принудительного отключения защиты по какому либо параметру. Также отметим, что ТПС и ТАЗ, являющиеся составными частями ТЗ, существенно отличаются по своей значимости от других сигнализаций технологического процесса, которые входят в подсистему сигнализации (например, включено/выключено, открыто/закрыто). ТПС и ТАЗ должны отвечать всем требованиям надёжности, предъявляемым к элементам подсистемы технологических защит.

Особое место в ТЗ занимают блоки 6, 10, 12, которые выполняются по алгоритмам завода–изготовителя агрегата и с помощью исполнительных органов защиты приводят оборудование в безопасное состояние при срабатывании ТЗ АСУТП команда из блока 7 (возможно, из блока 11) поступает в блок 10, и далее в блок 12.

Необходимый перечень контролируемых параметров, по которым определяется предупредительная сигнализация и неработоспособное состояние оборудования, по достижении которых прекращается технологический процесс, исполнительные органы защиты и их алгоритмы управления, которые приводят оборудование в безопасное состояние, разрабатываются заводом–изготовителем и фиксируется в технической документации.

На основе представленной структурной схемы ТЗ, правил 1 и 2 предлагается разработать для энергетической отрасли нормативные документы по выполнению технологических сигнализации и защит. Эти документы рекомендуется взять за базовые при создании заводских норм по выполнению технологической сигнализации и защит. В высших и средних технических учебных заведениях необходимо разработать учебный курс по технологическим защитам для подготовки специалистов.

Литература

1. **Кронгауз Д.Э.** О регулировании потоков активной и реактивной мощности в электрических сетях // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2012. № 11. С. 60–64.

2. **Автоматизированные** системы управления технологическими процессами ГЭС и ГАЭС. Условия создания. Нормы и требования [Текст]: СТО 70238424.27.140.010 – 2010 – Введ. 2010.09.30. М.: НП ИНВЭЛ, 2010.

3. **<http://www.raoees.ru/ru/news/news/account/show.cgi?continent.htm>**.

*Г.С. Кулешова, AlexeenkovaGS@mpei.ru
Д.В. Михеев, MikheevDV@mpei.ru
А.О. Кулешов, KuleshovAO@mpei.ru
НИИ «МЭИ», г. Москва*

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В современных распределительных сетях и системах электроснабжения потребителей особое внимание уделяется повышению эффективности, надежности и экономичности функционирования. В связи с этим важными задачами являются компенсация реактивной мощности (КРМ) и повышение качества электрической энергии, потребляемой из сети переменного тока электротехническими комплексами и системами. Одним из эффективных способов решения данных задач является применение фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ). С целью улучшения технико-экономических характеристик ФКУ может применяться принцип самокомпенсации реактивной мощности, который технически реализуется в индуктивно-емкостных элементах (каткомах), сочетающих индуктивные и емкостные свойства в единой структуре [1, 2]. ФКУ на основе катконов выполняют те же функции, что и пассивные дискретные ФКУ, но основываются на другом физическом принципе и имеют иную техническую конфигурацию [3].

Известны однофазные ФКУ на основе индуктивно-емкостных элементов, при построении которых секции катконов (рис. 1,а) размещают на магнитопроводе с немагнитными зазорами, соединяют последовательно согласно между собой и катушками коррекции и подключают к компенсируемой электрической сети (ЭС) (рис. 1,б), что обеспечивает эффективное управление магнитными потоками и позволяет изменять эквивалентные параметры уже готового устройства при изменении параметров компенсируемой ЭС [4, 5]. В этой связи является актуальной задача определения интегральных (электрических и конструкционных) параметров устройства под заданный режим работы ЭС.

Отметим, что при инженерном проектировании и теоретическом расчете электрических параметров эквивалентная схема замещения ФКУ на базе индуктивно-емкостных элементов может быть принята в соответствии с рис. 1, в [6]. Методические подходы и алгоритм расчета эквивалентных электрических параметров ФКУ под заданный режим работы ЭС приведены в работах [7, 8]. Таким образом, в данной работе представлен алгоритм определения интегральных параметров устройства при переходе от электрических параметров, полученных в результате теоретического расчета, к конструкционным параметрам.

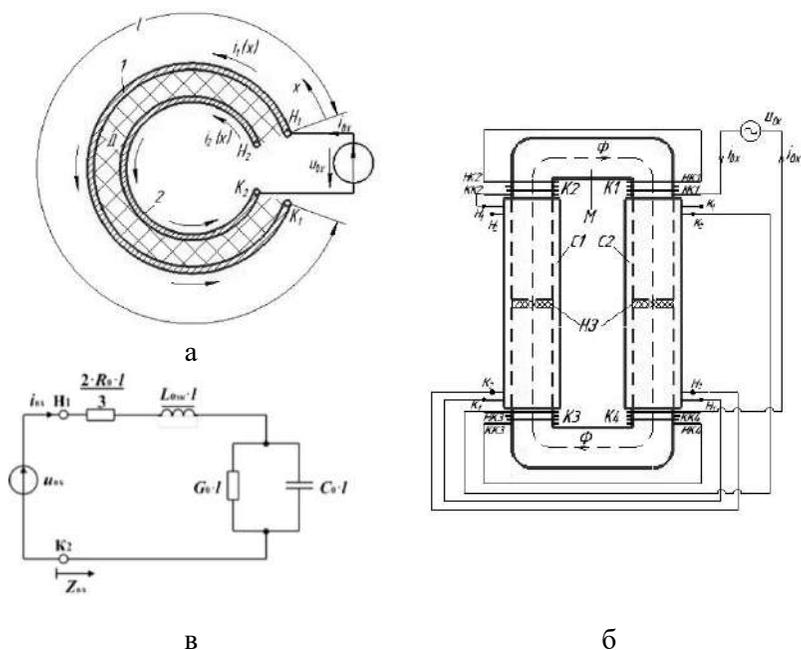


Рис. 1. ФКУ на базе катконов:

- а* – секция индуктивно-емкостного элемента (один виток, вид сверху, выходные выводы разомкнуты);
- б* – функциональная схема однофазной двухсекционной модели;
- в* – схема замещения ФКУ с эквивалентными сосредоточенными параметрами относительно выводов Н1 и К2 при разомкнутых выводах К1 и Н2

Порядок определения интегральных параметров ФКУ на основе индуктивно-емкостных элементов заключается в последовательной реализации следующих действий.

1. По результатам теоретического расчета эквивалентных параметров $L_{0эк} \cdot l$ и $C_0 \cdot l$ для принятой схемы замещения ФКУ с учетом условий, накладываемых необходимостью обеспечения КРМ на основной частоте и резонанса напряжений на частоте ВГ, определяются эквивалентные сосредоточенные параметры $C_{сек}$ и $L_{сек}$ для одной секции каткона, полагая, что индуктивность $L_{0эк}$ и емкость C_0 на единицу длины остаются неизменными, а длина l меняется пропорционально количеству секций n , соединяемых между собой:

$$C_{сек} = \frac{C_0 \cdot l}{n}, \text{ мкФ}; \quad L_{сек} = \frac{L_{0эк} \cdot l}{n^2}, \text{ Гн},$$

где n – число секций катконов на фазу, размещаемых на магнитопроводе с необходимыми соединениями.

2. Выбираются конструкционные материалы для изготовления активной части ФКУ (магнитопровода и секций катконов), определяются их электромагнитные и конструкционные параметры.

2.1. Для магнитопровода определяется марка стали и ее параметры согласно зависимостям $B(H)$, $P_{уд}(B)$, $H_c(B_m)$, а также конструкционные параметры: сечение магнитопровода S_m , размеры окна магнитопровода S_o , среднюю длину магнитопровода l_m .

2.2. Для секций катконов определяют параметры проводников из фольги (удельное сопротивление ρ , ширину b , толщину фольги $d_{пр}$), тип диэлектрика, параметры намоточной оправки (внешний и внутренний диаметры, длину, толщину).

Тип диэлектрика, который можно использовать в катконе, определяется на основе значений номинальной емкости ($C_{ном}$), рабочего напряжения и частоты (U_p, f). Для осуществления правильного выбора типа диэлектрика необходимо установить дополнительные условия: допустимое отклонение емкости от номинального значения (точность значения емкости), допустимые измене-

ния емкости при крайних значениях рабочей температуры (температурный коэффициент емкости (ТКЕ)), максимально допустимое значение тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$, минимально допустимое значение сопротивления изоляции конденсатора $R_{\text{из}(\min)}$. Учет совокупности всех перечисленных параметров и условий позволяет выбрать один определенный тип диэлектрика. Если можно выбрать более одного типа диэлектрика, то необходимо провести расчет с каждым из них и выбрать оптимальный вариант.

Внутренний диаметр намоточной оправки определяется исходя из сечения магнитопровода:

$$D_{\text{внутр}} = \sqrt{2 \cdot S_{\text{м}}},$$

толщина оправки $b_{\text{опр}}$ принимается из условия обеспечения механической прочности, а внешний диаметр:

$$D_0 = D_{\text{внутр}} + 2 \cdot b_{\text{опр}},$$

при этом длина оправки должна быть больше ширины пленки диэлектрика не менее, чем на толщину крышек корпуса секции, и не превышать длины окна магнитопровода.

3. Определяется длина проводников из фольги l с учетом выбранного типа диэлектрика (относительной диэлектрической проницаемости ϵ), ширины b и толщины d пленки диэлектрика для достижения необходимой емкости секции $C_{\text{сек}}$.

4. Рассчитывается число витков N , необходимое для обеспечения емкости $C_{\text{сек}}$, и определяется индуктивность L_N , которая будет получена при таком числе витков N :

$$N = \frac{\sqrt{D_0^2 + \frac{4d(d+d_{\text{np}})C_{\text{сек}}}{\epsilon_0 \epsilon b \pi}} - D_0}{4(d+d_{\text{np}})}, \text{ шт};$$

$$L_N = \frac{\mu_{\text{эфф}} \mu_0 N^2 S_{\text{м}}}{l_{\text{м}}}, \text{ Гн}.$$

5. На основе сравнения значений $L_{\text{сек}}$ и L_N делается вывод о необходимости изменения параметров ФКУ. При существенных различиях могут быть изменены параметры: число витков, ширина

и толщина фольги и пленок диэлектрика, геометрия магнитопровода (длина, площадь сечения, размеры окна). При несущественных различиях расчет может быть продолжен.

6. С учетом параметров и характеристик выбранных материалов определяется значение эквивалентного активного сопротивления ФКУ $R_{\text{эк}}$ через эквивалентное сопротивление потерь на гистерезис $R_{\text{г}}$ и вихревые токи $R_{\text{в}}$, а также сопротивление проводников из фольги $R_{\text{Ме}}$:

$$R_{\text{эк}} = R_{\text{г}} + R_{\text{в}} + R_{\text{Ме}}, \text{ Ом.}$$

7. Проводится сравнение электрических параметров ФКУ, полученных в результате выбранного конструктивного исполнения, с электрическими параметрами ФКУ, определенными теоретическим расчетом. При выявлении различий решается вопрос о необходимости корректировки параметров ФКУ. Настройка параметров ФКУ может осуществляться посредством изменения длины немагнитного зазора $l_{\text{НЗ}}$, а также добавлением в конструкцию ФКУ катушек коррекции. Аналитическое выражение, отражающее зависимость длины НЗ от эквивалентной индуктивности:

$$l_{\text{НЗ}} = \frac{N^2 \cdot B \cdot S}{L_{0\text{эк}} \cdot l} - \frac{H(B) \cdot l_{\text{м}}}{H_{\text{НЗ}}}, \text{ мм.}$$

После этого расчет следует повторить до установленного совпадения значений из п. 1 и п. 7.

8. Оценивается соответствие ФКУ установленным критериям: добротность, потери активной мощности, надежность. При этом осуществляется проверка правильности выбора толщины диэлектрика на основе теплового расчета, а также марки стали и геометрии магнитопровода для обеспечения работы ФКУ на линейном участке ОКН.

9. Уточняется конструктивное исполнение и компоновка ФКУ.

9.1. На основе полученных данных окончательно определяются интегральные параметры активной части ФКУ: масса, длина, площадь сечения, немагнитный зазор магнитопровода, масса и габаритные размеры секций катконов.

9.2. Исходя из условий обеспечения надежности, механической прочности, электробезопасности и других осуществляется выбор оснастки, дополнительных соединительных проводников, системы охлаждения, коммутационно-защитной и измерительной аппаратуры.

На основе полученных данных (п. 9.1 и 9.2) вычисляются интегральные массогабаритные параметры ФКУ.

В заключение отметим, что эффективность применения ФКУ на основе катконов определяется его добротностью, уровнем потерь активной мощности, а также зависит от применяемых средств регулирования его параметров и управления его режимами.

Литература

1. **Reeves R.** Inductor-capacitor hybrid // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1975. Vol. 122. № 11. Pp. 1323–1326.
2. **Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Кваснюк А.А., Шакирзянов Ф.Н.** Исследование установившихся режимов работы токоограничивающего и фильтрокомпенсирующего устройств на основе каткона // Фёдоровские чтения – 2019. XLIX международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 178–183.
3. **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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Шакирзянов Ф.Н. Идентификация математической модели фильтрокомпенсирующего устройства на основе каткона с учетом нелинейной характеристики магнитопровода // Электричество. 2017. № 10. С. 55–60.

8. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Шакирзянов Ф.Н. Алгоритм определения параметров каткона – элемента оптимизации режимов электрических сетей // Известия РАН. Энергетика. 2015. № 2. С. 69–75.

*Н.А. Немчинов, NemchinovNA@mpei.ru,
Д.В. Михеев, MikheevDV@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», г. Москва*

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ТОКООГРАНИЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА БАЗЕ КАТУШКИ-КОНДЕНСАТОРА

Минимизация капиталовложений и уменьшение ущерба при возникновении аварийных режимов – одна из важнейших задач проектирования электрических сетей и систем электроснабжения. Основными составляющими капиталовложений являются затраты

на сооружение линий электропередач и трансформаторных подстанций, а главной причиной повреждения электротехнического оборудования при возникновении аварийного режима – продолжительное термическое и электродинамическое воздействие тока короткого замыкания (КЗ). Для предотвращения повреждения электрооборудования и повышения срока службы высоковольтных выключателей используют токоограничивающие устройства (ТОУ). Их применение позволяет в значительной степени уменьшить значение аварийного тока для последующего отключения защищаемого электрооборудования при более благоприятных условиях.

Выбор оптимального значения мощности КЗ проводится в зависимости от номинального напряжения сети и режима работы подключенной нагрузки (табл. 1) [1].

Таблица 1

Оптимальное значение мощности КЗ

Характер нагрузки	Напряжение сети	
	0,4 кВ	6(10) кВ
Спокойная	50 кВА	200...400 МВА
Резкопеременная	-	500...1000 МВА

Увеличение данных мощностей (табл. 1) характерно для потребителей с собственной генерацией и потребителей, находящихся в непосредственной близости к электростанциям, что обуславливает малое сопротивление пути короткого замыкания [2].

В качестве устройства ограничения величины тока короткого замыкания на электростанциях и подстанциях применяют токоограничивающие реакторы [3]. Недостатками такого решения являются необходимость установки большого количества реакторов, существенные потери электроэнергии и необходимость регулировки напряжения на сборных шинах для компенсации падения напряжения на реакторе. Данными недостатками не обладают резонансные ТОУ [1, 4], однако оборудование для их реализации обладает неудовлетворительными массогабаритными показателями и требует значительных капиталовложений [5].

Применение в качестве резонансного ТОУ катушки-конденсатора (каткона) – устройства, совмещающего в своей структуре одновременно свойства индуктивного и ёмкостного элементов, позволит заменить систему из реактора и блока конденсаторов одним устройством и сократить начальные капиталовложения [6–8]. Таким образом, в данной работе ставится задача моделирования режимов работы резонансного ТОУ на базе каткона.

Ограничение тока КЗ при применении ТОУ на основе каткона основывается на изменении его эквивалентной схемы замещения относительно входных выводов Н1 и К2 посредством замыкания его выходных выводов К1 и Н2 (рис. 1,а) [7]. В нормальном режиме работы сети выходы К1 и Н2 разомкнуты (последовательная RLC -цепь), а при возникновении режима сверхтоков выходы К1 и Н2 должны замкнуться (параллельная $RL-RC$ -цепь). В [6-8] в качестве коммутирующего устройства рассматривается искровой промежуток. Данное решение не является надежным за счет сложного и нестабильного процесса горения дуги, не дающей гарантированного замыкания промежутка, собственного нестабильного сопротивления дуги и сложности настройки значения срабатывания. В работе предлагается использование релейных устройств в качестве измерительных и коммутационных органов, не имеющих вышеперечисленных недостатков (рис. 1).

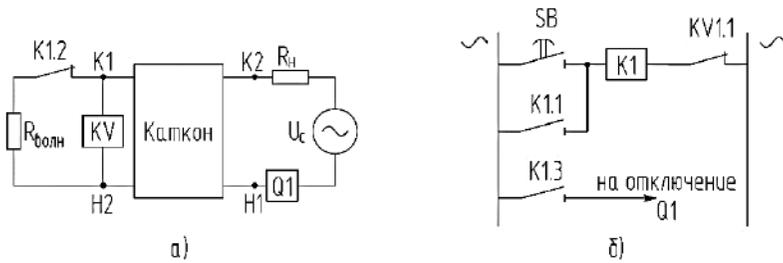


Рис. 1. Токоограничивающее устройство на базе каткона:
а – принципиальная схема, б – оперативная схема

В нормальном режиме работы сети эквивалентное входное сопротивление каткона относительно входных выводов Н1 и К2 близко к нулю (режим резонанса напряжений), напряжение на выводах К1 и Н2 недостаточно для срабатывания реле напряжения KV, контактор К1 самоудерживается во включенном состоянии с помощью контакта К1.1, а контакт К1.2 разомкнут. При прохождении тока КЗ в цепи напряжение на выводах К1 и Н2 будет в несколько раз превышать его входное напряжение в соответствии с (1) [9]:

$$\underline{U}_{\text{вых}} = (1 + j2Q) \cdot \underline{U}_{\text{вх}}, \text{ В}, \quad (1)$$

где $\underline{U}_{\text{вых}}$, В – напряжение на выводах К1 и Н2; Q – добротность каткона; $\underline{U}_{\text{вх}}$, В – напряжение на выводах Н1 и К2.

Таким образом, при возникновении КЗ произойдет превышение уставки реле напряжения KV, подключенного к выводам К1 и Н2, в результате чего произойдет его срабатывание, размыкание контакта KV1.1 и сброс включенного состояния силового контактора К1 (рис. 1,б). Вследствие этого контакт К1.2 замкнется в силовой цепи и изменит граничные условия для ТООУ на базе каткона, что приведет к существенному увеличению входного сопротивления ТООУ относительно выводов Н1 и К2, а контакт К1.3 подаст сигнал на отключение силового выключателя Q1.

При прямом подключении реле напряжения к контактам К1 и Н2 фактическое напряжение на нём в нормальном режиме работы будет превышать допустимое даже при работе ТОО в сети низкого напряжения, следовательно, необходимо подключение реле к ТОО через трансформатор напряжения или делитель напряжения.

Применение ТОО на базе каткона с резистором согласования, сопротивление которого равно волновому сопротивлению каткона ($R_c=R_{\text{волн}}$), позволяет получить ограничение тока КЗ без возникновения переходного процесса [8]. Устранение аperiodической составляющей тока КЗ в совокупности с уменьшением его периодической составляющей позволит использовать оборудование с меньшей термической и электродинамической стойкостью и существенно продлить срок службы установленного оборудования.

Проведём моделирование процесса ограничения тока КЗ в однофазной сети с установленным ТОО на базе каткона (представляется в виде симметричного четырехполюсника) и релейными устройствами в среде Matlab/Simulink (рис. 2). Параметры моделирования приведены в табл. 2.

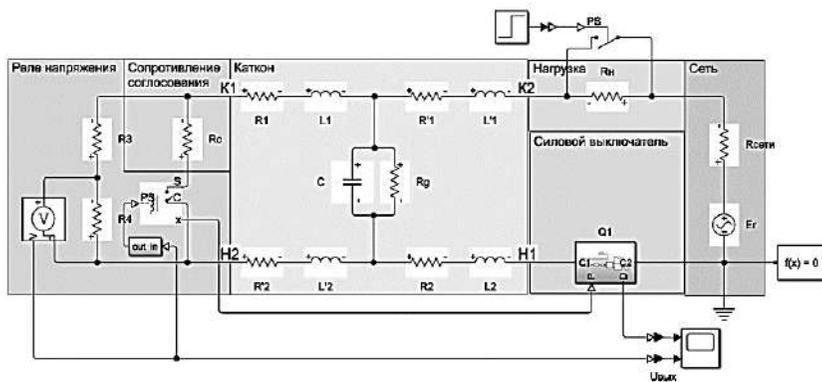
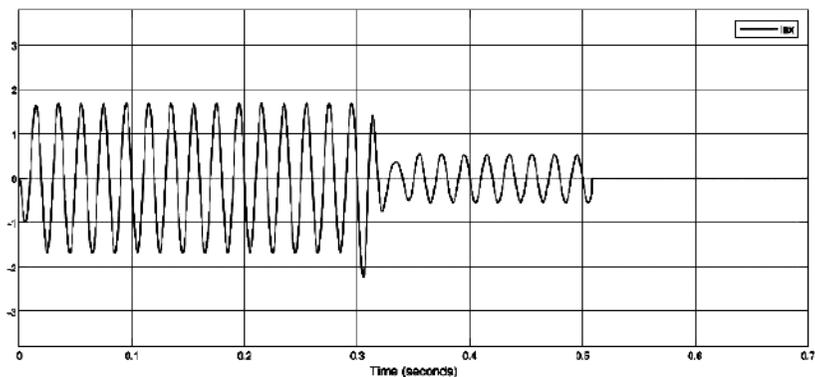


Рис. 2. Модель токоограничивающего устройства в Matlab/Simulink

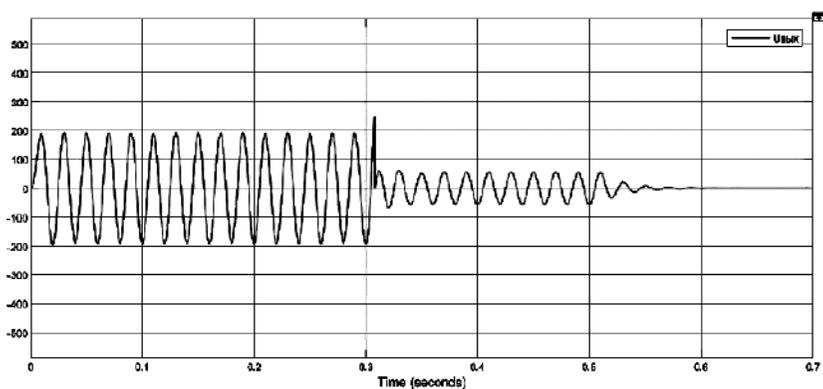
Параметры моделирования

Элемент	Обозначение на схеме	Единицы измерения	Значение
ТОУ на базе каткона	R_1, R'_1, R_2, R'_2	Ом	2,35
	L_1, L'_1, L_2, L'_2	мГн	271
	C	мкФ	17,7
	R_g	МОм	1
Сеть	E_T	В	230
	$R_{сети}$	Ом	0,7
Нагрузка	R_H	Ом	100
Резистор согласования	R_c	Ом	120,4
Реле напряжения	R_3	кОм	50
	R_4	кОм	100
	$U_{ср.р}$	В	250

Полученные при моделировании осциллограммы (рис. 3) демонстрируют, что за счет применения комбинации ТОУ на базе каткона с резистором согласования и релейных устройств обеспечивается оперативное ограничение тока КЗ без возникновения переходных процессов и создание благоприятных условий для коммутации силового выключателя $Q1$; общее время срабатывания (замыкание контакта К1.2 и срабатывание выключателя $Q1$) составляет $\approx 0,5$ с.



а



б

Рис. 3. Осциллограммы тока (а) и напряжения на обмотке реле KV (б)

Литература

1. **Анчарова Т.В., Гусева Н.Н.** Оптимизация токов короткого замыкания с учетом требований по качеству электроэнергии. М.: Издательство МЭИ, 2017. 40 с.

2. **Жуков В.В., Кузнецов В.Д.** Координация уровней токов короткого замыкания в схемах электроснабжения предприятий при создании собственной генерации // Энергетик. 2015. № 9. С. 37–39.

3. **Правила** устройства электроустановок: 7-е изд. М.: Изд-во ЗАО «Энергосервис», 2007. 610 с.

4. **Александров Г.Н., Смоловик С.В.** Переходные процессы в сетях с резонансным токоограничивающим устройством // Электричество. 2002. № 1. С. 15–19.

5. **Жуков В.В., Жирнов В.Г.** Использование сверхпроводникового ограничителя тока КЗ в схемах электроснабжения предприятий при создании собственной генерации // Энергетик. 2016. №11. С. 38–41.

6. **Патент 2660177** Российская Федерация, МПК H02H 9/02 (2006.01). Устройство ограничения токов короткого замыкания // Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Сиренко В.В., Шакирзянов Ф.Н., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». № 2017131883; заявл. 12.09.2017, опубл. 05.07.2018. Бюл. № 19.

7. **Mikheev D.V., Ryzhkova Y.N., Udaratin A.V., Salikhova R.** Experimental study of the operating modes of the resonant current-limiting device // E3S Web of Conferences. Vol. 220 (2020). Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020). Saint-Petersburg, Russia, October 29-30, 2020. Art. № 01049. DOI: 10.1051/e3sconf/202022001049.

8. **Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Кваснюк А.А., Карпунина М.В., Шакирзянов Ф.Н.** Быстродействующее устройство ограничения токов короткого замыкания на основе катушки-конденсатора // Известия РАН. Энергетика. 2021. № 4. С. 58–71.

9. **Михеев Д.В.** Математическое и физическое моделирование электротехнических комплексов на основе каткона (катушки-конденсатора): дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.03. Москва, 2019. 217 с.

*А.В. Галимова, FedorovaAV@mpei.ru,
А.А. Белогловский, BeloglovskyAA@mpei.ru,
С.В. Белоусов, BelousovSV@mpei.ru,
Н.А. Лебедева, LebedevaNA@mpei.ru
НИУ «МЭИ», г. Москва*

К ВОПРОСУ ОБ УТОЧНЕНИИ КРИТЕРИЯ ЛАВИННО-СТРИМЕРНЫХ ПЕРЕХОДОВ В ВОЗДУХЕ

Электронная лавина (ЭЛ) – компактная группа свободных электронов, дрейфующих в газе в электрическом поле (ЭП) и совершающих на своём пути ударную ионизацию газа [1]. Она оставляет в разрядном промежутке (РП) след из положительных и отрицательных ионов.

По мере развития ЭЛ число электронов в ней и ионов в её следе возрастает. Напряжённость ЭП E перед лавиной и за следом растёт, а между ними снижается по сравнению с напряжённостью внешнего поля $E_{\text{вн}}$. В ослабленном поле замедляется наработка свободных электронов. Оставшиеся здесь электроны смешиваются с ионами следа, возникает плазма и начинается формирование стримера – нетермоионизованного плазменного канала с избыточным зарядом в его головной части, который удлиняется за счёт ударной ионизации газа в её окрестностях [1].

Преобразование ЭЛ в стример называется лавинно-стримерным переходом (ЛСП), а её параметры в момент перехода – критическими. Прежде всего, это число электронов $n_{\text{екр}}$ в лавине в момент перехода.

Головные части стримеров являются источниками сильного ЭП. В нём образуются химически активные частицы (радикалы), участвующие затем в химических реакциях в воздушной среде. Это позволяет использовать стримерный разряд в промышленных [2], природоохранных [1] и медицинских [3] высоковольтных электро-технологиях (ВВЭТ). В ряде областей техники и электрофизики высоких напряжений (ТЭВН) появление стримеров, наоборот,

недопустимо. Это относится, например, к молниезащите наземных взрывоопасных объектов [4]. Поэтому в ней нельзя создавать условия, способствующие появлению стримеров.

Следовательно, для решения ряда задач ВВЭТ и ТЭВН необходимо знать условия, при которых происходит ЛСП. Их называют критерием ЛСП [1]. В соответствии с данными выше определениями ЭЛ и стримера, он состоит в появлении плазменной области между лавиной и её следом. Его проверка не вызывает затруднений при численном моделировании [5], но проблематична в рамках приближённых аналитических моделей [1]. В них используется упрощённый критерий, требующий сопоставимости напряжённости собственного ЭП лавины и следа с напряжённостью $E_{вн}$ внешнего поля, где она развивается. Его применимость обосновывают тем, что при их сопоставимости заметно ослабляется поле между ЭЛ и следом, и начинается формирование стримера. Понятие сопоставимости полей по-разному количественно интерпретируется различными авторами [1].

Ранее авторы определили критические числа электронов в лавинах в зависимости от $E_{вн}$ [6], исследовали развитие ЛСП [7]. Ниже будет оценено искажение внешнего ЭП полем ЭЛ и её следа, сделаны выводы о возможности строгой количественной оценки понятия сопоставимости этих полей. Расчёты сделаны в рамках физико-математической модели ЛСП, предложенной на кафедре ТЭВН НИУ «МЭИ» [8].

В качестве характерного примера ниже представлены результаты моделирования ЛСП в воздушном РП длиной $D = 0,4$ см с однородным ЭП с напряжённостью $E_{вн} = (40...65) \cdot 10^3$ В/см при нормальных атмосферных условиях. Потенциал нижнего электрода (анода, рис. 1,а) составлял $f = U > 0$. Здесь $U = DE_{вн}$ – напряжение, приложенное к РП в начальный момент времени $t = 0$, и в дальнейшем неизменное. Верхний электрод (катод) заземлён, т.е. $f = 0$. Таким образом, вектор $E_{вн}$ напряжённости ЭП, в котором развивались лавины, направлен вертикально вверх от анода к катоду вдоль координат-

ной оси Oz декартовой системы. Её начало O помещено на поверхность анода. ЭЛ распространялись от катода к аноду, т.е. в направлении, противоположном вектору $E_{вн}$ и оси Oz .

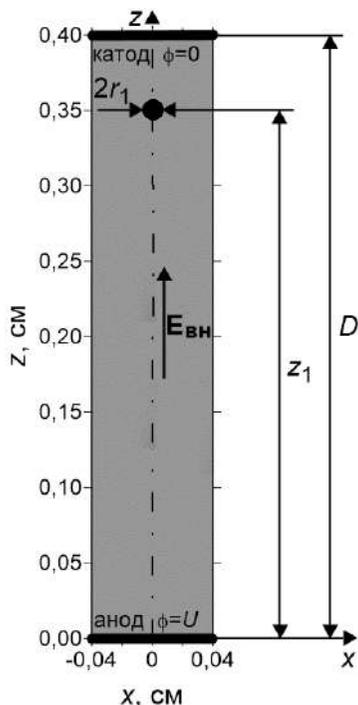


Рис. 1. Параметры начальных условий расчёта ЛСП в однородном РП

Сделано допущение, что формирование лавины начинается в момент $t = 0$ с малой неоднородности в распределении электронов. Её центр помещён на ось Oz на высоте z_1 над анодом (рис. 1). Максимальная концентрация электронов N_{max1} достигается в её центре, убывая по мере удаления от него по закону $N(r) = N_{max1} \exp[-(r/r_1)^2]$, где r – расстояние от центра неоднородности до текущей точки РП, r_1 и z_1 – параметры модели. Также в начальный момент в воздухе РП присутствуют положительные и отрицательные ионы в равных концентрациях N_0 . Здесь, в качестве примера, принято $N_{max1} = 10^8 \text{ см}^{-3}$, $r_1 = 0,007 \text{ см}$, $z_1 = 0,3$ и $0,35 \text{ см}$, $N_0 = 10^3 \text{ см}^{-3}$.

На рисунке 2 приведена зависимость $E(z)$ на оси Oz РП в ЭЛ в момент ЛСП при $E_{вн} = 45 \cdot 10^3$ В/см и $z_1 = 0,35$ см. В данном случае напряжённость ЭП E между лавиной и её следом уменьшается с $E_{вн}$ до $E_{\min} = 38 \cdot 10^3$ В/см, т.е. примерно на 15,5%. Следовательно, действительно можно говорить о сопоставимости напряжённости поля ЭЛ с $E_{вн}$ (если, например, понимать под ней уменьшение суммарной напряжённости на 10% относительно $E_{вн}$).

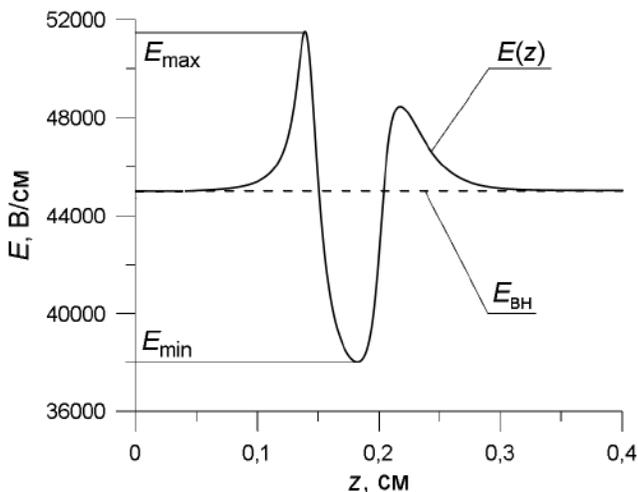


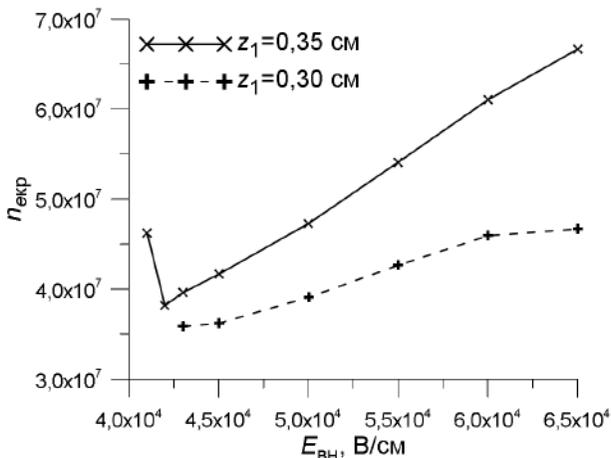
Рис. 2. Распределение напряжённости ЭП E вдоль координатной оси Oz в момент ЛСП при $E_{вн}=45 \cdot 10^3$ В/см, $r_1=0,007$ см и $z_1=0,35$ см

Для количественной оценки сопоставимости ЭП зарядов ЭЛ и её следа со значением $E_{вн}$ был введён параметр

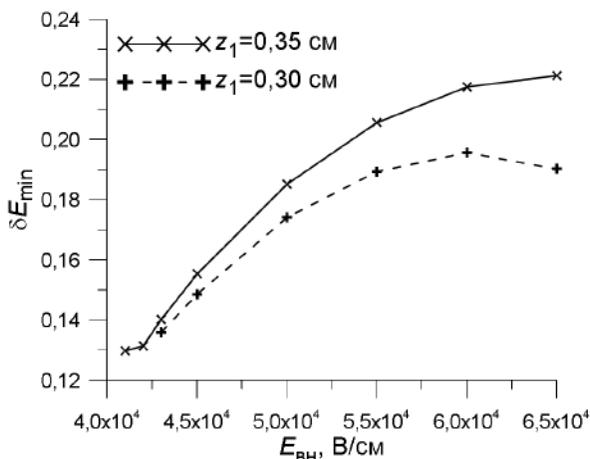
$$dE_{\min}(E_{вн})=(E_{вн}-E_{\min})/E_{вн},$$

являющийся функцией $E_{вн}$. Здесь E_{\min} – минимальная напряжённость ЭП между лавиной и следом.

Рисунок 3 иллюстрирует расчётные зависимости $n_{\text{кр}}(E_{вн})$ и $dE_{\min}(E_{вн})$ при $E_{вн} = (41 \dots 65) \cdot 10^3$ В/см для $z_1 = 0,3$ и $0,35$ см.



а



б

Рис. 3. Зависимости $n_{кр}$ (а) и δE_{min} (б) от $E_{вн}$ при $r_1 = 0,007$ см, $z_1 = 0,3$ и $0,35$ см

Из рисунка 3,а видно, что расчётные значения $n_{кр}$ лежат в пределах $(3,6 \dots 6,7) \cdot 10^7$, что соответствует результатам [6] для более коротких РП. Рис. 3,б иллюстрирует ослабление суммарного ЭП по сравнению с внешним. Минимальная напряжённость поля

E_{\min} между лавиной и следом уменьшается по отношению к $E_{\text{вн}}$ тем сильнее, чем больше значения $E_{\text{вн}}$ и z_1 . Например, при $E_{\text{вн}} = 43$ кВ/см значения dE_{\min} составляют 0,13 и 0,136 при $z_1 = 0,3$ и $0,35$ см, и приближение к катоду начальной неоднородности в распределении электронов на 0,05 см привело к дополнительному уменьшению значения E_{\min} на 4,6%. При $E_{\text{вн}} = 60$ кВ/см соответствующие значения $dE_{\min} = 0,196$ и $0,218$, т.е. приближение начальной неоднородности к катоду ведёт к уменьшению E_{\min} на 11,2%. Само увеличение $E_{\text{вн}}$ с 43 до 60 кВ/см, т.е. в 1,395 раза, дало прирост dE_{\min} в 1,508...1,603 раза.

Таким образом, сложно определить количественно понятие сопоставимости ЭП зарядов лавины и её следа с внешним полем из-за сильной зависимости напряжённости первого от значения $E_{\text{вн}}$.

Литература

1. **Электрофизические** основы техники высоких напряжений: учеб. / И.М. Бортник 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. Том 6. № 1. С. 5–17.

4. **Гундарева С.В., Калугина И.Е., Темников А.Г.** Об особенностях методики расчёта поражаемости наземных взрывоопасных объектов молнией // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. № 8. С. 156–158.

5. **Белогловский А.А., Белоусов С.В.** Анализ накопления объемного заряда при лавинно-стримерных переходах в воздухе в сильных однородных электрических полях // Электричество. 2020. № 4. С. 10–15.

6. 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.

7. 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.

8. Белогловский А.А., Ильина Ю.Г. Численный расчёт критических параметров электронной лавины в воздухе // Фёдоровские чтения – 2015. XLV Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. С. 166–170.

*М.А. Бухтилова, BukhtilovaMA@mpei.ru,
А.А. Белогловский, BeloglovskyAA@mpei.ru,
Е.М. Тимофеев, TimofeevYM@mpei.ru,
Т.П. Тарасова, LopasovaTP@mpei.ru
НИУ «МЭИ», Москва*

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ОГРАНИЧЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ПЕРСОНАЛ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Одной из задач энергетики является ограничение воздействия электрических полей (ЭП) промышленной частоты (ПЧ) на организм человека. Наиболее заметно они влияют на персонал объектов энергетики, поскольку он должен пребывать в них на протяжении всего рабочего дня.

Согласно [1] предельно допустимый уровень напряженности составляет 25 кВ/м. Пребывание в более сильных полях без средств защиты не допускается. Допустимое время T пребывания человека в ЭП с напряженностью от 5 до 20 кВ/м вычисляют в часах по формуле [1, 2]:

$$T = 50/E - 2, \quad (1)$$

где E – напряженность воздействующего ЭП в контролируемой зоне, кВ/м.

Для ограничения воздействия ЭП ПЧ на персонал прибегают к ряду организационных и технических мер. Одно из эффективных технических решений – установка тросовых электростатических экранов. Это заземленная проводящая конструкция из параллельных друг другу тросов, подвешенных на некоторой высоте над землей. Внешнее поле индуцирует на них заряд того же знака, что и на поверхности земли, и под экраном ЭП ослабляется по сравнению с внешним.

Возникает инженерная задача регулирования ЭП: минимизировать напряженность ЭП в области пребывания персонала при помощи тросовых электростатических экранов, изменяя их радиус, высоту подвеса и расстояния между ними. Такие задачи называются задачами математической оптимизации и в общем виде формулируются так [3]:

$$\begin{cases} f(X) \rightarrow \min(\max), \\ g_j(X) \geq 0, j = 1, 2, \dots, M, \\ X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_N \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (2)$$

где необходимо отыскать наибольшее или наименьшее значение целевой функции f в расчётной области, заданной системой ограничений. В (2) X – вектор искомых переменных x_1, x_2, \dots, x_N .

Интересующая нас задача не имеет ограничений для поиска минимума напряженности ЭП в области определения целевой функции. Такие задачи называются задачами безусловной математической оптимизации [3]:

$$\begin{cases} f(X) \rightarrow \min(\max), \\ X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_N \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (3)$$

В качестве примера рассмотрим системы электростатических экранов, состоящих из 2, 3, 4, 5 и 6 тросов (рис. 1). Напряженность поля E_M в расчетной точке M под экраном есть функция радиуса R тросов, высоты h их подвеса, расстояния d между ними, напряженности внешнего ЭП E_0 и высоты h_0 расположения расчетной точки M . Пространство над землей заполнено воздухом, чья относительная диэлектрическая проницаемость равна $\varepsilon \approx 1$.

Величина h_0 определяется не конфигурацией экрана, а Сан-ПиН [2], R – номенклатурой тросов, h – условиями безопасного проезда транспорта, а значение E_0 – источниками поля. Таким образом, оптимизировать напряженность поля E_M в расчетной точке M можно лишь за счет выбора расстояния d между тросами.

Поэтому в (3) получим целевую функцию $f(X)=E_M(d)$, и будем рассматривать задачу минимизации функции $E_M(d)$ в системе тросовых электростатических экранов:

$$E_M(d) \rightarrow \min. \quad (4)$$

Решение такого рода инженерных задач сложно получить аналитически [1]. Поэтому для решения задачи (4) воспользуемся численным методом Ньютона 2-го порядка [3]. Для вычисления функции $E_M(d)$ применён известный метод эквивалентных зарядов [1].

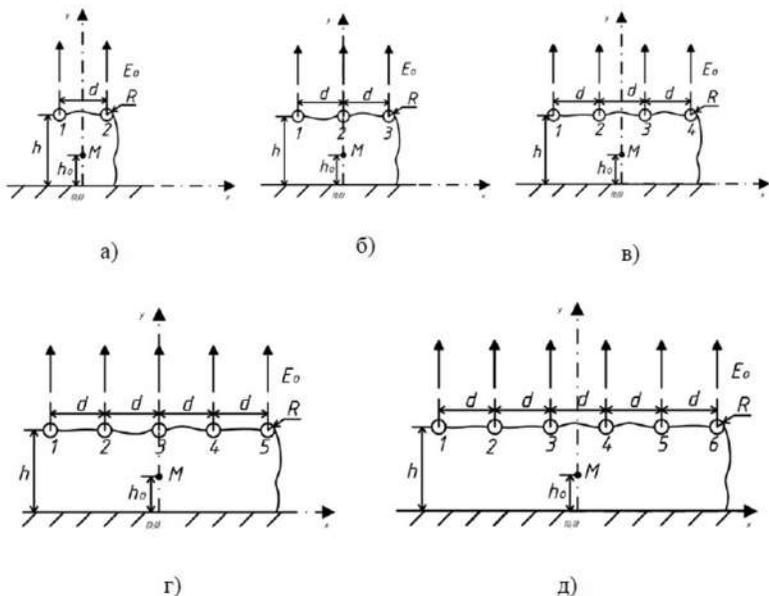


Рис. 1. Расчётные модели системы тросовых электростатических экранов, состоящих из 2 тросов (а), 3 тросов (б), 4 тросов (в), 5 тросов (г), 6 тросов (д)

Результаты минимизации значения E_M напряжённости ЭП в точке М. Были вычислены оптимальные значения $d_{\text{опт}}$ расстояний между тросами d и напряженности поля $E_M(d)$ в расчётной точке M , которая находится на высоте $h_0 = 1,8$ м, для экранов, состоящих из 2, 3, 4, 5, 6 тросов, $R = 0,005, 0,0065$ и $0,008$ м, $h = 4$ м, $E_0 = 20$ кВ/м. Полученные данные сведены в табл. 1.

Для того, чтобы наглядно сравнить рассчитанные выше оптимальные значения расстояний между тросами d была построена общая зависимость минимальных значений напряженности поля $E_M(d)$ в расчётной точке M от оптимальных расстояний между тросами d , которая представлена на рис. 2. Чем меньше расстояние между тросовыми экранами d , тем меньше напряженность поля $E_M(d)$ в расчётной точке M .

**Результаты расчёта минимальной напряженности
поля $E_M(d)$ в расчётной точке M
и оптимальных расстояний между тросами d**

N , шт		2	3	4	5	6
$R = 0,005$ м	E_{\min} , кВ/м	9,771	7,673	6,264	5,257	4,505
	d_{opt} , м	1,204	1,026	0,895	0,798	0,721
$R = 0,0065$ м	E_{\min} , кВ/м	9,473	7,374	5,978	4,989	4,255
	d_{opt} , м	1,223	1,042	0,909	0,809	0,732
$R = 0,008$ м	E_{\min} , кВ/м	9,225	7,127	5,743	4,769	4,051
	d_{opt} , м	1,239	1,056	0,921	0,819	0,740

Согласно [2] допустимое время пребывания в ЭП напряженностью от 5 до 20 кВ/м включительно вычисляются по формуле (1). Следовательно, при 8-часовом рабочем дне напряженность поля не должна превышать 5 кВ/м. Исходя из рис. 2, это выполняется при расстояниях d между тросами:

- менее 0,765 м для радиусов тросов $R = 0,005$ м;
- менее 0,81 м для $R = 0,0065$ м;
- менее 0,81 м для $R = 0,008$ м.

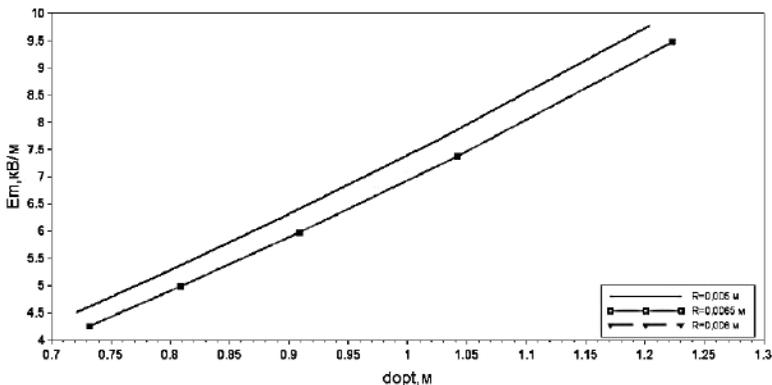


Рис. 2. Зависимость минимальной напряженности поля $E_M(d)$ от оптимальных расстояний между тросами d_{opt}

Рассмотрим, как меняется минимальная напряженность E_M ЭП в точке M и оптимальные расстояния между тросами $d_{\text{опт}}$ в зависимости от количества тросов N (рис. 3 и 4).

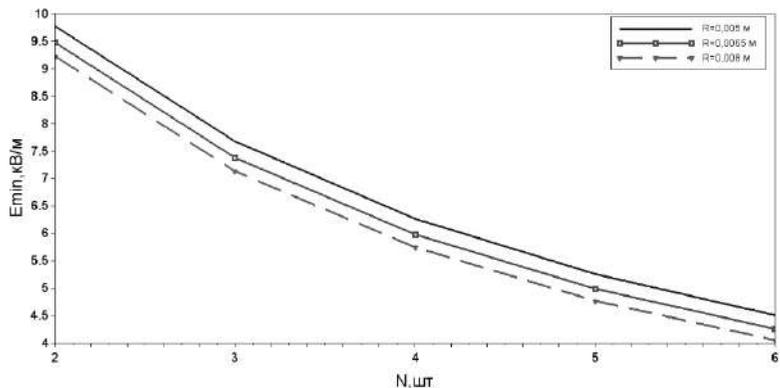


Рис. 3. Зависимости минимальной напряженности поля E_M от количества тросов N

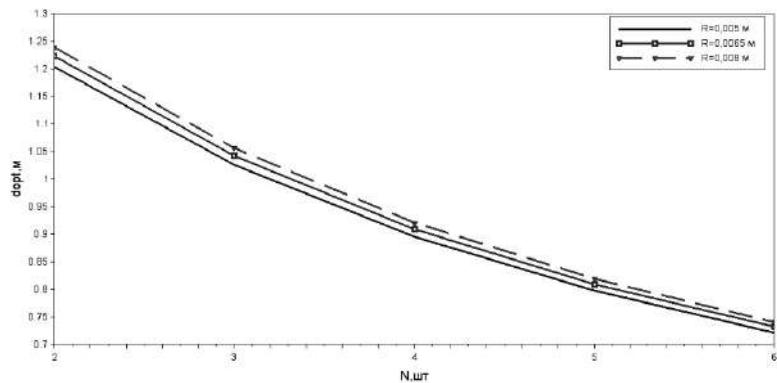


Рис. 4. Зависимости оптимальных расстояний между тросами d от количества тросов N

Исходя из рис. 2, напряженность ЭП, равная 5 кВ/м, достигается при использовании экранов, состоящих из:

- 6 тросов, радиус которых 0,005 м;
- 5 тросов, радиус которых 0,0065 м;
- 5 тросов, радиус которых 0,008 м.

Опираясь на значения $d_{\text{орт}}$, полученные из рис. 2, можно по рис. 4 определить, при каком числе тросов они достигаются:

- при 6 тросах для d менее 0,765 м, радиусов тросов $R = 0,005$ м;
- при 5 тросах для d менее 0,81 м, радиусов тросов $R = 0,0065$ м;
- при 5 тросах для d менее 0,81 м, радиусов тросов $R = 0,008$ м.

Для наглядности полученные результаты сведены в табл. 2.

Таблица 2

**Оптимальные параметры тросовых
электростатических экранов,
учитывающие условия СанПиН [2]**

E , кВ/м	R , м	d , м	N , шт
5	0,005	Менее 0,765	6
5	0,0065	Менее 0,81	5
5	0,008	Менее 0,81	5

Вывод. Для того, чтобы напряженность ЭП не превышала 5 кВ/м в течение всего рабочего дня (8 часов), необходима установка тросовых экранов:

- состоящих из 6 тросов радиусом 0,005 м, при d не более 0,765 м;
- состоящих из 5 тросов радиусом 0,0065 м, при d не более 0,81 м;
- состоящих из 5 тросов радиусом 0,008 м, при d не более 0,81 м.

Литература

1. **Колечицкий Е.С., Романов В.А., Каргашев В.Г.** Защита биосферы от влияния электромагнитных полей: учеб. пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

2. **СанПин 1.2.3685-21.** Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573500115>.

3. **Белогловский А.А., Калугина И.Е.** Основы применения методов математического программирования в электроэнергетике: метод. руководство. М.: Издательство МЭИ, 2017.

*Ю.Ю. Захаров, ZakharovYY@mpei.ru,
Д.В. Мухеев, MikheevDV@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва*

АНАЛИЗ ПЕРВИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ КОАКСИАЛЬНОЙ ЛИНИИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Передача электроэнергии на дальнее расстояние потребителю малой мощности является острой и актуальной проблемой. Мощность таких потребителей (например, жилой дом, станции и посты гидрометеорологической службы, сотовые вышки связи, геологоразведочные и горнодобывающие объекты, охотничьи хозяйства, туристические комплексы, некоторые военные объекты и т.д.), как правило, не превышает 30 кВт. При этом они располагаются на большом расстоянии от централизованных источников электроэнергии и вынуждены использовать автономные источники (бензиновые и дизельные генераторы, возобновляемые источники энергии) [1]. Эта вынужденная мера существенно увеличивает затраты потребителя на закупку и доставку топлива на место локации,

а также обслуживание систем постоянного тока и др. Кроме того, многие государственные и частные проекты с потребителями малой мощности не могут быть реализованы ввиду неудовлетворительных показателей экономической эффективности.

В основном, к увеличению капиталовложений в проект с потребителями малой мощности, удаленными от централизованного источника, приводит строительство воздушных линий (ВЛ) электропередачи и применение высоковольтных повышающих трансформаторов. Максимальная длина строительства ВЛ определяется в зависимости от следующих показателей: потери напряжения в конце линии; минимальное сечение по экономической плотности; минимальное сечение по механической прочности; минимальное сечение по термической стойкости; установленная мощность. Увеличить протяженность ВЛ возможно с помощью увеличения сечения проводников или за счет повышения класса напряжения ВЛ. Однако строительство высоковольтных ВЛ (например, 10 кВ) при малом коэффициенте загрузки нецелесообразно с экономической точки зрения, также как и увеличение сечения проводников.

Определим зависимость максимальной длины строительства ВЛ промышленной частоты ($f_{\text{ном}} = 50$ Гц) от мощности электроприемника (ЭП) согласно стандарта номинальных напряжений, принятых в Российской Федерации, по формуле [2]:

$$l_m = \frac{\gamma \cdot F \cdot U_n \cdot \Delta U_m}{P_n} \text{ (км)}, \quad (1)$$

где γ – удельная проводимость материала провода, м/Ом·мм²; F – сечение провода, мм²; U_n – номинальное напряжение ВЛ, кВ; ΔU_m – максимальное отклонение напряжения, кВ; P_n – номинальная мощность ЭП, кВт.

Согласно «Правилам устройства электроустановок», ГОСТ 32144-2013 и ГОСТ 33073-2014 для силовых сетей электроснабжения отклонение напряжения от номинального значения в конце ВЛ должно составлять $\pm 5\%$. Для расчетов используем самый распространенный неизолированный провод со стальным сердечником и алюминиевыми проволоками. Сведем полученные данные в табл. 1.

**Максимальная длина строительства ВЛ
промышленной частоты, км**

P_n , кВт	5	10	15	20	40	60	80	100	U_n , кВ
$F = 10 \text{ мм}^2$									
l_{max} , км	0.51	0.26	0.17	0.13	-	-	-	-	0.4
	116	58	39	29	14	10	7	6	6
	322	161	107	81	40	27	20	16	10
$F = 16 \text{ мм}^2$									
l_{max} , км	0.82	0.41	0.28	0.21	0.1	-	-	-	0.4
	185	93	62	46	23	15	12	9	6
	515	257	171	129	64	43	32	26	10
$F = 25 \text{ мм}^2$									
l_{max} , км	1.29	0.64	0.43	0.32	0.16	-	-	-	0.4
	290	145	97	72	36	24	18	14	6
	805	402	268	201	101	67	50	40	10
$F = 35 \text{ мм}^2$									
l_{max} , км	1.80	0.90	0.60	0.45	0.23	0.15	-	-	0.4
	406	203	135	101	51	34	25	20	6
	1127	563	375	282	141	94	70	56	10

Из таблицы видно, что при большем сечении проводника увеличивается максимальная длина строительства ВЛ, а передача электроэнергии на несколько километров для ЭП малой мощности (5–60 кВт) на напряжении 0.4 кВ является нереализуемой задачей. Кроме того, использование большего сечения проводника должно обосновываться экономической плотностью тока. Как показывает проведенный анализ, для большинства ЭП малой мощности, находящихся в значительном удалении (десятки километров) от централизованной системы электроснабжения, строительство ВЛ экономически нецелесообразно.

Перспективным направлением по разрешению сложившейся ситуации для многих удаленных потребителей малой мощности может являться использование систем электроснабжения на

повышенной частоте ($f > f_{\text{ном}}$). Однако процесс передачи электроэнергии на повышенной частоте отличается от аналогичного процесса в системах промышленной частоты.

Распределение тока повышенной частоты по сечению проводника зависит от расположения проводников относительно друг друга, что обусловлено эффектом близости [3–5]. Если ток повышенной частоты в двух соседних проводниках проходит в разных направлениях, то его распределение и концентрация соответствуют рис. 1,а, в противоположном случае – рис. 1,б. Данный эффект будет наблюдаться независимо от формы сечения и конфигурации проводников при прохождении тока повышенной частоты.

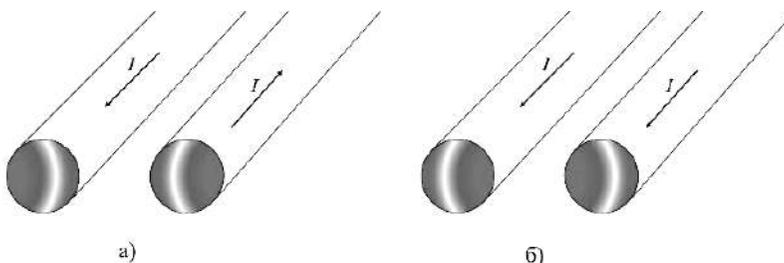


Рис. 1. Распределение переменного тока повышенной частоты по сечению проводников:

а – разнонаправленные токи; б – одинаправленные тока

Из всех известных конфигураций проводников стоит выделить коаксиальное исполнение кабеля. Коаксиальный кабель состоит из двух концентрических проводников, расположенных соосно и изолированных друг от друга. Ток повышенной частоты, проходя по проводникам, разнонаправленно сосредотачивается на обращенных друг к другу поверхностях проводника. При этом распределение тока по площади сечения проводника происходит периферийно согласно поверхностному эффекту (рис. 2) [6–9]. Индуктивное сопротивление коаксиального кабеля много меньше индуктивных сопротивлений проводников и кабелей других конфигураций, что обусловлено минимальным расстоянием между

проводниками коаксиального кабеля и поверхностным эффектом. В этой связи данный тип кабеля является наиболее подходящим для дальнейшего анализа.

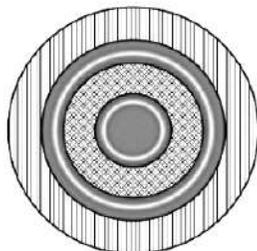


Рис. 2. Распределение тока повышенной частоты по сечению проводников коаксиального кабеля

Коаксиальная линия повышенной частоты (КЛПЧ) характеризуется следующими первичными параметрами: R_0 – сопротивление прямого и обратного проводников на единицу длины; L_0 – индуктивность петли линии на единицу длины; C_0 – емкость между проводниками на единицу длины; G_0 – активная проводимость изоляции между проводниками на единицу протяжения проводников. Эквивалентная схема замещения участка КЛПЧ изображена на рис. 3.

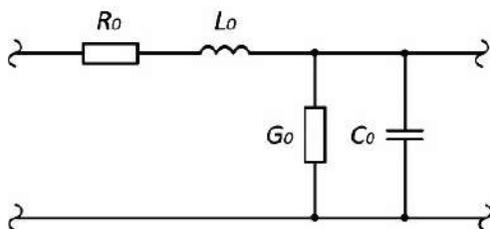


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения участка КЛПЧ

Зависимость первичных параметров КЛПЧ от частоты представлена на рис. 4. Видно, что с увеличением частоты переменного тока сопротивление и проводимость изоляции КЛПЧ возрастают, а индуктивность уменьшается. Емкость между проводниками не зависит от частоты.

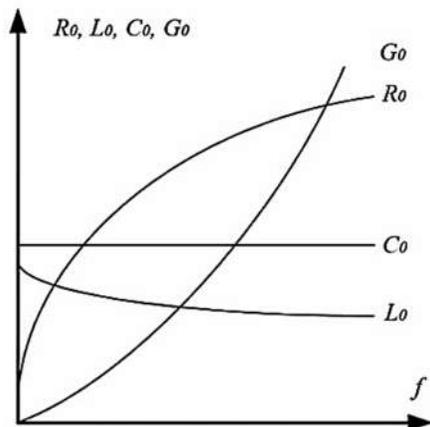


Рис. 4. Зависимость первичных параметров КЛПЧ от частоты переменного тока

Учет коаксиальной конфигурации проводников и использование повышенной частоты требует уточнения представленной модели КЛПЧ (рис. 3). При построении уточненной эквивалентной схемы замещения необходимо учитывать сопротивление прямого R_1 и обратного R_2 проводников, индуктивность прямого L_1 и обратного L_2 проводников, межпроводниковую индуктивность L_B , емкость между проводниками C_0 и активную проводимость изоляции между проводниками G_0 (рис. 5) [10].

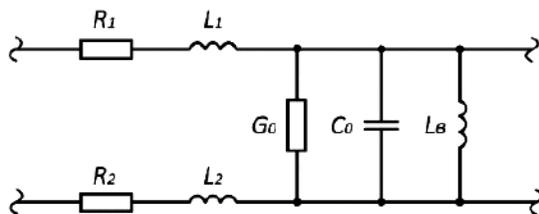


Рис. 5. Уточненная эквивалентная схема замещения участка КЛПЧ

В ходе анализа было рассмотрено два варианта реализации передачи электроэнергии по КЛПЧ. В первом варианте (рис. 6) к выводам вторичной обмотки трансформатора повышенной ча-

стоты (ТПЧ1) источника питания (ИП) подключается два проводника КЛПЧ, один из выводов трансформатора заземлен. На другом конце КЛПЧ к вторичной обмотке ТПЧ2 электропотребителя подключен один проводник, второй проводник остается изолированным, один из выводов трансформатора ТПЧ2 заземлен.

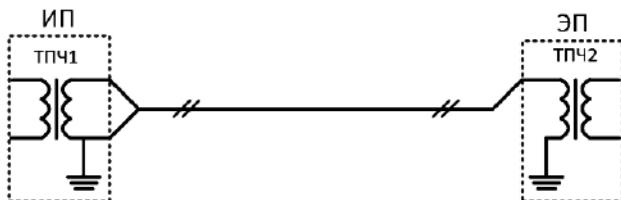


Рис. 6. Первый вариант реализации КЛПЧ

Первый вариант реализации КЛПЧ подразумевает применение однопроводной линии электропередачи, где обратным проводником служит земля. При этом внешний проводник КЛПЧ заземлен и является защитным проводником от поражения электрическим током. Внешний проводник экранирует внутренний проводник, следовательно, такая система проводников, строго говоря, образует конденсатор. Емкость конденсатора является емкостью между его обкладками (проводниками), т.е. емкостью между проводниками на единицу длины C_0 . Данная емкость не зависит от наличия каких-либо иных проводников, расположенных вне экранирующего проводника. Преимуществом первого варианта реализации КЛПЧ являются стабильные первичные параметры независимо от высоты подвеса линии, недостатком – пониженный КПД передачи электроэнергии по КЛПЧ вследствие большого сопротивления обратного проводника.

Во втором варианте реализации КЛПЧ (рис. 7) к выводам вторичной обмотки ТПЧ1 источника питания ИП подключаются два проводника КЛПЧ, один из выводов трансформатора заземлен. На другом конце КЛПЧ к вторичной обмотке ТПЧ2 электропотребителя подключаются два проводника, один из выводов трансформатора заземлен.

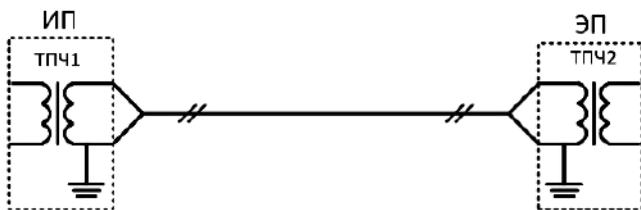


Рис. 7. Второй вариант реализации КЛПЧ

Второй вариант реализации КЛПЧ подразумевает применение двухпроводной линии электропередачи, при этом внешний проводник КЛПЧ считается нулевым рабочим проводником. Преимуществом этого варианта является повышенное КПД передачи электроэнергии по КЛПЧ вследствие малого сопротивления обратного проводника по сравнению с первым режимом работы, недостатком – изменение распределенных параметров КЛПЧ в зависимости от высоты подвеса.

В ходе анализа второго варианта реализации КЛПЧ (см. рис. 7) было выявлено, что при расчетах первичных параметров КЛПЧ, помимо емкости между проводниками C_0 , необходимо учитывать емкость системы провод–земля $C_{ПЗ}$, что представлено в уточненной эквивалентной схеме замещения КЛПЧ на рис. 8.

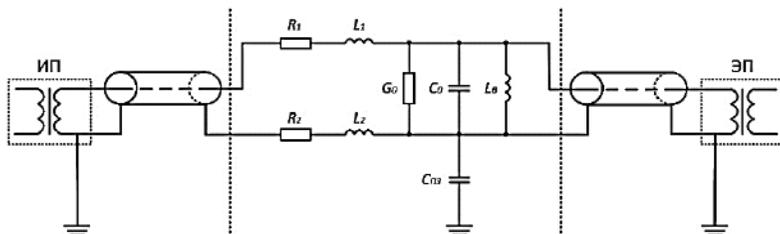


Рис. 8. Уточненная эквивалентная схема замещения участка КЛПЧ с учетом емкости системы провод–земля

Выводы. В работе представлены результаты анализа первичных параметров КЛПЧ, предназначенной для передачи электроэнергии удаленным потребителям малой мощности. Установлена и

представлена зависимость первичных параметров коаксиальной линии от частоты. Представлены варианты реализации КЛПЧ в однопроводном и двухпроводном исполнениях. Предложена уточненная эквивалентная схема замещения КЛПЧ с учетом емкости системы провод–земля.

Литература

1. **Суржикова О.А.** Региональные энергетические программы и электроснабжение удаленных, малонаселенных поселений // Инженерные науки. 2014. № 4 (14). С. 85–89.

2. **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. Москва: Издательский дом МЭИ, 2021. С. 299–305.

3. **Захаров Ю.Ю., Лепешкин А.Р.** Исследование распределений тока повышенной частоты при различной конфигурации проводников линии передачи // Промышленная энергетика. 2022. № 9. С. 2–11.

4. **Jabłoński P., Szczegielniak T., Kusiak D., and Piątek Z.** Analytical-Numerical Solution for the Skin and Proximity Effects in Two Parallel Round Conductors // Energies. 2019. doi:10.3390/en12183584.

5. **Jabłoński P., Kusiak D., Szczegielniak T.** Analytical-Numerical Approach to the Skin and Proximity Effect in Lines with Round Parallel Wires // Energies. 2020. Vol. 13. Article № 6716. doi:10.3390/en13246716.

6. **Захаров Ю.Ю., Лепешкин А.Р.** Исследование коаксиальной линии электропередачи в электромагнитном поле повышенной частоты // Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования): XXIX Международная конференция: материалы. М.: НИУ "МЭИ", 2021. С. 131–135.

7. **Захаров Ю.Ю.** Исследование коаксиальной линии электропередачи повышенной частоты для электроснабжения потребителей малой мощности // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тезисы докладов Двадцать восьмой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. М.: Центр полиграфических услуг «РАДУГА», 2022. С. 312.

8. **Сухичев М.И., Скочко Е.М.** К вопросу о необходимости учета скин-эффекта для сталеалюминиевых проводов // Промышленная энергетика, 2022. № 1. С. 2–8.

9. **Brandao Faria J.A.** Skin Effect in Inhomogeneous Euler-Cauchy Tubular Conductors // Progress in Electromagnetics Research. 2011. Vol. 18. pp. 89-101. doi: 10.2528/PIERM11030905.

10. **Захаров Ю.Ю., Лепешкин А.Р.** Исследование передачи электроэнергии потребителю малой мощности по коаксиальной воздушной линии повышенной частоты // Промышленная энергетика. 2023. № 1. С. 2–11.

*В. К. Латушкина, LatushkinaVK@mpei.ru,
М. А. Рашевская, RashevskyaMA@mpei.ru,
НИУ “МЭИ”, г. Москва*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ ЗАВОДА

Доля осветительных установок в общем потреблении электроэнергии достаточно высока – по некоторым данным составляет до 20 %. Проектирование освещения является неотъемлемой частью разработки системы электроснабжения как предприятий, так и административно-общественных зданий.

При проектировании осветительных установок можно выделить две задачи – светотехнический и электрический расчеты. В первой определяются необходимые светотехнические

параметры, такие как освещенность рабочей области, определяемая на основании нормативных документов [1, 2], вид источника света и световой поток, необходимое количество источников света. В электротехнической части проекта определяют необходимую мощность на освещение, выбирают сечения проводников и схему сети, а также аппараты.

Светотехническую часть проекта помогают выполнить прикладные программы. Например, DIALux – программа, необходимая для выполнения светотехнических расчетов, разработки и планирования дизайна освещения, инженерного расчета внутренней и внешней системы освещения.

Светотехнический расчет. Завод маслоочистительных машин состоит из 13 зданий, которые являются потребителями 2 и 3 категории. В работе рассматривалось освещение территории предприятия: проведено сравнение освещенности, рассчитанной в программе DIALux, при различных конструктивных параметрах (расстояние между опорами и высота подвеса светильников).

Для проведения расчетов освещения в программе DIALux были выделены следующие этапы:

1. Разметка дорог на предприятии в программе NanoCAD Стройплощадка.
2. Определение необходимой освещенности.
3. Выбор светильников.
4. Расчет нормируемой высоты опор и расстояния между опорами в программе DIALux .
5. Дизайн расстановки светильников.

Из правил градостроительного проектирования [1], в зависимости от расчетной скорости, были выбраны следующие категории дорог: основные дороги для промышленных предприятий, второстепенные, пешеходные дороги. Проект расположения дорог выполнен в программе NanoCAD Стройплощадка, а затем создана 3D модель в программе DIALux с учетом разных покрытий и толщины дорожного полотна.

Для каждой из категорий дорог из свода правил [2] была определена необходимая освещенность. Расчет освещения производится только для дежурного и охранного освещения.

Для всего уличного освещения выбран один тип осветительных установок, фирмы iGuzzini illuminazione S.p.A Wow – 0 (данные приведены ниже). Светильник уличный, способен обеспечивать высокий уровень визуального комфорта (G4), предназначен для непосредственного использования светодиодных ламп, которые хорошо зарекомендовали себя ввиду малого энергопотребления, малого нагрева и сравнительно большого срока службы.

№ изделия	EC28
P, Вт	22,8
$\Phi_{\text{лампа}}$, ЛМ	3170
$\Phi_{\text{светильник}}$, ЛМ	3170
Коэффициент светоотдачи, %	100,0
$\epsilon_{\text{светоотдача}}$, лм/Вт	139,0
ССТ, К	3968
CRI	70

Расчет нормируемой высоты опор и расстояния между опорами производился в программе DIALux. Для расчета были выставлены параметры, приведенные в табл. 1 ($E_{\text{ср}}$ – средняя освещенность, лк; E_0 – равномерность освещенности в %). Рассматривается установка одного светильника на мачту. При этом для каждого типа дорог как входные параметры задаются: класс объекта по освещенности, нормируемая освещенность, высота световых точек подвеса светильников, максимальное и минимальное расстояние между опорами с размером шага. Начальные параметры для расчета выбираются по СП 52.13330.2016, таблица 7.11.

Начальные параметры для расчета

Параметр	Расстояние между мачтами	Высота световых точек	Класс объекта по освещению	$E_{ср}$, лк, не менее	E_0 , лк, не менее
Для основных дорог	Минимум: 15 м Максимум: 40 м Размер шага: 1 м	Минимум: 5 м Максимум: 15 м Размер шага: 0,5 м	П4	4	0,2
Для вспомогательных дорог	Минимум: 15 м Максимум: 40 м Размер шага: 1 м	Минимум: 5 м Максимум: 15 м Размер шага: 0,5 м	П5	2	0,1
Основные пешеходные улицы	Минимум: 15 м Максимум: 40 м Размер шага: 1 м	Минимум: 5 м Максимум: 15 м Размер шага: 0,5 м	П3	6	0,2

Для пешеходных улиц основных высота световых точек варьируется от 5 до 15 м. Расстояние между опорами от 15 до 40 м. Следовательно, все значения попали в диапазон исходных параметров. Зависимость высоты световых точек от расстояния между опорами приведена на рис. 1.

График на рис. 2 показывает минимальное среднее значение освещенности в зависимости от расстояния для различной высоты установки светильника (кривые показаны разным цветом). Освещенность достигается путем расположения опор на более близкое расстояние, и плавно убывает при увеличении расстояния.

Рисунок 3 показывает минимальное значение освещенности в отдельных точках, которое для данного типа пешеходных улиц нежелательно брать ниже 0,2 лк (СП 52.13330.2016), в зависимости от расстояния для различной высоты установки светильника. Чем больше расстояние между осветительными установками и ниже высота опор, тем ниже минимальная освещенность.

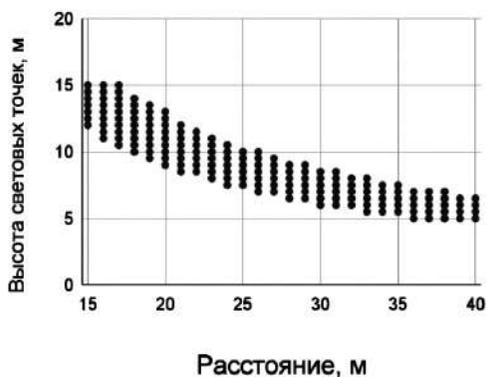


Рис. 1. Высота световых точек в зависимости расстояния между опорами

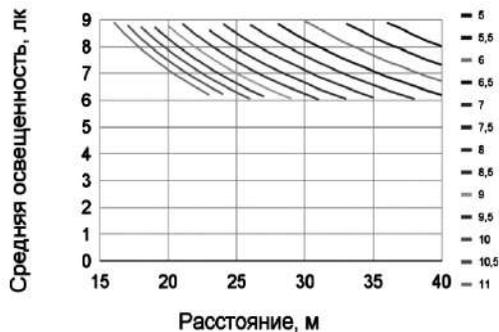


Рис. 2. Зависимость средней освещенности от расстояния между опорами при различной высоте подвеса светильников

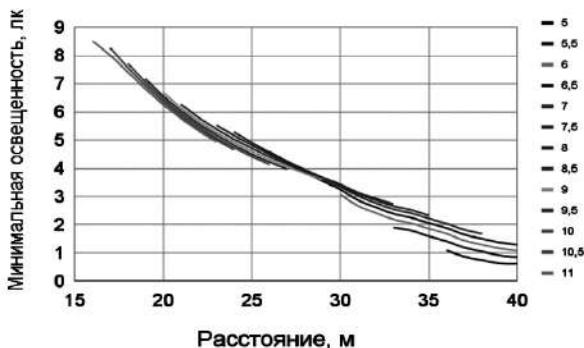


Рис. 3. Зависимость равномерности освещения от расстояния между опорами для различной высоты подвеса светильников

Таким образом, чем больше расстояние между осветительными установками и ниже высота опор, тем ниже стоимость сооружения осветительной системы. Поэтому для установки выберем высоту опоры 6 м, следовательно, расстояние составляет от 30 м до 40 м. Так как на предприятии всего 3 отдельных пешеходных дорожки разной длины, то расстояние между опорами будет варьироваться от 30 до 40 метров.

В итоге по технико-экономическим соображениям были выбраны следующие варианты.

Для дежурного освещения для освещения основных дорог: расстояние между опорами 30 м, высота подвеса 10 м. Для освещения второстепенных дорог: расстояние между опорами 30 м, высота подвеса 10 м (максимальное расстояние между опорами составило 40 м, но ввиду того, что на предприятии часто встречаются повороты второстепенных дорог, то было принято решение использовать расстояние между опорами 30 м, чтобы эффективно осветить дорожное полотно).

Для освещения пешеходных дорожек: расстояние между опорами 30 м, высота опор 6 м (по технико-экономическому расчету выгоднее использовать максимальное расстояние между

опорами 40 м и минимальную высоту подвеса 5 м. Вдоль пешеходных дорог на предприятии были расставлены лавочки, для которых желательно расставлять светильники ближе.)

Для охранного освещения: расстояние между опорами 35 м, высота опор 10 м (такое расположение дает необходимую освещенность, что обеспечивает эффективность наблюдения и охраны завода. При этом светильники расположены на одной стороне дороги и развернуты так, чтобы освещать внутреннюю территорию предприятия.)

На основе произведенных расчетов составим план расположения светильников. Так как области перекрестков дорог не были рассчитаны ранее, выделим эти участки и произведем расчет освещенности. По итогу расчетов необходимо поставить дополнительный светильник к каждому перекрестку, чтобы освещенность лежала в допустимых пределах.

При этом расстояние между опорами не превышает допустимых значений, полученных ранее. На одной опоре располагается по одному светильнику. 3D план расположения светильников построен с помощью программного комплекса DIALux (рис. 4).

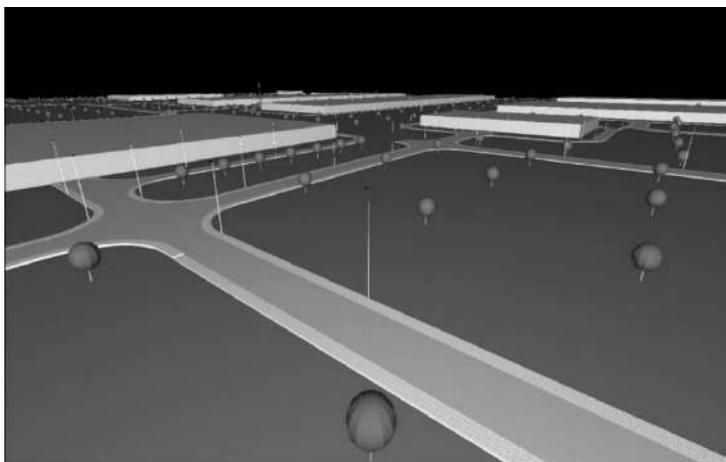


Рис. 4. Дизайн расстановки светильников в DIALux

Таким образом, на предприятии располагается 490 светильников и опор, световой поток которых составляет суммарно 1553300 лм, мощностью 11,17 кВт.

Заключение. Использование программных комплексов значительно облегчает работу проектировщика системы электрообеспечения, в частности, программа DIALux позволяет рассмотреть большое количество типов светильников и конфигураций осветительных сетей, и выбрать оптимальное решение. В допустимую нормативами область значений параметров, таких как высота подвеса светильников, расстояния между опорами и других, попадает большое количество вариантов сочетания этих параметров. Окончательное проектное решение требуется принимать исходя из экономических соображений, в качестве критерия используя минимум приведенных затрат.

Литература

1. **СП 396.1325800.2018.** Улицы и дороги населенных пунктов. Правила градостроительного проектирования. <https://docs.cntd.ru/document/552304870>
2. **СП 52.13330.2016.** Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* (rosavtodor.gov.ru)
3. **Проектирование и расчет систем электроснабжения объектов и электротехнических установок:** учебное пособие [Электронный ресурс] / Ю. Н. Дементьев [и др.]; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа энергетики. Томск: Изд-во ТПУ, 2019.
4. **Наумов И.В., Лещинская Т.Б., Бондаренко С.И.** Проектирование систем электроснабжения / Иркутск: Изд-во Иркутского государственного технического университета, 2012. 356 с.

*В.А. Сериков, Serikov.va@bk.ru,
Ю.А. Сычев, sychev_yura@mail.ru,
В.Н. Костин, kostin_vn@mail.ru.
Санкт-Петербургский горный университет*

АНАЛИЗ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТИПОВЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Актуальность работы. Нелинейная нагрузка является неотъемлемым элементом современных промышленных систем электроснабжения, а также основным источником высших гармоник, которые приводят к несоответствию уровня качества электрической энергии нормам отечественного и международных стандартов. Данная особенность характерна практически для всех отраслей промышленности.

Высшие гармоники тока и напряжения несут ряд негативных последствий для элементов систем электроснабжения, включая дополнительные потери в воздушных и кабельных линиях, силовых трансформаторах, сокращение срока службы электрооборудования, некорректную работу релейной защиты, дополнительную вибрацию в электромеханических системах.

В ряде работ отечественных и зарубежных ученых показано, что для повышения качества электроэнергии успешно применяется ряд технических средств, включая пассивные, активные, гибридные фильтры, антирезонансные дроссели, а также схемные решения по изменению конфигурации сети и силовой части нелинейной нагрузки [1–4]. Однако теория и практика применения указанных средств и решений не в полной мере учитывает наличие резонансных явлений, обусловленных конденсаторными установками компенсации реактивной мощности и питающими трансформаторами за счет присутствия нелинейной нагрузки. В резонансных режимах конденсаторы подвергаются недопустимой токовой перегрузке высшими гармониками, а активные фильтры могут работать

некорректно. Эти устройства, работая одновременно и реализуя свои функции, оказывают взаимное влияние друг на друга, характер которого должен учитываться при повышении качества электроэнергии в промышленных системах электроснабжения, а также при выборе структуры и основных параметров конденсаторных установок и активного фильтра.

Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения качества электроэнергии в промышленных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой при резонансных режимах с учетом совместной работы активных фильтрокомпенсирующих устройств и конденсаторных установок компенсации реактивной мощности с учетом их допустимой перегрузки токами высших гармоник.

Имитационная модель промышленной системы электроснабжения. Для анализа несинусоидальных режимов, возникающих в сетях с конденсаторными установками и нелинейной нагрузкой, разработана компьютерная имитационная модель промышленной системы электроснабжения, представленная на рис. 1, включающая силовой трансформатор 10/0,4 кВ, который питает нелинейную и линейную нагрузки и конденсаторную установку. Источник энергии – фазные синусоидальные напряжения U_1, U_2, U_3 ; трансформатор и линейная нагрузка – активно-индуктивные сопротивления $R_{1T}L_{1T}, R_{2T}L_{2T}, R_{3T}L_{3T}$, и $R_{1H}L_{1H}, R_{2H}L_{2H}, R_{3H}L_{3H}$ соответственно. Конденсаторная батарея – C_{1K}, C_{2K}, C_{3K} . Нелинейная нагрузка – трехфазный мостовой выпрямитель $D1-D6$ с нагрузкой R_d и сглаживающим дросселем L_d .

Имитационное моделирование приводилось для трансформатора номинальной мощностью $S_{Tном} = 1000$ кВА, при этом для дальнейшего обобщения все регулируемые мощности элементов (P_d^* – нелинейная нагрузка, S^* – линейная нагрузка, Q_K^* – мощность конденсаторов) представлялись в относительных единицах, за базисную величину принята номинальная мощность $S_{Tном}$ трансформатора. Поэтому полученные результаты моделирования качественно не будут отличаться для любого серийного трансформатора 10/0,4 кВ.

Результаты имитационного моделирования. В работе определены относительные мощности конденсаторных установок, при которых возникают резонансные явления, по выражению (1):

$$Q_k^* = \frac{100}{u_k[\%] \cdot n^2} \quad (1)$$

где $u_k[\%]$ – напряжение короткого замыкания силового трансформатора; n – номер ВГ, на частоте которой возникает резонансный режим.

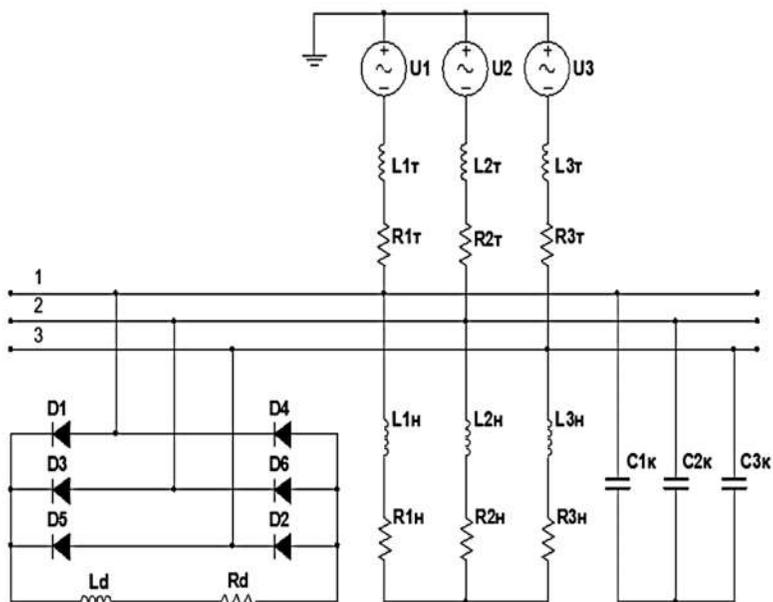


Рис. 1. Имитационная модель системы электроснабжения трансформатора 10/0,4 кВ

Установлено, что в резонансных и близких к ним режимах работы систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой коэффициент токовой перегрузки конденсаторов K_{OVL} может превышать допустимое значение, равное 1,3, а амплитуды высших гармоник тока, протекающие через конденсаторные установки, могут превышать амплитуду тока основной гармоники. Результаты моделирования показали минимальную возможность предотвращения перегрузки конденсаторных установок токами высших гармоник, поскольку в промышленных системах электроснабжения применяют ступенчатые регулируемые конденсаторы. При суточном изменении мощности конденсаторных установок резонансный режим может возникнуть на любой из ступеней регулирования реактивной мощности.

Произведена оценка суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения THD_U при наличии и отсутствии конденсаторных установок со ступенчатым регулированием реактивной мощности. Установлено, что работа конденсаторных установок в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой, особенно в режимах, близких к резонансному, существенно ухудшает качество напряжения.

В качестве примера, подтверждающий вышеизложенные результаты моделирования, на рис. 2 приведены осциллограммы сетевого напряжения, а также спектральный состав тока конденсаторной установки в межрезонансном режиме (см. рис. 2,а) и при резонансе на 11 гармонике (см. рис. 2,б). Параметры системы электроснабжения: $S_{\text{тном}} = 1000$ кВА; $P^*_d = 0,25$; $S^* = 0,4$; $\cos\varphi = 0,7$.

По рисунку 2 видно, что в резонансном режиме 11 гармоника тока, протекающая через конденсаторную установку, превышает ее основную гармонику тока, токовая перегрузка конденсаторов $K_{OVL} = 2$, что выше допустимого значения 1,3, а коэффициент несинусоидальности сетевого напряжения $THD_U = 15,6$ %, при допустимом значении 8%.

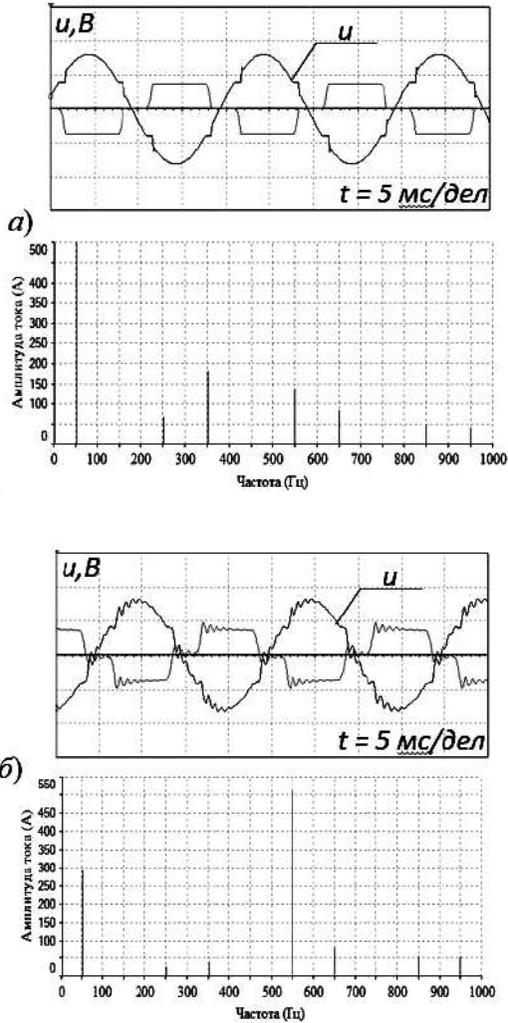


Рис. 2. Осциллограмма напряжения u на шинах узла нелинейной нагрузки и спектральный состав тока i через конденсаторы:

a – межрезонансный режим между 7-й и 11-й гармониками, $K_{OVL} = 1,1$, $THDU = 6,2 \%$; b – резонансный режим на 11-й гармонике, $K_{OVL} = 2$, $THDU = 15,6 \%$

Результаты имитационного моделирования, показывающие закономерности изменения коэффициентов THD_U и K_{OVL} в зависимости от величины нелинейной нагрузки и наличия резонансного режима сети, были подтверждены на физической модели лабораторной установки, состоящей из трансформатора 0,4/0,23 кВ мощностью $S_{\text{Тном}} = 19$ кВА, питающего нелинейную и линейную нагрузки и регулируемую конденсаторную установку. Источник питания установки имел уровень искажений $THD_U = 0,9\%$, что показывает незначительное влияние искажений напряжения со стороны питающей сети на полученные результаты.

Физическое моделирование показало, что, как и в имитационном моделировании, конденсаторные установки перегружены токами высших гармоник, качество напряжения ухудшается при совместной работе конденсаторов компенсации реактивной мощности и нелинейной нагрузки, а максимальные значения K_{OVL} и THD_U имели место при возникновении резонансного режима сети.

Таким образом, результаты имитационного моделирования могут быть применены для дальнейшего анализа сложных несинусоидальных режимов, которые могут протекать в типовых промышленных системах, на примере обогатительных фабрик и хвостовых хозяйств, приведенных на рис. 3. Приняты следующие обозначения элементов типовых схем систем электроснабжения: U – напряжение сети 6(10) кВ; U_1 – напряжение сети 35(110) кВ; T – трансформатор 6(10)/0,4 кВ; T_1 – трансформатор 35(110)/6 кВ; T_2 – трансформатор 6(10)/0,4 кВ, питающий нелинейную нагрузку; T_3 – трансформатор 35(110)/6 кВ с расщеплением вторичной обмотки; НН – нелинейная нагрузка; ЛН – линейная нагрузка; КУ – конденсаторная установка.

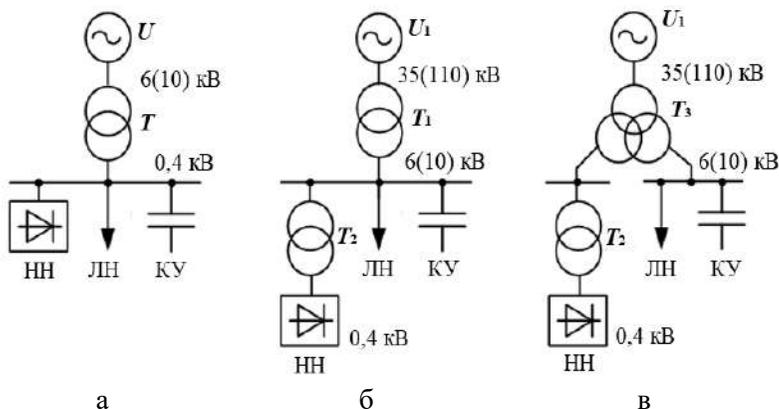


Рис. 3. Исследуемые типовые схемы промышленных систем электроснабжения:

- а – схема электроснабжения маломощной низковольтной нагрузки;
- б – схема электроснабжения мощной нагрузки с общей секцией шин на стороне среднего напряжения;
- в – схема электроснабжения мощной нагрузки с секционированием на стороне среднего напряжения и трехобмоточным питающим трансформатором

Для типовых промышленных систем электроснабжения получены зависимости коэффициентов K_{OVL} и THD_U от мощности конденсаторных установок Q_K^* , которые приведены на рисунках 4 – 6. Из рисунке 4 следует, что в области $Q_K^* < 0,2$ и $Q_K^* > 0,35$, где величины коэффициентов K_{OVL} и THD_U существенно выше нормируемых значений при мощности нелинейной нагрузки $P_d^* > 0,1$. Зависимости на рис. 5 показывают превышение допустимой перегрузки конденсаторных установок в резонансных режимах ($K_{OVL} > 1,3$), а также несоответствие качества напряжения нормируемым показателям при $P_d^* > 0,2$. На рисунке 6 приведены результаты моделирования при расщеплении обмотки питающего трансформатора, которые показывают недопустимый уровень K_{OVL} и THD_U при резонансных режимах при $P_d^* = 0,5$ и $P_d^* = 0,2$ соответственно.

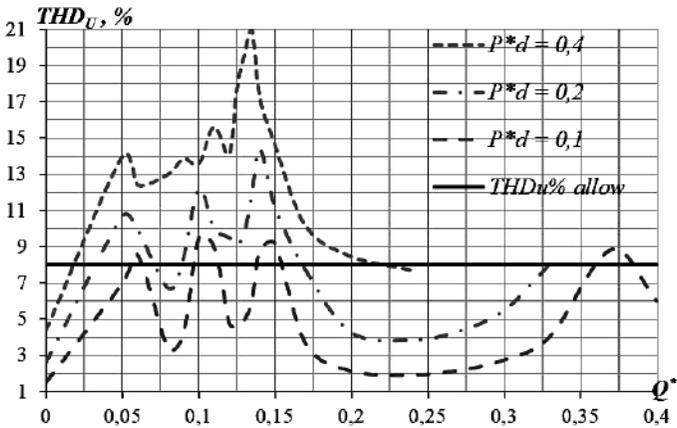
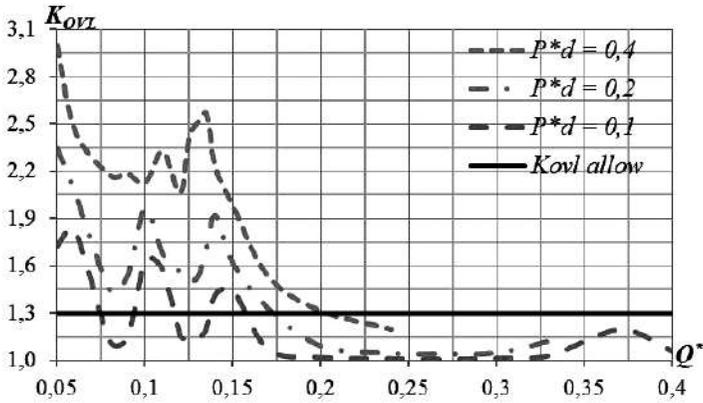


Рис. 4. Зависимости K_{OVL} и THD_U от мощности Q_K^* для рис. 3,а

Таким образом, во всех исследуемых типовых схемах промышленных систем электроснабжения при изменении в реальном диапазоне мощностей нелинейной и линейной нагрузок и конденсаторной батареи имели место резонансные режимы, обуславливающие недопустимую токовую перегрузку конденсаторов и недопустимое качество напряжения сети.

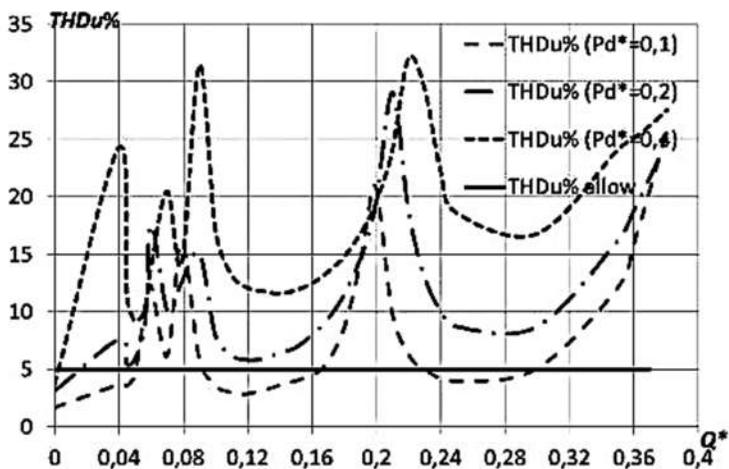
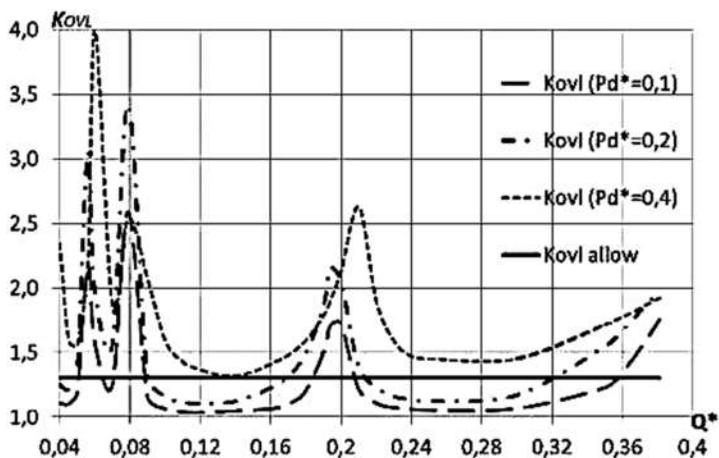


Рис. 5. Зависимости K_{ovl} и $THDu$ от мощности Q_k^* для для рис. 3,б

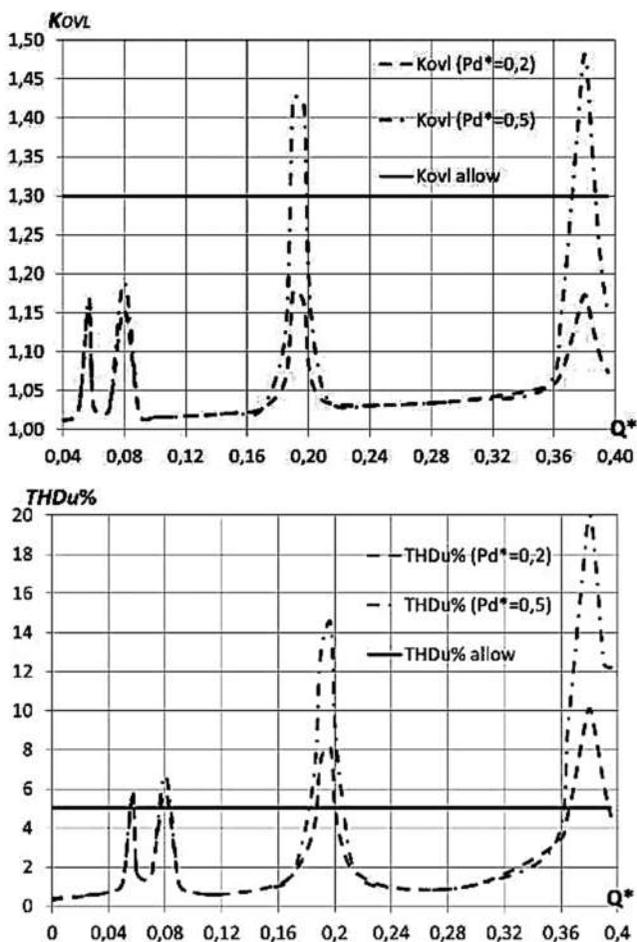


Рис. 6. Зависимости $Kovl$ и $THDu$ от мощности Q_k^* для для рис. 3,в

Алгоритм анализа и моделирования несинусоидальных режимов. Результаты имитационного моделирования для трех типовых схем электроснабжения, а также физическое моделирование показали, что в условиях несинусоидальных режимов при регулировании мощности нелинейной нагрузки и конденсаторной установки необходимо применять меры по защите конденсаторов от токовой перегрузки и предусматривать технические средства и решения по улучшению качества напряжения.



Рис. 7. Алгоритм анализа и моделирования несинусоидальных режимов для обоснованного выбора технического средства или решения по повышению качества электроэнергии

По результат моделирования даны рекомендации для выбора способа подавления высших гармоник в зависимости от величины относительной мощности нелинейной нагрузки для низковольтной системы электроснабжения, которые несколько отличаются от значений, которые приводятся в технической литературе [5–7] из-за неучета в ней возможных резонансных режимов:

- при $P_d^* < 0,15$ – обычные конденсаторные установки;
- при $0,15 < P_d^* < 0,25$ – конденсаторы с повышенным номинальным напряжением;
- при $0,25 < P_d^* < 0,6$ – конденсаторные установки с повышенным номинальным напряжением с антирезонансными дросселями или пассивными фильтрами;
- при $P_d^* > 0,6$ – активные фильтры гармоник.

Разработан алгоритм анализа и моделирования несинусоидальных режимов для обоснованного выбора технического средства или решения по повышению качества электроэнергии, приведенный на рис. 7.

Таким образом, выявленные в работе зависимости и закономерности, связанные с уровнем искажения напряжения при изменении мощности конденсаторных установок и коэффициента их перегрузки высшими гармониками тока при резонансе, а также обоснованные на их базе ограничения и допущения являются теоретической основой моделирования и анализа несинусоидальных режимов для надлежащего выбора технического средства или решения с целью повышения качества электрической энергии в промышленных системах электроснабжения.

Заключение. По результатам выполнения исследования сделаны следующие выводы.

1. Выполнено моделирование режимов работы типовых схем промышленных систем электроснабжения на примере обогатительных фабрик различной конфигурации, напряжения и мощности, включающих изменяющиеся в течение суток линейной и нелинейной нагрузок и регулирующую конденсаторную установку для компенсации реактивной мощности.

2. Для всех исследованных схем определены относительные значения мощностей регулируемых конденсаторов, при которых возникают резонансные режимы на частотах характерных высших гармоник, обусловленных работой нелинейной нагрузкой, что приводит к недопустимой токовой перегрузке конденсаторов (коэффициент перегрузки K_{OVL} более 1,3), ненадлежащему уровню качества напряжения узла нагрузки.

3. Выявлены диапазоны соотношения мощностей нелинейной нагрузки и питающего трансформатора, исходя из которых целесообразно применение того или иного технического средства или решения для подавления высших гармоник в системах электроснабжения различной конфигурации, включая применение конденсаторных установок, рассчитанных на повышенное напряжение, оснащение конденсаторов антирезонансными дросселями, применение активных фильтров гармоник.

Литература

1. **Сычев Ю.А., Костин В.Н., Сериков В.А., Аладьин М.Е.** Анализ несинусоидальных режимов в системах электроснабжения горных предприятий с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 1. С. 159–179. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_159.

2. **Костин В.Н., Кривенко А.В., Сериков В.А.** Влияние высших гармоник на качество напряжения и на работу конденсаторных батарей в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 5. С. 431–441.

3. **Sychev Y.A., Aladin M.E., Serikov V.A.** Developing a hybrid filter structure and a control algorithm for hybrid power supply // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). 2020. Vol. 13. № 3. P. 1625–1634. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i3. Pp. 1625–1634.

4. **Tuomainen M.** Compensation of harmonic currents and reactive power with shunt active filter. Nokian Capacitors, EN-TH06-11/2004. 9 p.

5. **Tuomainen M.** Special questions of industrial networks harmonics. Nokian Capacitors, EN-TH03-11/2004. 16 p.

6. **Техническая коллекция Schneider Electric.** Измерение и устранение гармоник. Выпуск № 30. Schneider Electric. 2010. URL: https://driveka.ru/files/lists/Products/1834_Files_1557305283_SE---Izmerenie-i-ustranenie-garmonik.pdf (дата обращения 18.09.2023).

7. **Schneider Electric:** Cahiers Techniques publications nos. 152, 159, 160, 183. URL: <http://www.schneider-electric.com>. (дата обращения 18.09.2023).

*Balametov A.B., Azerbaijan Scientific-Research and
Design-Prospecting Power Engineering Institute,
Abdullayeva G.K., gulyareservation@mail.ru,
Azerbaijan State Oil and Industry University,
Agakhanova K.A., kamalaagahanova@mail.ru,
Sumgayit State University*

**REGRESSION DEPENDENCIES
FOR OPERATIONAL MODELING
OF REGIMES OHL TAKING INTO ACCOUNT
ATMOSPHERIC FACTORS**

The temperature of the wires exceeds the temperature of the surrounding air and can be high due to the simultaneous action of flowing currents and solar radiation. At this time sagging of wires and active resistances increase, which leads to an increase in power and electricity losses in trunk lines and power transmission networks. At the same time, the economic indicators of the regimes are noticeably deteriorating.

As a result of intense heating, the normalized safe distances from wires to the ground surface, as well as to natural obstacles and engineering structures through which the lines pass, may be violated. Therefore, heating of the wires is considered to be the limiting factor for the transmitted power or current carrying capacity of the wires.

When calculating the allowable value of the temperature and current of the wire, uncontrolled parameters of the external environment should be taken according to the values corresponding to the most severe conditions, which leads to a significant underutilization of the throughput of the overhead line (OHL).

The power of solar radiation absorbed by the wire depends on the state of the wire surface, the density of the solar radiation flux (clear or cloudy sky, winter or summer, time of day) and the cosine of the angle between the sun's rays direction and the axis of the wire. Since the trajectory of the air line is not long and straight, it is impossible to determine the section of the air line that is most heated by the sun.

The climate of Azerbaijan is mainly influenced by the country geographical position, the relief and the Caspian Sea. The climate is semi-desert and arid-desert, subtropical, temperate and cold. 8 out of 11 types of climate on Earth are manifested here (according to V.V. Koeppen). Dry subtropical climate is characteristic of the Kura-Araks lowland and Absheron. Humid subtropical climate is observed only in the south of the Talysh mountains and is typical for the foothills and the Lankaran lowland. The temperate climate is observed on the forest slopes of the Greater and Lesser Caucasus and is divided into dry, moderately warm dry, moderately warm humid and moderately cold climates.

A cold climate is observed in the high mountain ranges, the peaks of the Greater and Lesser Caucasus, the belt of alpine and subalpine meadows. While the average annual temperature in the lowlands is 15 °C, in the highlands it ranges from 0 °C and below. In July in flat areas 25-27 °C, in mountainous areas 5 °C. While the absolute maximum is 43 °C, the absolute minimum drops to -30 °C. The intensity of solar radiation on the earth's surface in the Republic of Azerbaijan is 800÷1000 W/m² with a clear cloudless atmosphere for the Absheron Peninsula and the Caspian coast. There are 2500 hours of sunshine in a year. For the Nakhchivan Autonomous Republic these are 1100÷1200 W/m² and 2500 h respectively.

The intensity of solar radiation on the earth's surface under various meteorological conditions, W/m²: with a clear sky – 1200; cloudy sky – 800; sunny sky – 300; gloomy winter day – 100.

According to the international agreement signed in 1981, the recommendations of the Commission of the European Union and the International Electrotechnical Commission at the UN, it is recommended to use the price of solar energy in calculations – 1367 W/m² as a single standard for measuring the price of solar energy [1, 2].

In conditions of complex mountainous relief, as, for example, in the territory of the Nakhchivan Autonomous Republic, the intensity of the sun's rays increases by 7–14 W/m² for every 100 m above sea level.

The heating of the wire relative to the ambient temperature in the stationary heating mode is determined by the balance of forces that heat and cool the wire. The heat balance equation for a fixed temperature regime is written as follows:

$$I^2 \cdot R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (t_w - 20)] + W_c = \pi d_w (\alpha_k + \alpha_r) (t_w - t_{at}), \quad (1)$$

where I is the current in the line, A; R_{20} – wire resistance at 20 °C, Ohm/m; t_{at} – air temperature, °C; α_k, α_r – heat transfer coefficient of the wire during convective and radiative heat transfer, W/(m²·°C); W_c is the heat of solar radiation absorbed by 1 m of wire per unit time, W; d_w – wire diameter, m;

$$I = \sqrt{\frac{\varepsilon C_0 (273 + t_w)^4 \pi d + \varphi_k [(t_w - t_{rad}) - t_{at}] \pi d}{0.95 \cdot R_{20} \cdot [1 + 0.004 \cdot (t_w - 20)]}} \quad (2)$$

The convective heat transfer coefficient is determined by the formula [3]:

$$\varphi_k = 0.13057 \cdot \left(\frac{k_v \nu d_w}{a} \right)^{0.71719} \frac{\lambda_a}{d_w} \quad (3)$$

where k_v is the coefficient that takes into account the influence of wind direction on the angle of inclination of the overhead line to the axis and is equal to 0,5; ν – wind speed, m/s; a – the coefficient of thermal conductivity of air is $18.8 \cdot 10^{-6}$ m²/s; λ_a – thermal conductivity of air, equal to 0.0244 W/(m·°C).

From the heat balance equations (2) of the wire, we can conclude that the minimum temperature that can be released consists of three components

$$t_w = t_l + t_{at} + t_{sr} \quad (4)$$

where t_l is the heating of the wire connected by the load current due to energy losses in the active resistance of the wire. The temperature t_{sr}

depends on the intensity of solar radiation, height and density of clouds. The intensity of solar radiation varies throughout the year. According to the position of the sun in September, when the sky is blue and calm from 14:30 to 15:30 minutes, the following equation was obtained for ACSR wires in [3]:

$$t_{rad} = K_{\tau} \cdot K'_{\tau} \cdot K_{\rho\alpha\delta} \cdot d^{0.44152}. \quad (5)$$

To take into account solar radiation (the highest heat) when measuring wires of different brands in June, the formula (5) is used in the calculations when the sky is blue, $K_{\tau}=1.15$, $K'_{\tau}=1$, and when the sky is gray and the sun is visible, the coefficients $K_{\tau}=0.5$.

Influence of solar radiation. The coefficient of heat transfer by radiation is characterized by a large uncertainty, which depends both on the state of the surface of the wire and on the temperature of the wire in individual sections of the wire.

The algorithm for more accurate modeling of the wire temperature, taking into account the actual state of weather conditions on the overhead line route, is as follows: division of overhead lines into parts by footage, averaging by height above sea level; the length of the respective sections in km; overhead line load by hours during the day (current); provision of weather conditions in the sections of overhead lines; determination of the wind force angle; setting the speed and angle of wind direction on sections of overhead lines; modeling the intensity of solar radiation in parts; modeling the intensity of solar radiation absorbed by sections of overhead lines.

To assess the overheating of wires from solar radiation, it is necessary to know the intensity of solar radiation at the location of the power transmission line. Let's use the Meteonorm program for this. To work in the program, you need to enter the coordinates of the point where you want to find solar radiation. Let's take the coordinates of the power transmission line in the area of the Baku Bina Airport – 40.5°N/50.1°N, 1 m.

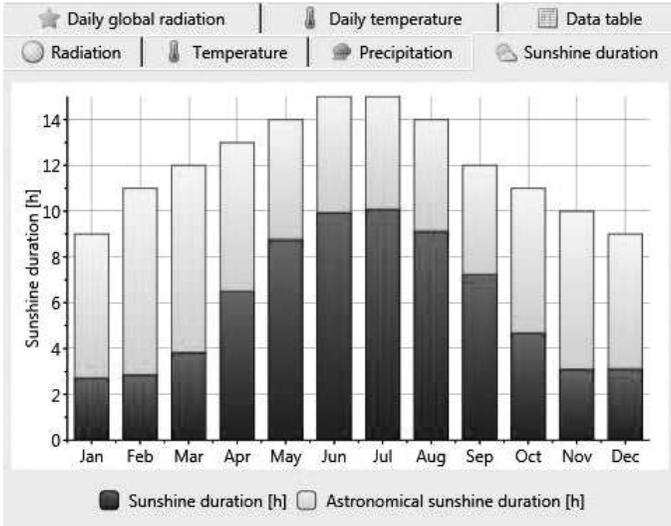


Figure 1. Average solar radiation for the Absheron region

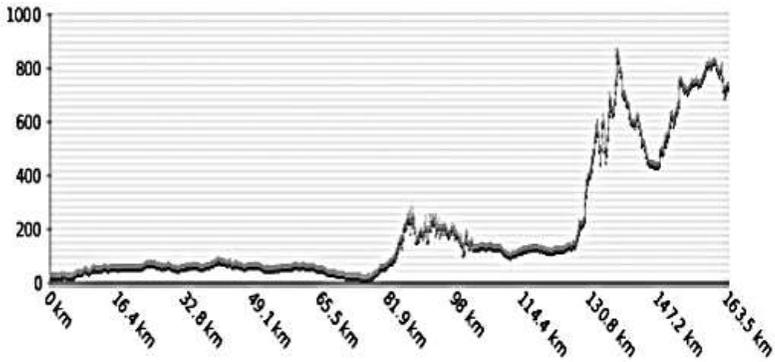


Figure 2. Change in the height of the sections of the power transmission line route from sea level

As an example, the 2nd Absheron power transmission line 500 kV with a length of 250 km, passing through mountainous regions with different heights, solar radiation intensity and wind speed, was studied.

The monthly mean of solar radiation for the Bina airport area is shown in Figures 1. The height above sea level of the upper parts of the 2nd Absheron overhead line, leaving the substation Absheron-Shamakhi-Agsu and the distances of the parts are shown in Figure 2.

The results of the calculation of the ACSR-330/43 wire depending on the air temperature, the intensity of solar radiation and wind speed at an air temperature of 25 °C for the section of the Shamakhi 2nd Absheron transmission line at an altitude of 800 m above sea level are shown in Table 1.

An example of building a regression model of wire temperature, taking into account air temperature, solar radiation, load current and wind speed. To do this, we used the wire of a power line with wires ACSR-330/43 with specific active resistance $R_{20} = 0,029$ Ohm/km; diameter $d = 25$ mm. Reports were made in the temperature range from -40 to $+40$ °C at $v = 0,5$ m/s and $\text{trad} = 0$ °C.

Table 1

**Dependence of the allowable wire temperature
on atmospheric factors**

Air temperature, °C	Wire temperature, °C	Solar radiation temperature, °C	Wind speed, m/s	Current in the wire, A
25	80	0	0.5	652.7
25	80	0	2.0	1002.2
25	80	20.4	0.5	547.8
25	80	20.4	2.0	814.8
40	80	0	0.5	577.40
40	80	0	2.0	868.32
40	80	20.4	0.5	455.43
40	80	20.4	2.0	643.04

Simulation modeling of the temperature of the ACSR-330/43 wire and multivariate simulation calculations (62 options) when the air temperature changes in the range $-10 \div +40$ °C, wind speed 0,5, 3, 6 m/s

and current in the wire 200÷730 A) based on the results, a regression model was obtained from three parameters to determine the temperature of the wire.

$$t_w = k_0 + k_1 \cdot t_{at} + k_2 \cdot V_{ws} + k_3 \cdot I_w + k_{12} \cdot t_{at} \cdot V_{ws} + k_{13} \cdot t_{at} \cdot I_w + k_{23} \cdot V_{ws} \cdot I_w + k_{11} \cdot t_{at}^2 + k_{22} \cdot V_{ws}^2 + k_{33} \cdot I_w^2$$

The t_{at} – air temperature; I_w – current in the wire; V_{ws} – wind speed.

The values of the regression dependence coefficients are shown in Table 2.

Table 2

Coefficients of regression dependencies

№	Coefficients of the equation regression	For model		
		Linear	Not complete quadratic	Complete quadratic
1	k_0	-0.81662	-8.1435	-7.887
2	k_1	0.97469	0.9543	0.92797
3	k_2	-1.4677	-3.2487	-1.601
4	k_3	0.029497	0.074804	0.047973
5	k_{12}	-	0.00039309	0.0085158
6	k_{13}	-	0.32534	$7.596 \cdot 10^{-5}$
7	k_{23}	-	$-5.3953 \cdot 10^{-5}$	-0.0096113
8	k_{11}	-	-	$1.5456 \cdot 10^{-5}$
9	k_{22}	-	-	0.53375
10	k_{33}	-	-	$2.7959 \cdot 10^{-5}$

The relative errors of calculation of the specific active resistance for wire ACSR-330/43 with respect to the specific active resistance at 20 °C are calculated, taking into account the air temperature. Relative errors in air temperature range from -40 to +40 °C. Permissible wire temperature ranges from +80 °C. At the same time, depending on the temperature of the wire, the load losses of active power can vary from -24 to +24 % at temperatures from -40 to +80° C compared to 20 °C.

It has been determined that when calculating the resistance of an overhead line without taking into account the temperature dependence, the relative errors can reach 26 %. Therefore, it is necessary to take into account the temperature of the wire along the line to solve a number of issues of improving the accuracy of modeling in the operating conditions of power transmission lines and operational control of modes.

Regression models for the heating temperature of overhead lines wires are proposed depending on the load current, ambient temperature, wind speed and solar radiation intensity depending on the wire diameter. An algorithm and a program for calculating the specific active resistance of overhead line wires are developed, taking into account air temperature, operating current, wind speed and solar radiation. The algorithm and software were tested on the example of a 500 kV overhead line.

Correction of thermal resistance using regression equations makes it possible to increase the efficiency of operational control of power transmission lines.

Literature

1. **Андерсон Б.** Солнечная энергия. М.: Стройиздат, 1992. С. 375.

2. **Саламов О.М., Гашимов А.М., Алиев Ф.Ф.** Перспективы использования солнечной энергии в Азербайджане. // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 8 (130). С. 64–78.

3. **Баламетов А.Б., Халилов Э.Д., Байрамов М.П., Агаханова К.А.** Программа моделирования температуры провода и потерь мощности на основе учета режимных и атмосферных факторов // Программные продукты и системы. 2018. № 2. Том 31. С. 396–402.

4. **Никифоров Е.П.** Предельно допустимые токовые нагрузки на провода действующих ВЛ с учетом нагрева проводов солнечной радиацией // Электрические станции. 2006. № 7.

5. **Balametov A.B., Halilov E.D., Bayramov M.P.** Modelling of active power losses in airlines considering regime and atmospheric factors // Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE). September 2015. Issue 24. Vol. 7. № 3. Pp. 58–62.

6. **Balametov A.B., Agahanova K.A., Balametov E.A.** Analysis of OHL parameters taking into account the influence of solar radiation and temperature on the sectors of the route // Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE). June 2021. Issue 47. Vol. 13. № 2. Pp. 118–123.

7. **Баламетов А.Б., Халилов Э.Д., Байрамов М.П., К.А. Агаханова.** Оперативное моделирование температуры провода для максимального использования пропускной способности воздушных линий // Оперативное управление в электроэнергетике. 2019. № 1. С. 16–24

8. **Баламетов А.Б., Агаханова К.А.** Анализ параметров воздушной линии с учетом влияния солнечного излучения и температуры по участкам трассы // XLIX Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 100–102.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ. НЕТРАДИЦИОННЫЕ
И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

*В.Е. Кожемякин, vek.group@mail.ru,
СФУ, г. Красноярск*

**К ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ
ГЕНЕРАЦИИ МАЛОЙ ГЭС
С УЧЕТОМ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА РЕКИ**

Согласно ГОСТ 27.002–83 под надежностью понимать свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

В процессе эксплуатации малой гидроэлектростанции (малой ГЭС) наибольший интерес представляет надежность в условиях её применения, т.е. вопросы надежности в условиях технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования могут быть выделены и не рассматриваться при определении надежности малой ГЭС.

Для гидроэнергетических установок (ГЭУ) малых ГЭС стоит определить гидроагрегаты в качестве элементов системы, надежность которой требуется определить. Работоспособное состояние гидроагрегатов (ГА) достигается только в том случае, когда параметры работы малой ГЭУ находятся в пределах, определяемых конструкторской документацией. Основными рабочими параметрами гидроэнергетических установок являются напор и расход,

подводимые к рабочему колесу установки. Нахождение значений расхода и напора в заданных заводом-изготовителем диапазонах является обязательным условием для сохранения работоспособного состояния ГА малой ГЭС.

К параметрам, характеризующим результат функционирования малой ГЭС, можно отнести величину вырабатываемой агрегатами мощности, действующее значение и частоту напряжения и другие. При работе малой ГЭС в изолированной энергосистеме частота будет находиться в сильной взаимосвязи с величиной активной мощности, вырабатываемой ГА.

Активная нагрузка, которую могут нести ГА малой ГЭС, будет определяться величиной расхода, поступающего к гидроагрегатам, а также напором. В практике отечественного проектирования применяются различные схемы создания напора для малых ГЭС [1–6]. Как правило, ещё на этапе водно-энергетических расчетов определяется диапазон напоров, для которых необходимо подобрать гидравлическую турбину. Такой порядок проектирования определяет отсутствие в ходе эксплуатации гидроэлектростанции режимов с недостаточным для работы турбины напором, что позволяет исключить их из рассмотрения.

На ГЭС вода является энергоносителем, обеспечивающим подвод к гидротурбине энергии в том или ином виде в зависимости от её класса. Располагаемое количество воды зависит от водности каждого конкретного года и не может быть спрогнозировано с абсолютной точностью. Для целей планирования выработки электроэнергии на ГЭС пользуются кривыми обеспеченности стока, позволяющими оценить объем стока с различной вероятностью возникновения.

Для построения кривых обеспеченности, позволяющих с достаточной для целей эксплуатации точностью определять величину расходов в данном году, необходимо иметь гидрографы за несколько лет наблюдений. В случае с малыми водотоками, как правило, отсутствуют гидрографы за достаточное число лет наблюдений (80–100 лет).

Существующие методы приведения кривых обеспеченности других, схожих по гидрологическим характеристикам рек-аналогов, хоть и позволяют получить удовлетворительные результаты, тем не менее не исключают возможности появления событий редкой повторяемости. С точки зрения оценки надёжности наибольший интерес представляет оценка вероятности снижения расходов ниже величин, требуемых для обеспечения мощности малой ГЭС.

Возникновение режима, в котором бытовой расход водотока окажется недостаточным для работы агрегатов малой ГЭС, возможно вследствие использования при проектировании данных маловодного года. Для иллюстрации воспользуемся гидрографом реки Казыр (рис. 1).

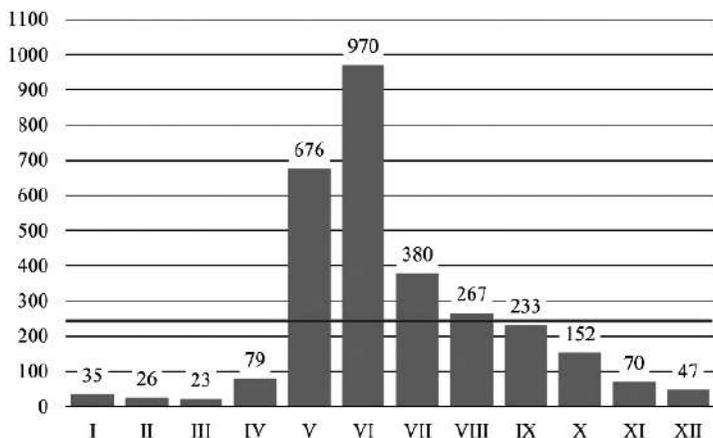


Рис. 1. Гидрограф среднемноголетних расходов р. Казыр

Поверх гидрографа нанесена линия среднего многолетнего расхода, имеющая красный цвет. Видно, что в течение года расход воды в реке может быть как меньше среднего по году значения (период межени), так и больше него (периоды половодья и паводков). В случае с крупными гидроэлектростанциями, имеющими водохранилища годичного или многолетнего регули-

рования, избыточный расход в период половодья запасается в водохранилище, а затем, в период межени, используется для увеличения выработки.

В случае с малыми ГЭС, построенными или спроектированными в СССР по плотинной схеме, также образуется водохранилище, но преимущественно суточного, реже недельного регулирования. Именно наличие водохранилища, позволяющего производить перераспределение стока внутри суток (используется неравномерность суточного графика нагрузки), позволяет предотвратить перерывы в электроснабжении от малых ГЭС.

Сегодня большую популярность набирают конструкции, не требующие возведения плотин. Такая тенденция обусловлена стремлением снизить стоимость решений по электроснабжению от малых ГЭС. Данный подход, с одной стороны, позволяет сократить затраты на возведение малого гидроузла более чем в половину, но, с другой стороны, получаемые технические решения не дают возможности накопления, аккумуляирования энергии (в форме потенциальной энергии) и оказываются подведены под общий знаменатель с солнечными и ветровыми энергетическими установками, для которых в силу сильной изменчивости величины располагаемого энергоресурса даже на коротких временных промежутках требуется создание систем накопления энергии.

Сегодня на территории Российской Федерации действует национальный стандарт [7], определяющий малые ГЭС как гидроэлектростанции с установленной мощностью от 100 до 25000 кВт. Очевидно, заданные границы не предполагают учета схемы создания напора на малых ГЭС. Для иллюстрации этого воспользуемся известной формулой мощности ГЭС:

$$N_{ГЭС} = 9,81QH\eta_{ГЭС},$$

где $\eta_{ГЭС}$ для определенности примем равным 0,8; Q будем считать равным среднему многолетнему расходу реки Казыр.

Выразив напор, рассчитаем его значения для диапазона мощностей малых ГЭС. Для получения мощности 100 кВт на реке со среднемноголетним расходом 247 м³/с необходимо создать напор 0,05 м. Очевидно, что в данном случае нет необходимости возводить какие-либо гидротехнические сооружения, и использовать нужно не реактивные турбины, а активные, размещаемые непосредственно в русле. Такие турбины называются свободнопоточные [8].

Иначе обстоит ситуация в случае получения мощности в 25 000 кВт. Для реки с тем же значением среднемноголетнего расхода необходимо создать напор 12,9 м. В данном случае необходимо рассматривать возможность использования местного рельефа для создания напора, т.е. анализировать вариант применения деривационной схемы. В противном случае единственным вариантом оказывается возведение плотины.

Оценку надежности малых ГЭС невозможно производить без учета конструкции гидротурбинной установки. В случае со свободнопоточными ГЭС отсутствует любая возможность накопления стока, т.е. не формируется резерв энергоносителя, вследствие чего интенсивность отказов будет выше, чем у ГЭС, имеющих возможность аккумуляирования стока в водохранилище или бассейне суточного регулирования. Таким образом, вероятность безотказной работы [9] малой ГЭС, работающей по водотоку, будет ниже, чем у ГЭС с возможностью аккумуляирования стока.

Отказ, обусловленный недостаточной величиной расхода, можно отнести к отказам общей причины (ООП) [10]. В рассматриваемом случае ООП обусловлен воздействиями факторов окружающей среды. В работе [11] описываются возможные причины изменения меженного стока. Названные причины с точки зрения ООП представляют собой постоянно действующие факторы (атмосферные в данном случае), влияющие на сток в течение всего периода зимней межени.

При работе малой ГЭС по водотоку, мгновенный расход может оказаться недостаточным для обеспечения установленной мощности всех агрегатов малой ГЭС. В таком случае будет иметь

место ООП одного или нескольких гидроагрегатов. В дальнейшем возможно увеличение расхода реки, приводящее к восстановлению нормальной работы отключенных ранее из-за недостатка энергоносителя агрегатов.

Перед построением графа надежности определим конфигурацию системы. Примем малую ГЭС с двумя гидроагрегатами. Зададимся периодом зимней межени, для которого снижение расхода в реке ниже расчетного можно считать ООП. Примем, что оборудование подготовлено к периоду зимней межени и пренебрежем вероятностью возникновения отказов функционирования. Для построения графа примем следующие обозначения:

- E_0 – ООП гидроагрегатов № 1 и № 2;
- E_1 – гидроагрегаты № 1 и № 2 малой ГЭС работоспособны;
- E_2 – гидроагрегат № 1 – работоспособен, № 2 – ООП;
- E_3 – гидроагрегат № 1 – ООП, № 2 – работоспособен;
- λ_{ij} – интенсивности отказов, представляющие собой плотность вероятности возникновения отказов, 1/ч;
- μ_{ij} – интенсивности восстановления, являющиеся величиной, обратной времени восстановления работоспособного состояния малой ГЭС, 1/ч;
- dt – время, за которое возможен переход из одного состояния в другое.

Построенный граф состояний представлен на рис. 2.

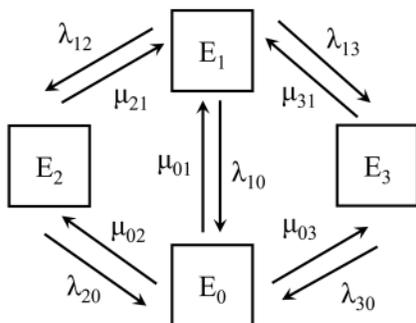


Рис. 2. Граф модели надежности малой ГЭС

Состояния E_2 и E_3 , в которых только один из двух гидроагрегатов обеспечен притоком, одинаковы по значению мощности. Также переход из состояния E_1 в данные состояния равновероятен в силу возможности выбора любого из двух гидроагрегатов для оставления в сети. В связи с этим можно упростить схему и получить новый граф, с учётом того, что увеличение расхода воды в реке после состояния E_0 приведет сначала к восстановлению только одного ГА, после чего будет обеспечен расходом второй агрегат. Объединенное состояние E_2 и E_3 обозначим E_{23} . Упрощённый граф представлен на рис. 3.

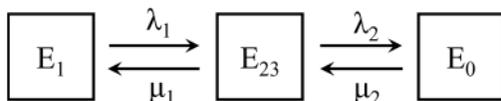


Рис. 3. Граф модели надежности малой ГЭС после эквивалентирования

В полученной схеме $\lambda_1 = \lambda_{12} = \lambda_{13}$, а $\lambda_2 = \lambda_{20} = \lambda_{30}$. Для интенсивностей восстановления также справедливо равенство: $\mu_1 = \mu_{21} = \mu_{31}$, а $\mu_2 = \mu_{02} = \mu_{03}$. Учитывая значительную инерцию процессов изменения расходов в реке, переход из состояния E_1 в состояние E_0 , минуя состояние E_{23} , можно считать невозможным.

Обозначим вероятность застать малую ГЭС в состоянии E_1 как $P_1(t)$, вероятность застать установку в состоянии E_0 как $P_0(t)$, а вероятность застать установку в состоянии E_{23} как $P_{23}(t)$. Система дифференциальных уравнений для вероятностей состояний, соответствующая этому графу:

$$P_0'(t) = \lambda_2 P_{23}(t) - \mu_2 P_0(t);$$

$$P_1'(t) = \mu_1 P_{23}(t) - \lambda_1 P_1(t);$$

$$P_{23}'(t) = \lambda_1 P_1(t) + \mu_2 P_0(t) - (\mu_1 + \lambda_2) P_{23}(t).$$

Если E_1 , E_{23} и E_0 представляют собой полную группу событий (т.е. $P_0 + P_1 + P_{23} = 1$), т.к. выполнена подготовка к периоду зимней межени:

$$P_1(0) = 1; P_0(0) = 0; P_{23} = 0.$$

Для определения значения коэффициентов μ необходимо определить время восстановления τ системы после возникновения отказа. Используя рассчитанные по данным гидрологических наблюдений значения расходов маловодного года обеспеченностью 90 % и 95 %, было определено, что в те годы, когда бытовой расход реки оказывается меньше $Q_{90\%}$ или $Q_{95\%}$, такой период длится не больше 1 месяца, т.е. не более 720 часов. Интенсивность восстановления рассчитана, как величина, обратная времени восстановления, и составляет:

$$\mu_1 = \mu_2 = 1,389 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}.$$

Коэффициенты λ рассчитываются исходя из следующих соображений. Примем, что количество отказов равно количеству часов, на начало которых наблюдается снижение расхода ниже $Q_{90\%}$ или $Q_{95\%}$. Время наблюдения составит период, за который рассматривается вероятность появления отказа:

$$\lambda = \frac{(n_{\text{лет}} - p \cdot n_{\text{лет}}) \cdot 30 \cdot 24}{n_{\text{лет}} \cdot 365 \cdot 24} = (1 - p) \cdot 82,2 \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где λ – интенсивность отказов, ч^{-1} ; $n_{\text{лет}}$ – число лет наблюдений; p – обеспеченность расхода; 30 – число дней в месяцах с расходами, не превышающими заданную обеспеченность; 24 (в числителе) – это число часов, на начало которых наблюдается снижение расхода ниже заданной обеспеченности; 24 (в знаменателе) – число часов в сутках; 365 – число суток за год.

Таким образом, получаем формулу, позволяющую рассчитывать искомую величину интенсивности отказов в зависимости от расчетной обеспеченности стока.

Примем, что при появлении расходов ниже $Q_{90\%}$ отказывает первый ГА. По формуле (1) интенсивность отказов:

$$\lambda_1 = (1 - 0,9) \cdot 82,2 \cdot 10^{-3} = 8,22 \cdot 10^{-3}.$$

Примем, что при появлении расходов ниже $Q_{90\%}$ отказывает второй ГА, интенсивность отказов составляет

$$\lambda_2 = (1 - 0,95) \cdot 82,2 \cdot 10^{-3} = 4,11 \cdot 10^{-3}.$$

Решение системы дифференциальных уравнений производилось средствами Mathcad. По результатам численного решения был получен график, представленный на рис. 4.

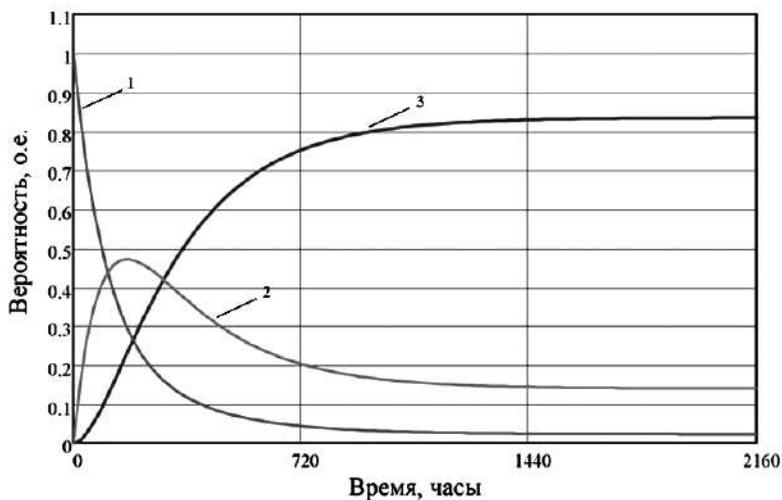


Рис. 4. Вероятности перехода гидроагрегатов малой ГЭС в неработоспособное состояние:

- 1 – вероятность безотказной работы двух ГА;
- 2 – вероятность ООП одного из двух ГА;
- 3 – вероятность ООП двух ГА

Из полученного графика видно, что в течение первого месяца периода зимней межени происходит изменение значения вероятностей нахождения ГА в рассматриваемых состояниях E_1 , E_{23} и E_0 . Сохранение в работе двух ГА является наименее вероятным исходом уже спустя 7–8 дней после начала периода межени. После этого один ГА, вероятно, останется в работе ещё на 4–6 дней, после чего вероятность ООП двух ГА станет наибольшей.

Получим значение коэффициентов готовности малой ГЭС с двумя ГА, рассчитанной на работу с расходами $Q_{90\%}$ и $Q_{95\%}$:

$$k_e^{90\%} = \frac{\mu}{\lambda_1 + \mu} = \frac{1,389 \cdot 10^{-3}}{8,22 \cdot 10^{-3} + 1,389 \cdot 10^{-3}} = 0,145,$$

$$k_e^{95\%} = \frac{\mu}{\lambda_2 + \mu} = \frac{1,389 \cdot 10^{-3}}{4,11 \cdot 10^{-3} + 1,389 \cdot 10^{-3}} = 0,253.$$

По значению коэффициентов готовности видно, что использование $Q_{95\%}$ в качестве расчетного позволяет снизить вероятность отказов, обусловленных недостаточной величиной бытового расхода. При этом и мощность проектируемой малой ГЭС будет снижаться.

В рамках данной работы предложена модель надежности малой ГЭС с двумя гидроагрегатами. Для предложенной модели рассчитаны вероятности отказа одного или двух ГА, обусловленные снижением бытового расхода реки ниже расчетных значений. Также предложена формула (1), позволяющая определить интенсивность отказов, обусловленных недостаточным расходом реки по известным значениям обеспеченности. Рассчитанные коэффициенты готовности показали наличие связи между обеспеченностью расходом и готовностью малой ГЭС.

Литература

1. **Коновалова О.Е., Победоносцева В.В.** Возможности малой гидроэнергетики Архангельской области // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2017. № 5(56). С. 181–190.
2. **Бляшко Я.И., Сафронов Н.С.** Малые ГЭС России: развивать нельзя откладывать // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2022. № 7(247). С. 60–62.
3. **Батырбеков У.Б., Омурзакова М.Ж.** Обоснование схемы подачи воды на гидроагрегаты малой ГЭС на реке Чу // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2021. Т. 21, № 4. С. 118–123.
4. **Лазарева Н.В., Проскурина А.А., Строчков И.В., Сысоев А.А.** Современные технико-экономические характеристики малых ГЭС // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 25. С. 771–785.

5. **Мирзоев М.И., Слива И.В.** Проект строительства Красноярских малых ГЭС на реке Кубани // Гидротехника. 2019. № 3(56). С. 8–11.

6. **Ермакова Н. Н., Пенюков М.В., Губернаторов О.Ю.** Опыт эксплуатации малых ГЭС ФГБУ «Канал имени Москвы» // Гидротехника. 2020. № 2(59). С. 28–32.

7. **ГОСТ Р 55260.4.1-2013.** Технологическая часть гидроэлектростанций и гидроаккумулирующих электростанций: национальный стандарт Российской Федерации. М.: Стандартинформ, 2017. Часть 4-1, 70 с.

8. **Трещалов Г.В.** Применение свободнопоточных гидравлических турбин и возможности повышения их энергоэффективности // Гидротехническое строительство. 2013. № 9. С. 36–39.

9. **Гук Ю.Б., Синенко М.М., Третьяков В.А.** Расчет надежности схем электроснабжения: производственное издание. Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1990. 216 с.

10. **Гук Ю.Б.** Анализ надежности электроэнергетических установок: производственное издание. Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1988. 224 с.

11. **Боревский Б. В., Марков М. Л.** Является ли меженный расход рек мерой питания подземных вод или общего подземного стока? // Разведка и охрана недр. 2014. № 5. С. 10–16.

А.В. Шалухо, shaluko@nntu.ru,

И.А. Липужин, lipuzhin@nntu.ru,

Ю.Н. Шувалова, yulia.shuvalova2017@yandex.ru,

НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКОЙ НА ОСНОВЕ ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В современном мире применение водородных технологий рассматривается в качестве одного из важнейших направлений перехода к безуглеродной экономике [1]. Согласно Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации [2] необходи-

мыми этапами становления данного направления являются улучшение научно-технической базы и расширение применения водородных технологий, в т.ч. топливных элементов (ТЭ).

Объединение нескольких ТЭ на параллельную работу позволяет использовать преимущества одиночных установок (экологичность, маневренность и т.п.), а также снизить влияние негативных факторов (недостаточно большой срок службы, низкая эффективность при малых нагрузках). Такие системы получили название «мультистеки» [3]. Однако для достижения указанных результатов требуется создание интеллектуальных систем управления (СУ) мультистеками, учитывающих особенности ТЭ.

Доклад посвящен разработке СУ «верхнего» уровня для мультистека, состоящего из двух ТЭ с полимерной протонообменной мембраной (ПОМТЭ) одинаковой мощности, но с отличающимися вольтамперной характеристикой (ВАХ) и расходом водорода. Цель работы заключается в разработке и исследовании алгоритма СУ, обеспечивающего высокую энергетическую эффективность работы мультистека. Для достижения поставленной цели разработана математическая модель мультистека и исследованы различные сценарии его работы. Полученные результаты положены в основу алгоритма управления, для отработки которого разработана *Simulink*-модель системы электроснабжения с энергоустановкой на основе ТЭ.

Описание объекта исследований. Объектом исследования является мультистек, состоящий из двух ПОМТЭ номинальной мощностью 1 кВт каждый, но отличающиеся по паспортным характеристикам (рисунок 1). Вольтамперные характеристики и зависимости расхода водорода от нагрузки были получены на основе экспериментальных исследований двух реальных ТЭ, проведенных на специально разработанном лабораторном стенде [4].

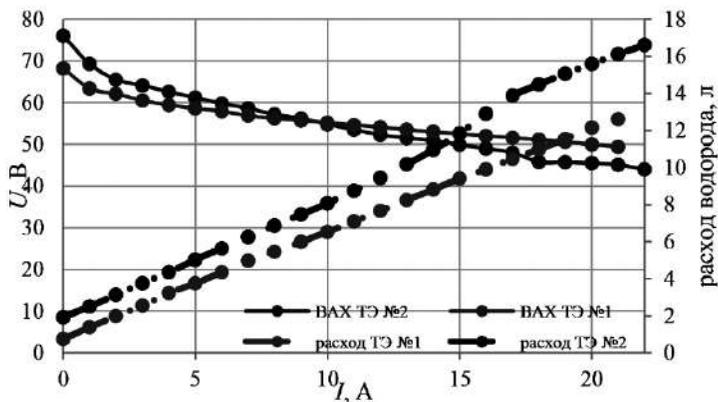


Рис. 1. Сравнение ВАХ и расхода водорода

Математическая модель мультистека. Для построения алгоритма управления разработана математическая модель мультистека и проведено моделирование его работы при питании нагрузки мощностью от 0,1 до 2 кВт с шагом 0,1 кВт. Цель моделирования – определение КПД мультистека при различных вариантах распределения мощности нагрузки между ТЭ. В основу модели положены формулы, приведенные в работе [5].

Проведено моделирование работы мультистека при 130 сценариях распределения мощности нагрузки. Полученные результаты показали, что при значениях нагрузки менее 1 кВт эффективна работа ТЭ № 1 при нулевой загрузке ТЭ № 2. При этом существует два варианта нулевой загрузки ТЭ – работа на холостом ходу (водород и воздух продолжают подаваться) или полное отключение ТЭ. Начиная с мощности нагрузки 1,1 кВт и выше наибольшая эффективность достигается при полной загрузке ТЭ № 1, а ТЭ № 2 обеспечивает питание оставшейся части нагрузки. Полученные результаты иллюстрирует рис. 2.

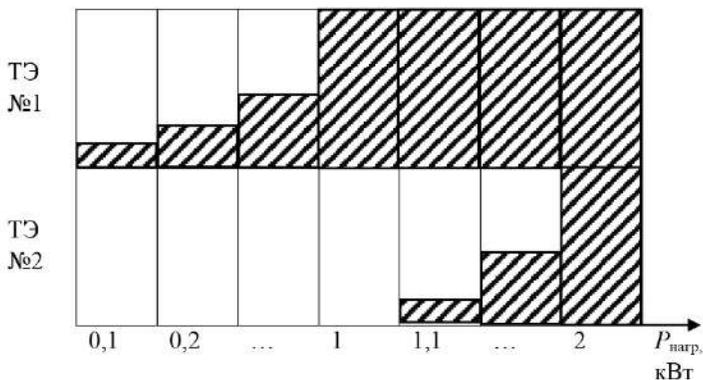


Рис. 2. Схема алгоритма управления мультистеком:
 $P_{\text{нагр}}$ – мощность нагрузки

Алгоритм управления мультистеком. На основе результатов математического моделирования для рассматриваемого мультистека разработан алгоритм управления, определяющий оптимальное распределение нагрузки между ТЭ (рис. 3).

Суть алгоритма заключается в следующем. После включения мультистека в СУ поступает исходная информация о количестве ТЭ, их номинальной мощности и расходе водорода ($F_{\text{ТЭ}}$, $P_{\text{ном}}$ и n). Для рассматриваемого мультистека заранее известно, что первый ТЭ потребляет меньше водорода, чем второй ($F_{1\text{ТЭ}} < F_{2\text{ТЭ}}$).

Для выполнения алгоритма периодически считываются данные о мощности нагрузки, а также внешних характеристиках каждого ТЭ ($P_{\text{нагр}}$, $I_{\text{ТЭ}}$, $U_{\text{ТЭ}}$). Эта информация сохраняется в базе данных (БД) для дальнейшего использования в блоке прогнозирования нагрузки.

Режим работы мультистека зависит от мощности нагрузки (до или более 1 кВт). При мощности нагрузки менее 1 кВт в работе остается ТЭ № 1, а ТЭ № 2 может работать на холостом ходу или быть полностью отключен. Для определения режима работы ТЭ № 2 добавлен блок прогнозирования нагрузки. Предполагается, что в дальнейшем данная функция будет реализована на основе нейросетевых технологий.

При мощности нагрузки более 1 кВт ТЭ № 1 вырабатывает максимальную мощность, а ТЭ № 2 питает оставшуюся часть нагрузки. На выходе формируются данные о фактической загрузке каждого ТЭ (P_1, P_2). Алгоритм выполняется до тех пор, пока не будет дана команда на отключение.

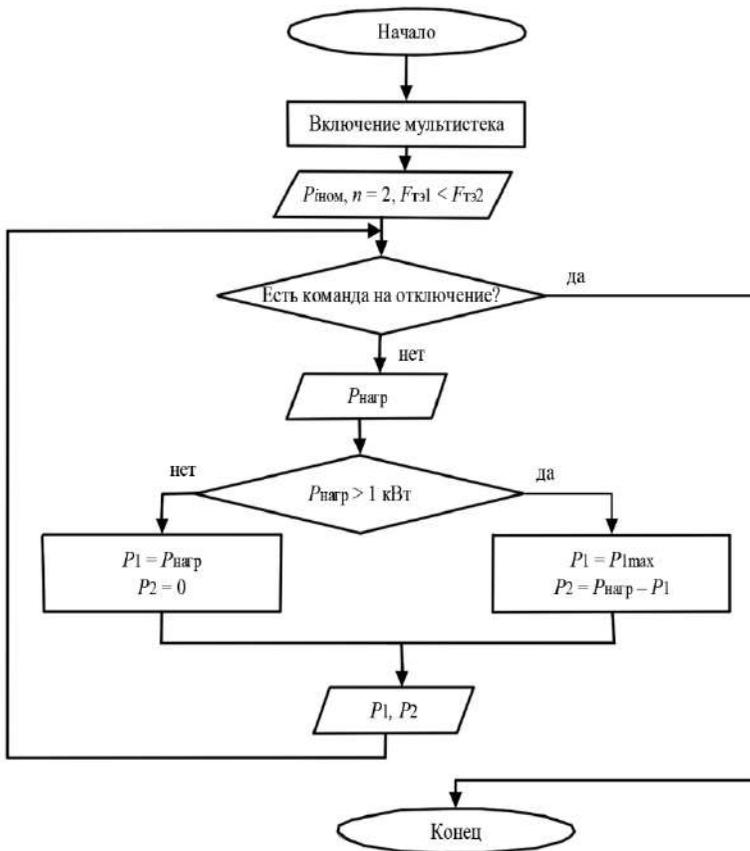


Рис. 3. Блок-схема алгоритма работы мультистека:

$P_{ном}$ – номинальная мощность i -го ТЭ; $F_{ГЭ}$ – расход водорода i -го ТЭ;
 n – количество ТЭ; $P_{нагр}$ – мощность нагрузки; $I_{ГЭ}$ – ток i -го ТЭ,
 $U_{ГЭ}$ – напряжение i -го ТЭ; P_1 – фактическая загрузка 1-го ТЭ;
 P_2 – фактическая загрузка 2-го ТЭ; P_{1max} – максимальная загрузка 1-го ТЭ

Одной из особенностей работы ТЭ являются неизбежные деградационные процессы, скорость протекания которых зависит, в том числе, и от частых включений–отключений ТЭ [6]. Поэтому в дальнейшей работе предполагается доработка алгоритма для определения максимальной загрузки каждого ТЭ с учетом уровня деградации (на основе сравнения динамики отклонения их фактической вольтамперной характеристики от паспортной).

Имитационная модель системы электроснабжения с мультистеком. Для отработки алгоритма управления разрабатывается имитационная компьютерная модель системы электроснабжения с рассматриваемым мультистеком в программе *Matlab R2020b/Simulink*.

Для моделирования стека ТЭ использован блок *Fuel Cell Stack*. Регулирование подачи водорода на вход ТЭ осуществляется с помощью обратной связи по току.

На выходе ТЭ установлен понижающий преобразователь постоянного тока (*DC/DC Buck converter*), который понижает выходное напряжение ТЭ до 48 В. Система управления преобразователя первого ТЭ стабилизирует выходное напряжение на шине постоянного тока, система управления преобразователей второго ТЭ отвечает за распределение тока между стеками.

После преобразователей установлен полномостовой инвертор и Г-образный *LC* фильтр, которые используются для преобразования постоянного тока в переменный и получения чистой синусоиды. Система управления инвертором стабилизирует выходное напряжения инвертора в заданных пределах.

Поскольку наибольшее количество электроприемников работает на напряжении 220 В, после фильтра установлен повышающий трансформатор 48/220 В. Нагрузка моделируется активным сопротивлением.

Заключение. На основе проведенных исследований разработан общий алгоритм управления мультистеком с двумя ПОМТЭ одинаковой мощности, но разными характеристиками. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку и исследование

Simulink-модели мультистека, разработку алгоритмов работы отдельных блоков, усовершенствование СУ и обработку полученных результатов на лабораторном стенде.

Исследование выполнено в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE-2022-0005).

Литература

1. **Бедретдинов Р.Ш.** Экономическая оценка эффективности применения гибридного энергетического комплекса на основе водорода // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 4. С. 47–58. DOI: 10.46960/2658-675_2021_4_47

2. **Концепция** развития водородной энергетики в Российской Федерации. Утв. расп. Правительства РФ от 5 августа 2021 г. № 2162-р.

3. **Ma R. et al.** Recent progress and challenges of multi-stack fuel cell systems: Fault detection and reconfiguration, energy management strategies, and applications // Energy Conversion and Management. 2023. Vol. 285. No. 117015. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117015.

4. **Loskutov A., Kurkin A., Shalukho A., Lipuzhin I., Bedretdinov R.** Investigation of PEM Fuel Cell Characteristics in Steady and Dynamic Operation Modes // Energies. 2022. Vol. 15, No. 19. 6863. DOI 10.3390/en15196863

5. **Шалухо А.В., Липужин И.А., Бедретдинов Р.Ш., Шувалова Ю.Н.** Математическое моделирование работы мультистека на основе водородных топливных элементов // Будущее технической науки: сборник материалов XXII Всероссийской молодежной научно-техн. конф. Н. Новгород: НГТУ, 2023. С. 176–177.

6. **Дарьенков А.Б., Шалухо А.В. Шувалова Ю.Н.** Анализ процессов деградации в мембрано-электродном блоке топливного элемента с полимерной протонообменной мембраной // Фёдоровские чтения – 2022: ЛII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (с элементами научной школы для молодежи). М.: Издательский дом МЭИ, 2022. С. 288–294.

*Е.С. Подшивалов, e.podshivalov-tcn-nn@yandex.ru,
П.С. Сергеев, sps-1998@mail.ru,
О.В. Крюков, o.v.kryukov@mail.ru,
ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород*

ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ РАБОТЫ ГИБРИДНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В результате развития технологий за последние 20 лет повышаются требования к надежности и бесперебойности электроснабжения объектов промышленного назначения. Для обеспечения требуемого уровня надежности в систему электроснабжения часто интегрируют установки распределенной генерации [1–3]: ветрогенераторы, солнечные панели, дизельные или газовые генераторы, а также накопители электроэнергии [4–6]. Это позволяет обеспечить предприятие собственным источником электроэнергии на время отключения от основного источника [7–9].

В данной работе в качестве источника рассматриваются гибридные накопители электроэнергии (ГНЭ) [1]. В [10] рассмотрены основные преимущества таких накопителей электроэнергии относительно традиционных, представлены основные параметры аккумуляторных и суперконденсаторных батарей, режимы работы, а также проанализированы последствия их внедрения в систему электроснабжения объектов агропромышленного комплекса. На рисунке 1 приведена структурная схема гибридного накопителя электроэнергии, состоящая из батареи аккумуляторных элементов, батареи суперконденсаторных элементов, а также устройства сопряжения с сетью электроснабжения промышленного предприятия, включающее в себя выпрямительные устройства, инверторы, контроллеры и другое оборудование.

Основные задачи гибридных накопителей электроэнергии: выравнивание графиков нагрузки в сети; сглаживание кратковременных колебаний активной и реактивной мощности;

обеспечение бесперебойного питания; обеспечение стабильной и устойчивой работы электрооборудования промышленного предприятия.

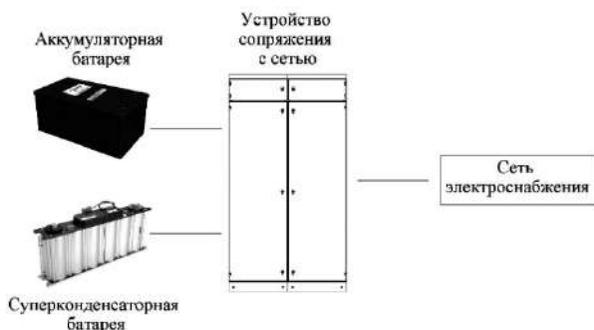


Рис. 1. Структурная схема ГНЭ

При внедрении гибридных накопителей электроэнергии возникает вопрос о системном уровне (УР) размещения накопителей в системе электроснабжения: первый уровень – непосредственно вблизи электроприемника, второй – щит распределения и распределительные пункты, третий – распределительное устройство низкого напряжения трансформаторной подстанции, четвертый – шины распределительной подстанции высокого напряжения, пятый – шины главной понизительной подстанции или подстанции глубокого ввода, шестой уровень – граница раздела предприятия и энергоснабжающей организации. На рисунке 2 представлена структурная схема системы электроснабжения.

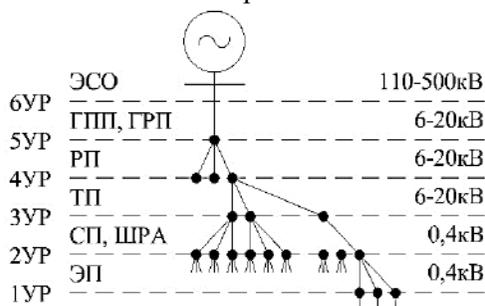


Рис. 2. Уровни (ступени) системы электроснабжения

Установка гибридных накопителей электроэнергии возможна как на напряжении свыше 1 кВ, так и на напряжении до 1 кВ. Но экономически целесообразнее ставить такие установки со стороны низкого напряжения, так как при использовании на напряжении свыше 1 кВ необходима установка повышающих трансформаторов, что требует больших капиталовложений, а также повышаются требования к защите данных установок. В работе рассматривается установка гибридных накопителей электроэнергии на напряжении до 1 кВ.

Остается вопрос об уровне системы электроснабжения, на котором необходимо устанавливать гибридные накопители электроэнергии. При напряжении до 1 кВ можно выбрать только первый, второй и третий уровни. Сравним эти варианты.

Вначале рассмотрим установку гибридных накопителей на первом уровне – непосредственно около электроприемника. Данный способ размещения установки обладает следующими преимуществами: индивидуальная компенсация реактивной мощности электроприемников с индуктивной нагрузкой; мгновенная компенсация больших пусковых токов электродвигателей. К недостаткам отнесем высокую стоимость оборудования, резервирование питания только для единичных электроприемников, сложность в обслуживании большого количества установок. На рисунке 3 представлена структурная схема размещения гибридных накопителей электроэнергии на первом уровне системы электроснабжения.



Рис. 3. Размещение ГНЭ на первом уровне системы ЭС

Установка на втором уровне, то есть непосредственно в узлах распределения и на главных распределительных щитах, обладает следующими преимуществами относительно первого варианта: под контролем установки находится не один, а группа электроприемников, в результате чего возможна комплексная компенсация реактивной мощности и организация резервного питания для нескольких потребителей; одна такая установка заменяет ряд установок, расположенных непосредственно вблизи электроприемника, что в разы уменьшает начальные капиталовложения и упрощает обслуживание данных установок. К недостаткам такого размещения ГНЭ можно отнести увеличение мощности установки. На рисунке 4 представлена структурная схема размещения гибридных накопителей электроэнергии на втором уровне системы электроснабжения.



Рис. 4. Размещение ГНЭ на втором уровне системы ЭС

Установка на третьем уровне системы электроснабжения (то есть непосредственно на шинах распределительного устройства низкого напряжения трансформаторной подстанции) обеспечивает контроль нескольких групп нагрузок. С одной стороны это является плюсом, так как может осуществляться комплексная компенсация реактивной мощности прямо на шинах трансформаторной подстанции, но, с другой стороны, компенсация пусковых токов и кратковременных колебаний графиков нагрузок осуществляется с

меньшей эффективностью. Данный вариант позволяет организовать резервное питание для всей потребителей, получающих питание от трансформаторной подстанции, но требует увеличения мощности установки и больших начальных капиталовложений.

В результате проведенного сравнения можно сделать вывод, что наиболее рациональным решением будет являться размещение накопителей на втором уровне системы электроснабжения.

Следующий этап работы – определение логической схемы работы ГНЭ. Логика построена на четырех режимах работы, которые зависят от параметров системы электроснабжения в определенный момент времени:

1 – нормальный режим (ГНЭ отключен и готов к работе, аккумуляторные батареи и суперконденсаторные батареи заряжены);

2 – режим работы с повышенной нагрузкой в результате возрастания нагрузки на основной источник питания. Возникает при действующем значении тока в сети выше максимально допустимого значения ($I_{\text{действ}} > I_{\text{макс}}$). ГНЭ начинает работать в режиме «разряд», отдавая электроэнергию в сеть, тем самым разгружая основной источник питания;

3 – режим работы с пониженной нагрузкой в результате снижения нагрузки на основной источник питания. Возникает при действующем значении тока в сети ниже минимального установленного значения ($I_{\text{действ}} < I_{\text{мин}}$). ГНЭ работает в режиме «заряд», накапливая электроэнергию и загружая основной источник питания до номинальной нагрузки;

4 – аномальный режим работы (ГНЭ отключен и не готов к работе, аккумуляторные батареи и суперконденсаторные батареи разряжены).

На рисунке 5 представлена логическая схема работы гибридных накопителей электроэнергии, на основе перечисленных режимов работы.

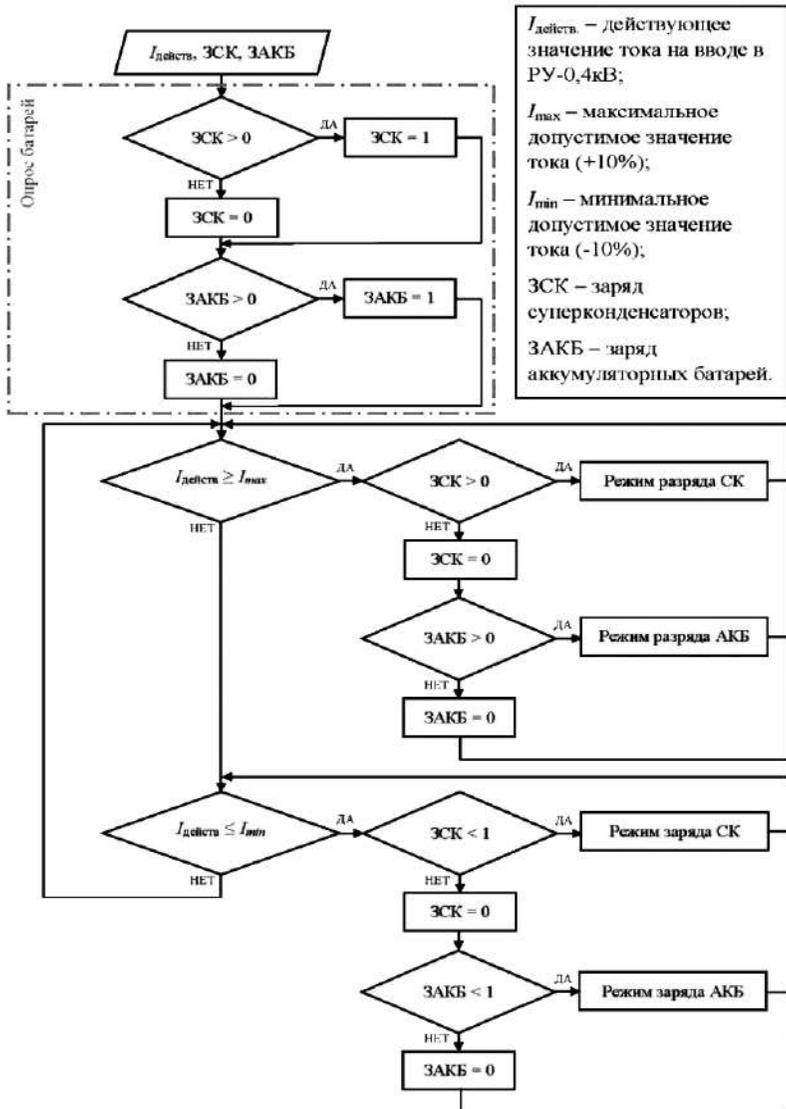


Рис. 5. Логическая схема работы ГНЭ

Выводы

1. Оптимально располагать ГНЭ на втором уровне системы электроснабжения предприятия.

2. Выделено четыре основных режима работы ГНЭ, на основе которых построена логическая схема. Следующим этапом необходимо проверить полученную логику работы накопителей электроэнергии с помощью программного моделирования.

Литература

1. **Бердников Р.Н., Фортов В.Е., Сон Э.Е., Шакарян Ю.Г.** Гибридный накопитель электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов // Энергия единой сети. 2013. № 2 (7). С. 40–51.

2. **Распределенная** энергетика в России: потенциал развития: монография / Хохлов А., Мельников Ю., Веселов Ф. и др. // М.: Энергетический центр МШУ Сколково, 2018. 89 с.

3. **Куликов А.Л.** Проблемы и особенности распределённой электроэнергетики / Куликов А.Л., Осокин В.Л., Папков Б.В. // Вестник НГИЭИ. 2018. № 11. С. 123–136.

4. **Васенин А.Б., Крюков О.В., Титов В.Г.** Автономная система бесперебойного электроснабжения, использующая возобновляемый источник энергии // Патент на полезную модель RU 113615 U1, 20.02.2012.

5. **Vasenin A.B., Kryukov O.V., Serebryakov A.V.** Adaptive control algorithms of autonomous generator complexes // В книге: Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components. Труды МКЭЭЭ-2016. 2016. С. 133–135.

6. **Серебряков А.В., Крюков О.В.** Интеллектуальные ветроэнергетические установки для автономных систем электроснабжения: монография // Нижний Новгород. НГТУ. 2014.

7. **Kryukov O.V., Serebryakov A.V.** Active and adaptive algorithms of autonomous wind power plants control and monitoring // В сб.: 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016. Proceedings. 2016. С. 7911445.

8. **Васенин А.Б., Степанов С.Е., Подшивалов Е.С.** и др. Автономные системы электроснабжения постоянного тока с возобновляемыми источниками энергии // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2023. № 7 (168). С. 16–25.

9. **Крюков О.В., Гуляев И.В., Подшивалов Е.С.** Энергосбережение с использованием гибридных накопителей на объектах АПК // В сб.: Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Материалы ВНК. Иркутск. 2023. С. 391–395.

10. **Подшивалов Е.С., Крюков О.В.** Параметризация и конфигурация гибридных накопителей электроэнергии на промышленных объектах АПК // В сб.: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения). Материалы МНТК. Иваново: ИГЭУ. 2023. С. 88–91.

*С. А. Хорьков, horkov_07@mail.ru, УдГУ, г. Ижевск,
А.Д. Бизяев, ar.bizyaev.1999@gmail.com,
ООО «Инвестэнерготранс», Ижевск,
Ю.Б. Чукавин, chukavinyp@ietrans.ru, УдГУ, Ижевск*

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАБОЧЕГО МЕСТА ЭНЕРГОЦЕНТРА НА БАЗЕ ПАЭС-2500 С ПОМОЩЬЮ ОПЕРАТОРНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Автономные источники электрической энергии на базе ПАЭС-2500 получили широкое распространение в нефтегазодобывающей отрасли. Они разработаны давно, их системы управления реализованы на старой элементной базе. С целью повышения эффективности источников их дорабатывают на основе современных микроконтроллеров. Модернизированные ПАЭС-2500 имеют улучшенные технические и эксплуатационные характеристики [1].

Для увеличения установленной мощности несколько автономных источников электрической энергии объединяют в одном энергоцентре. Такой энергоцентр, построенный на базе модернизированных ПАЭС-2500, должен иметь современную систему контроля и управления. С этой целью создают многофункциональное автоматизированное рабочее место (АРМ) энергоцентра.

Опыт разработки такого АРМ приведен в настоящей статье. Традиционно АРМ занимает верхний уровень в трехуровневой автоматизированной системе управления технологическими процессами (АСУ ТП). Нижний или полевой уровень представляет собой уровень агрегатов, средний уровень или уровень контроля и управления включает программируемые логические контроллеры (ПЛК) и/или операторные панели, верхний уровень или уровень диспетчеризации представляет собой SCADA-систему, он тесно связан со вторым уровнем и включает собственно АРМы. На данном этапе разработки АСУ ТП энергоцентра имеется два нижних уровня, поэтому АРМ связано со средним уровнем контроля и управления, который является в этом случае верхним уровнем.

Для контроля за технологическими параметрами и работой систем и агрегатов электростанции на базе ПАЭС-2500 на ней устанавливают следующие контрольно-измерительные приборы и датчики: амперметры и вольтметры; тахометры и их датчики; указатели давления масла, топлива и температуры масла и их датчики; указатели температуры газа за турбиной двигателя с термопарами; частотомеры; киловаттметры; манометры; счетчики электроэнергии; фазометры и другие приборы.

Поскольку энергоцентр включает несколько источников электрической энергии, то количество контролируемых параметров, а, следовательно, и каналов передачи информации, кратно возрастает. Оператор энергоцентра должен не только наблюдать за работой источников, но и иметь возможность воздействовать на объекты контроля, т.е. управлять ими. В этом случае число каналов передачи информации значительно увеличивается.

В немодернизированных ПАЭС-2500 в системе управления отсутствуют микроконтроллеры и возможность для передачи информации на пульт энергоцентра ограничена. На рисунке 1 показана структура передачи информации от такого источника.

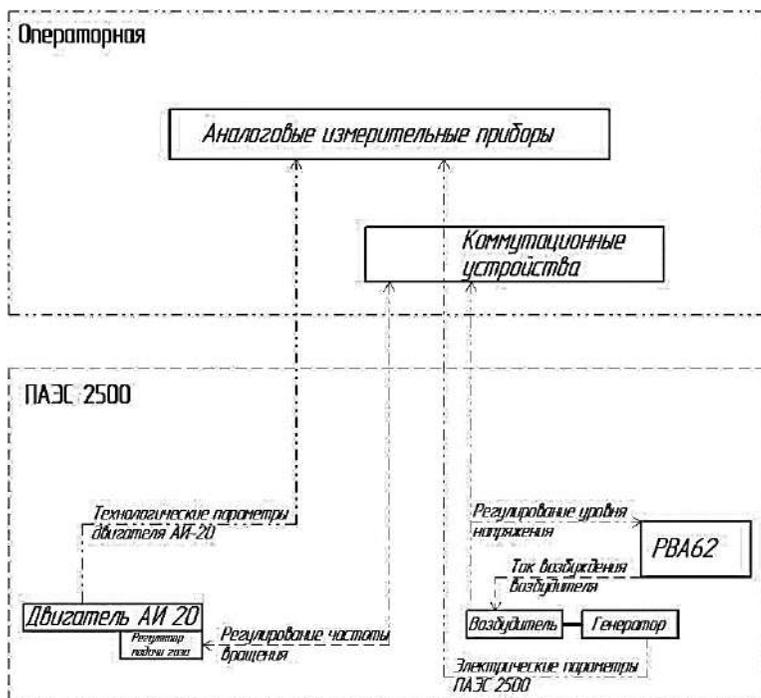


Рис. 1. Структура передачи информации от немодернизированной ПАЭС-2500

Для передачи технологических параметров необходима прокладка кабельных линий непосредственно от датчиков до пульта диспетчера-оператора, с большими затратами на кабельную продукцию. Такой способ передачи информации имеет значительные погрешности при ограниченном наборе передаваемых параметров, при этом аналоговые приборы не позволяют реализовать архивацию параметров и ведение журналов событий. К недостаткам можно также отнести отсутствие возможности анализа переходных

процессов и аварийных ситуаций, отсутствие синхронизации источника энергии с работой другого вспомогательного оборудования энергоцентра. В совокупности данные недостатки значительно усложняют работу оперативного персонала и ведут к увеличению числа аварийных ситуаций.

В качестве приемников технологических сигналов и источников управляющих воздействий возможно использовать операторные панели. Такая панель имеет название «Пульт оператора» или, с учетом английской аббревиатуры, НМІ-human-machineinterface, НМІ панель. Она представляет собой вычислительное устройство с дисплеем, реализованное в виде контроллера.

Обычно панель включает: сенсорный экран, устройства ввода/вывода, память, интерфейсы связи RS-232, RS-422, RS-485. Панель поставляют с предустановленной операционной системой и средой исполнения проектов. Этим операторная панель отличается от управляющего ПЛК, на который, как правило, необходимо устанавливать платные программные пакеты и приложения. Другими словами, НМІ панель – это доступное устройство человеко-машинного интерфейса для управления устройствами и процессами в составе АСУ ТП.

В нашем случае АРМ энергоцентра на базе модернизированных ПАЭС-2500 реализовано на базе НМІ панелей. Структура верхнего уровня передачи информации от ПАЭС-2500 к помещению операторной представлена на рис. 2.

От каждой ПАЭС-2500 передача информации [2] на НМІ панель осуществляют по протоколу Modbus TCP IP. Далее НМІ панель обрабатывает информацию и выводит её на экран. Одной станции ПАЭС-2500 соответствует одна панель НМІ.

НМІ панель отвечает также и за отправку удалённых команд оператора. Осуществлять команды можно как непосредственно на экране самой панели, так и через коммутационные устройства: различные кнопки, переключатели, тумблеры. Для обработки сигналов, поступающих с коммутационных устройств, применяют и технологические микроконтроллеры, установленные на ПАЭС-2500, с набором модулей ввода/вывода. ПЛК может включать различные аналоговые и/или дискретные конфигурации модулей.

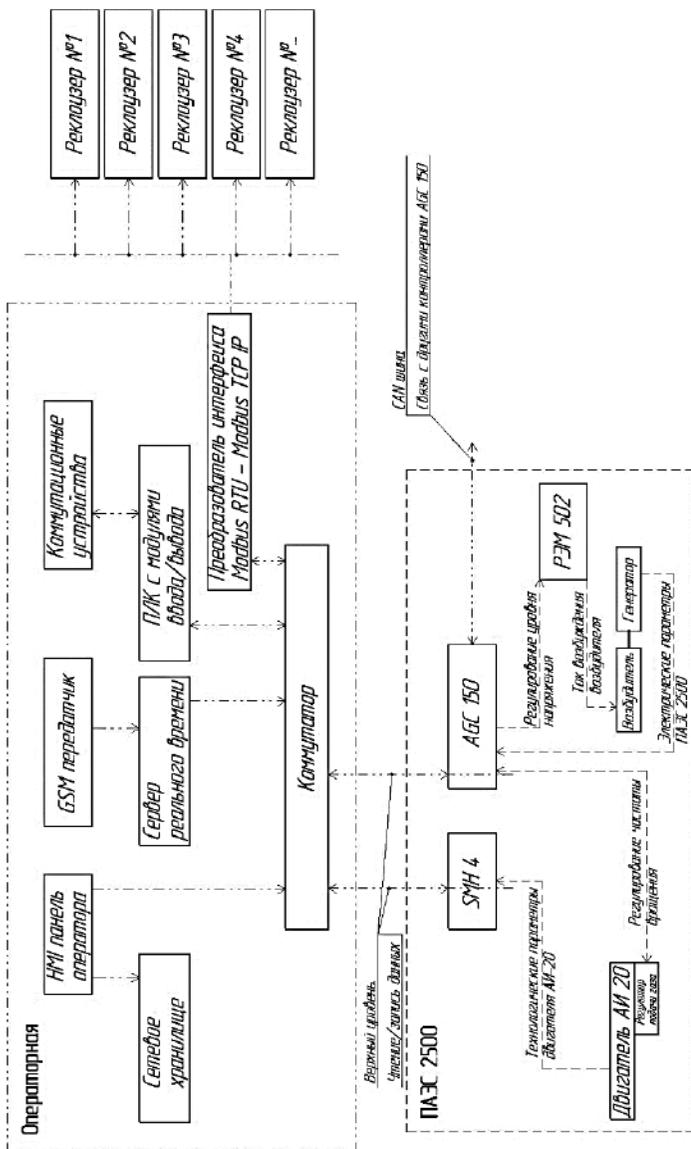


Рис. 2. Структура передачи информации от модернизированной ПАЭС 2500

Для дискретных команд в ПЛК отведены конкретные биты в одном из адресов. Поскольку в современных ПЛК используют 16-битные процессоры, это позволяет многократно увеличивать возможности передачи и обработки информации. В одном адресе может содержаться 16 бит, которые отображают состояние дискретного входа или выхода. Для каждого из дискретных или аналоговых сигналов необходимо проложить провод только от самих коммутационных устройств до модулей технологических ПЛК, далее информацию по протоколу Modbus TCP/IP передают уже по одному кабелю, в большинстве случаев это витая пара.

После преобразования различных коммутаций в битовые значения панель НМІ считывает эти адреса и биты из данных адресов. Далее, по заранее прописанным макросам, панель НМІ отправляет команды непосредственно контроллерам модернизированной ПАЭС-2500. В нашем случае НМІ панель является «мастером», и именно она инициализирует «чтение» и последующую «запись» информации на контроллеры станции.

Также НМІ панель, получая оцифрованные данные от контроллера, отвечающего за аналого-цифровое преобразование сигналов, выводит на экран технологические параметры от датчиков, установленных в станции. Кроме этого, панель так же ведёт архив, записывая данные в сетевое хранилище. Запись параметров в архив позволяет проводить анализ работы оборудования, строить тренды, проводить разбор аварийных ситуаций.

Одной из важных особенностей НМІ панелей является возможность записи различных предупредительных или аварийных событий. Эти записи позволяют персоналу минимизировать ошибки при эксплуатации оборудования и не допускать выхода технологических параметров за установленные пределы. Для подробного и синхронного ведения журнала событий необходимо, чтобы у НМІ панелей было одинаковое время. Для синхронизации времени различных панелей применяют специальные серверы времени, которые работают по протоколам SNTP, NTP и др.

Сервер времени получает значение времени по GSM-каналу от сторонних устройств и записывает его в каждую из НМІ панелей. Запись можно производить и на другие устройства локальной сети, которые используют тот же протокол времени. Такая синхронизация позволяет выстраивать достоверные хронологии переходных и аварийных процессов на оборудование.

АРМ энергоцентра на базе НМІ панелей может осуществлять контроль и управление другим электрическим оборудованием энергоцентра. Например, удобно реализовать управление реклоузерами, установленными на открытом распределительном устройстве, а также комплектными трансформаторными подстанциями при наличии в них технологических ПЛК.

Возможность отслеживания параметров и осуществление управления не только основным оборудованием станций, но и вспомогательным оборудованием позволяет персоналу оперативно оценивать состояние технологических процессов энергоцентра, минимизировать время восстановления после аварийных ситуаций и давать оперативные оценки нештатным ситуациям.

Разработка автоматизированного рабочего места энергоцентра на базе ПАЭС-2500 с помощью операторных панелей обеспечивает повышение качества эксплуатации оборудования, снижает количество аварийных ситуаций, а также позволяет проводить подробный анализ нештатных ситуаций.

Литература

1. **Сальников С.В., Седов Р.А.** Модернизация системы управления газотурбинной электростанции ПАЭС-2500 // Газотурбинные технологии. 2015. № 129. С. 6.

2. **Бизяев А.Д., Хорьков С.А.** Модернизация систем управления передвижных газотурбинных электростанций // Сборник тезисов XII международной научно-практической конференции. Ижевск: Институт Компьютерных Исследований. С. 28–34.

*А.С. Чижов, ChizhovAS@mpei.ru,
М.Е. Вухров, VikhrovMY@mpei.ru,
НИУ «МЭИ», Москва*

ТРЕХФАЗНЫЙ ИСТОЧНИК БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ, ЕГО ОСОБЕННОСТИ И СХЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ

В современном мире информационных технологий и электронных устройств вопрос надежности и стабильности электропитания стоит особенно остро. Сбои в электросети, скачки напряжения, кратковременные отключения и прочие проблемы могут привести к потере важных данных, повреждению оборудования и простою рабочих процессов. В связи с этим использование источников бесперебойного питания становится неотъемлемой частью обеспечения стабильной и безопасной работы ответственных потребителей. Однако необходимо понимать все преимущества и недостатки различных схем бесперебойного питания, подробно сравнить технические параметры, влияющие на надежность электроснабжения потребителей особой группы первой категории. Рост числа потребителей, требующих бесперебойного электропитания, приводит к необходимости искать оптимальные способы его обеспечения.

Одним из показателей качества электроэнергии является несимметрия напряжения в трехфазных системах, которая обусловлена несимметричными нагрузками потребителей или несимметрией элементов электрической сети [4]. Если использовать систему бесперебойного питания большой мощности (порядка 10 кВА), при подключении однофазного ИБП в сеть может возникнуть «перекос» фаз. Поэтому, начиная с мощности 10 кВА, ИБП используются для подключения к трехфазной сети. Для мощностей 10–30 кВА применяют все виды подключения ИБП: чисто однофазные, чисто трехфазные и ИБП с трехфазным входом и однофазным выходом. Все ИБП с мощностью выше 30 кВА имеют трехфазный вход и трехфазный выход.

Одними из самых распространенных являются источники бесперебойного питания с двойным преобразованием энергии. Они позволяют переходить от сетевого режима к автономному (питание от аккумулятора) без прерывания питания. ИБП такого типа обеспечивают синусоидальную форму и симметрию трехфазного выхода, и обычно используются в системах, требовательных к качеству электропитания. На рисунке 1 приведена функциональная схема трехфазного ИБП с двойным преобразованием энергии [1]. Рассмотрим последовательно его блоки.

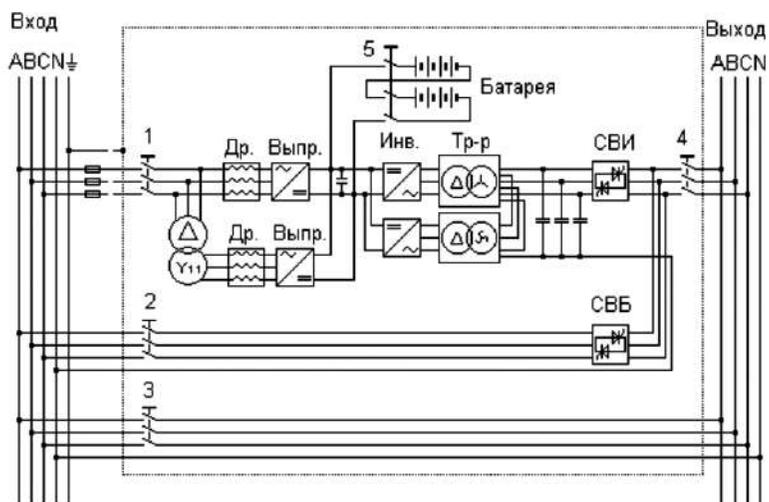


Рис. 1. Трехфазный ИБП с двойным преобразованием энергии

1. *Блок выпрямителей.* Преобразование напряжения из переменного в постоянное в данной схеме осуществляется управляемым тиристорным выпрямителем. Управление происходит за счет изменения времени, в течение которого тиристоры открыты. Так как за 6 полупериодов синусоидального сигнала (два в каждой фазе) проходит полный период трехфазной сети, такой выпрямитель называется шестиимпульсным. К сожалению, он обладает недостатком: входная электрическая сеть и аккумуляторные батареи

тоже получает 6 импульсов и вызывают избыток паразитных гармоник (в основном, 3-й и 5-й), которые уменьшают входное напряжение потребителей и не дают батарее полностью зарядиться. Для борьбы с негативными воздействиями высших гармоник в схеме представлены три схемных решения:

а) на выходе выпрямителя устанавливается конденсатор, который снижает пульсацию напряжения на аккумуляторе;

б) на входе выпрямителя устанавливается дроссель (Др.), который уменьшает импульсные токи, возникающие при открытии тиристорov;

в) подключается еще один шестиимпульсный выпрямитель, на входе которого установлен трансформатор, который сдвигает фазу на 30 градусов; вместе с первым выпрямителем они образуют уже 12-импульсный выпрямитель; соответственно, за полный период трехфазной сети проходит уже 12 импульсов, но практически вдвое меньшей амплитуды.

2. *Аккумуляторная батарея.* Возможно установить любую из разновидностей аккумуляторов:

а) свинцовые – это химический источник тока, состоящий из двух свинцовых пластин, пористого сепаратора и жидкого или гелеобразного электролита;

б) никель-металлогидридные – состоят из двух электродов, положительного (никель-оксид-гидроксид металла) и отрицательного (металлический сплав), а также электролита, который находится между ними;

в) литий-ионные – это химический источник тока, состоящий из двух электродов, между которыми размещаются сепараторы, содержащие гелеобразный или жидкий электролит [2].

3. *Блок инверторов.* Обратное преобразование напряжения происходит за счет транзисторного инвертора, который управляется схемой широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Благодаря использованию двух инверторов повышается надежность ИБП. Если какой-либо элемент любого из инверторов выйдет из строя, оставшийся исправным сможет обеспечить питание нагрузки, но с

большими гармоническими колебаниями. Трансформаторы на выходе инверторов предназначены для сдвига фаз напряжения, к которому подключена нагрузка.

4. *Статический байпас.* Блок статического байпаса состоит из переключателей, собранных на двух трехфазных тиристорах. Когда ИБП работает в нормальном режиме, статический выключатель инвертора (СВИ) замкнут. Статический выключатель байпаса (СВБ) соответственно разомкнут. При аномальном или аварийном режиме работы положения СВБ и СВИ меняются. В момент переключения оба статических переключателя на очень короткое время замкнуты, что позволяет обеспечить безразрывное питание нагрузки [1].

5. *Сервисный байпас.* Классический ручной переключатель для вывода из работы ИБП и питания нагрузки напрямую от сети.

Возможны следующие режимы работы схемы.

Нормальный режим. Нагрузка получает напряжение, удовлетворяющее требованиям показателей качества электроэнергии, благодаря двойному преобразованию энергии: Сеть → Выпрямитель с фильтрами → Инвертор → Нагрузка.

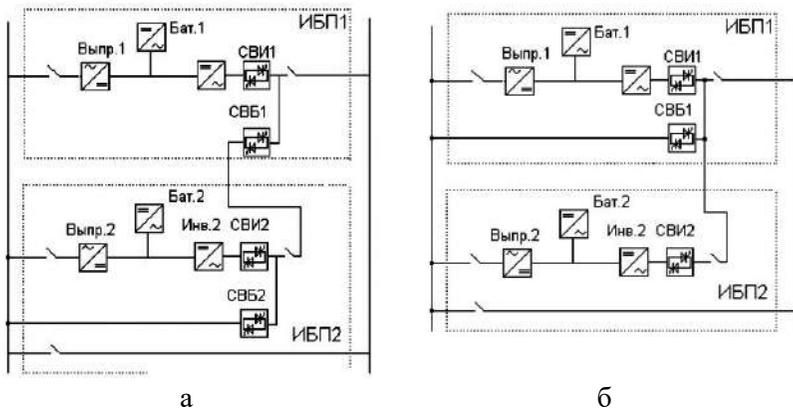
Аварийный режим (от батареи). Когда уровень напряжения становится недостаточным для питания инвертора необходимым током от выпрямителя, ИБП переключается на питание нагрузки от батареи: Батарея → Инвертор → Нагрузка.

Аварийный режим (статический байпас). При выходе из строя любого элемента (кроме самого переключателя для питания через байпас), ИБП через СВБ и СВИ, в автоматическом режиме, переключается на питание нагрузки от сети: Сеть → Нагрузка.

Обслуживание ИБП (сервисный байпас). При профилактических работах или замене ИБП нагрузка в ручном режиме переключается на питание от сети: Сеть → Нагрузка; наличие сервисного байпаса в трехфазном ИБП обязательно.

Возможны следующие схемы реализации ИБП:

ИБП с горячим резервированием. Схема реализации ИБП с горячим резервированием (рис. 2,б) – это модернизированная схема последовательного включения двух ИБП (рис. 2,а) [1].



**Рис. 2. Два последовательно включенных ИБП (а)
и ИБП с горячим резервированием (б)**

Как видно из рис. 2, при последовательном включении двух ИБП байпас СВБ1 не выполняет никаких полезных функций. Соответственно, если его убрать, сделать общий сервисный байпас и синхронизировать его информационным кабелем со вторым ИБП, получится ИБП с горячим пуском. Такой комплекс ИБП обладает как большой надежностью, так и большой стоимостью. Также хочется отметить, что второй ИБП, при нормальной работе первого, всегда находится на холостом ходу. Такая схема обеспечивает три ступени резервирования: ИБП1; ИБП2; статический байпас (при условии, что он переключает на резервную сеть).

Режимы работы ИБП с горячим резервированием следующие.

Нормальный режим. Аналогичен схеме трехфазного ИБП с двойным преобразованием энергии, рассмотренной выше, с тем отличием, что ИБП2 находится на холостом ходу.

Аварийный режим (от батареи 1 или 2). Отличия от предыдущей схемы – в очередности включения батарей: пока не разрядится первая батарея (или не выйдет элемент ИБП1 из строя), работа ИБП2 не начнется.

Аварийный режим (статический байпас). При определенных ситуациях (выход из строя обоих ИБП, разрядка обеих батарей) СВБ1 замкнется, а СВИ 1 и 2 разомкнутся, тем самым система ИБП запитает нагрузку от резервной сети.

Параллельная работа ИБП. В отличие от схемы ИБП с резервированием, при параллельной работе ИБП все установки постоянно питают нагрузку. Входы и выходы нескольких ИБП подключаются к общим входным и выходным шинам. Каждый ИБП сохраняет все свои элементы.

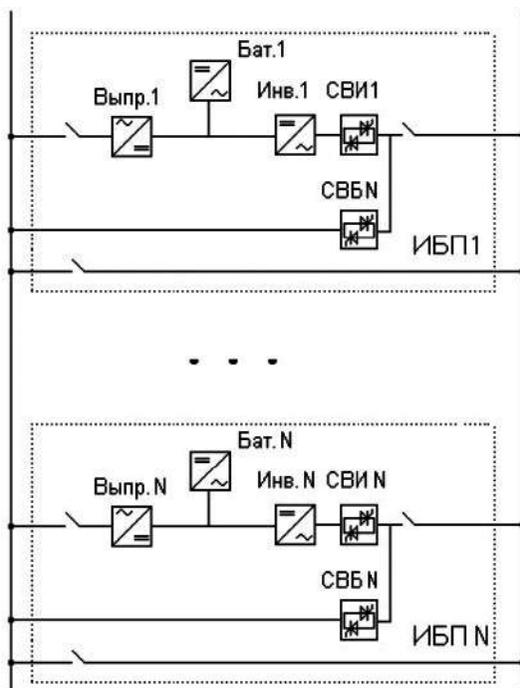


Рис. 3. Параллельная работа ИБП

Суммарная мощность параллельной системы равна произведению мощности одного ИБП на число ИБП в системе. Таким образом, параллельная работа нескольких ИБП может применяться не столько для увеличения надежности системы бесперебойного питания, но для увеличения ее мощности. Повысить надежность при

такой схеме реализации можно за счет увеличения числа параллельно включенных ИБП. Максимальное число таких включений равно 8. Данная реализация получается самой дорогой из рассмотренных выше.

Литература

1. **Лопухин А.А.** Источники бесперебойного питания без секретов. М.: А и Т Системы. 82 с. URL: https://www.ups-info.ru/for_partners/library/istochniki_bespereboynogo_pitanija_bez_sekretov/

2. **Вихров М.Е.** Особенности применения источников бесперебойного питания. М.: Изд-во МЭИ, 2022. 52 с.

3. **Адамия Г.Г., Беркович Е.И., Картавых А.С.** Статические агрегаты бесперебойного питания. М.: Энергоатомиздат, 1992.

4. **ГОСТ 32144-2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Д.А. Аleshин, dmitriy.aleshin.nn@gmail.com,

Д.А. Ульянов, klinkswww@mail.ru,

А.В. Шалухо, shaluh@nntu.ru,

НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

СИСТЕМА АКТИВНОЙ БАЛАНСИРОВКИ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ С МНОГОКООРДИНАТНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ЭНЕРГИИ

В настоящее время каждая область промышленности в том или ином виде использует накопители энергии. Доминирующую позицию на рынке накопителей занимают электрохимические аккумуляторные батареи (АКБ). К их преимуществам можно

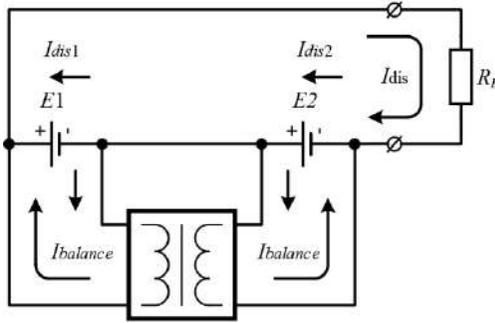
отнести быстрый ввод в работу, возможность эксплуатации без привязки к географии региона, масштабируемость в зависимости от номинальной мощности энергообъекта [1].

При построении мощных накопителей на базе АКБ стараются соблюдать пропорцию между напряжением и током батареи. Основным способом увеличения мощности АКБ является последовательно-параллельное соединение аккумуляторных элементов. Однако из-за несимметрии параметров ячеек при проектировании высоковольтных батарей требуется закладывать системы управления и защиты (*BMS*) из-за повышенной вероятности перезаряда одного из элементов батареи [2, 3].

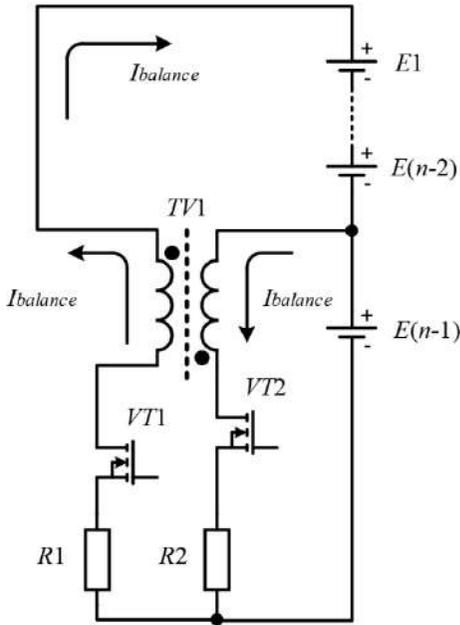
Выделяют два типа *BMS* – пассивные, в которых энергия перезаряженного элемента рассеивается в тепло посредством подключения к нему резистора [4, 5], и активные, энергия в которых перераспределяется между элементами в зависимости от их состояния [6, 7].

Активные системы перераспределения заряда строятся на базе трансформаторных, дроссельных или ёмкостных конвертеров напряжения, с перекачкой энергии в общий накопитель (рис. 1,а) или в один элемент (рис. 1,б) [6–8], обеспечивающих высокоэффективное балансирование АКБ без принудительного рассеивания избыточного заряда гальванического элемента в виде тепла на балластном сопротивлении [4, 5].

Методики и готовые решения в области активной балансировки ограничиваются сравнением напряжений элементов между собой, и логика работы заключается, в основном, в сравнении между собой рядом стоящих аккумуляторных элементов, с включением цепи перекачки энергии при достижении разбаланса между ними в 35 и более мВ. Такой способ балансировки может быть неэффективен при его применении к многоэлементным АКБ, так как с увеличением числа элементов существенно растёт разбаланс отдельных их групп, что приводит к разбалансу АКБ в целом.



а



б

Рис. 1. Активная балансировка АКБ с помощью электромагнитных элементов:

а – трансформаторная балансировка с передачей энергии между ячейками с помощью трансформатора; б – трансформаторная балансировка с передачей энергии от элемента ко всей батарее; $I_{balance}$ – балансирующий ток, I_{dis} – разрядный ток

Для устранения недостатков существующих методов предлагается способ формирования опорного сигнала в системе мониторинга и контроля многоэлементной АКБ с помощью аналоговых и цифровых цепей, предназначенный для управления балластными резисторами и для контуров активной балансировки, с целевой передачей заряда как между элементами АКБ, так и между секциями многомодульной АКБ.

На рисунке 2 продемонстрирован режим передачи энергии от перезаряженных ячеек, отмеченных красным, в общую ёмкость, отмеченную синим цветом.

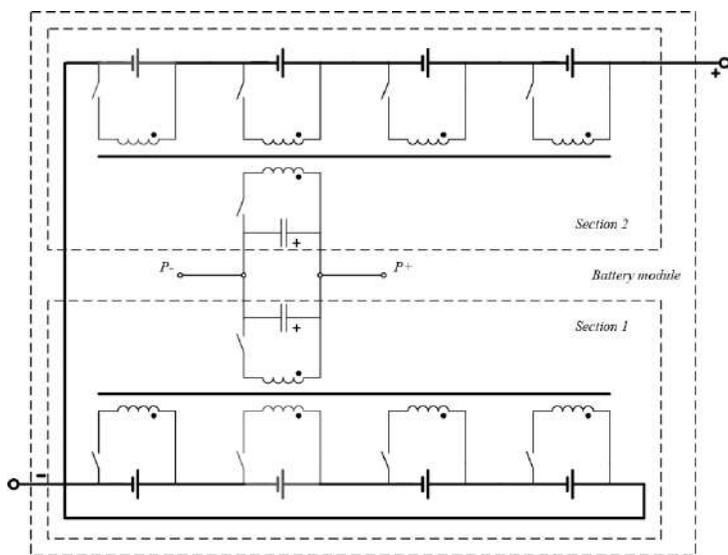


Рис. 2. Цепь активной балансировки на пятиобмоточном дросселе и общем емкостным накопителем для двухсекционной АКБ в первой фазе работы

Многообмоточные дроссели являются составным элементом реверсивной схемы многоканального обратного преобразователя, обеспечивающего направленный процесс выравнивания напряжений АКБ. При этом работа балансира подразделяется на две фазы. В первой фазе производится передача энергии от

элемента с избыточным зарядом в промежуточный емкостный накопитель. Во второй фазе энергия передается от накопителя к элементу с недостаточным зарядом. Двухтактный обратноточный преобразователь позволяет согласовать величину напряжений элементов и накопителя посредством управления величиной энергии, накапливаемой в магнитной системе дросселя в первом такте работы.

Выполнение дросселя или трансформатора с большим количеством обмоток неизбежно приведет к уменьшению коэффициента магнитной связи обмоток и увеличению потока рассеяния. В связи с этим предпочтительно выполнять балансировочную цепь на 4-8 элементов, после чего применять дополнительную обмотку для согласования двух отдельных балансировочных цепей.

На рисунке 3 отмечен сходный процесс передачи энергии, при котором она передается незаряженным элементам от общего емкостного накопителя.

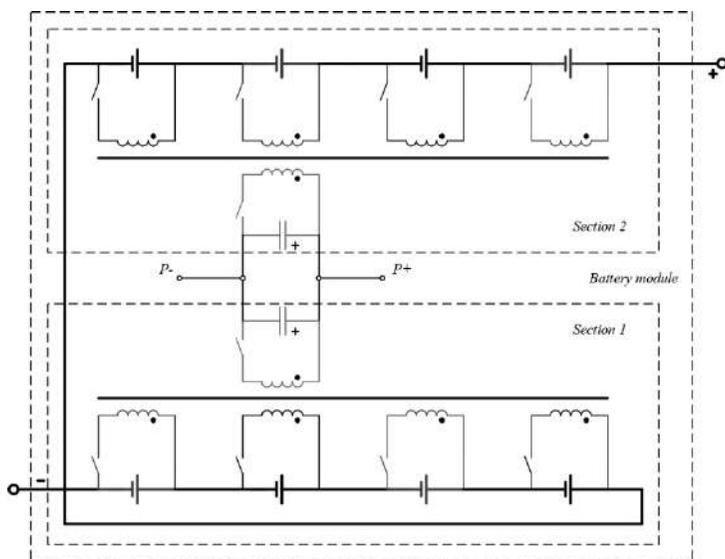


Рис. 3. Цепь активной балансировки на пятиобмоточном дросселе и общем емкостным накопителем для двухсекционной АКБ во второй фазе работы

Разработана имитационная модель *BMS* с активным типом балансировки на четыре разбалансированных элемента АКБ литий-ионного типа для исследования режима работы передачи энергии от заданного элемента одной АКБ к заданному элементу другой АКБ. Силовая часть имитационной модели изображена на рис. 4.

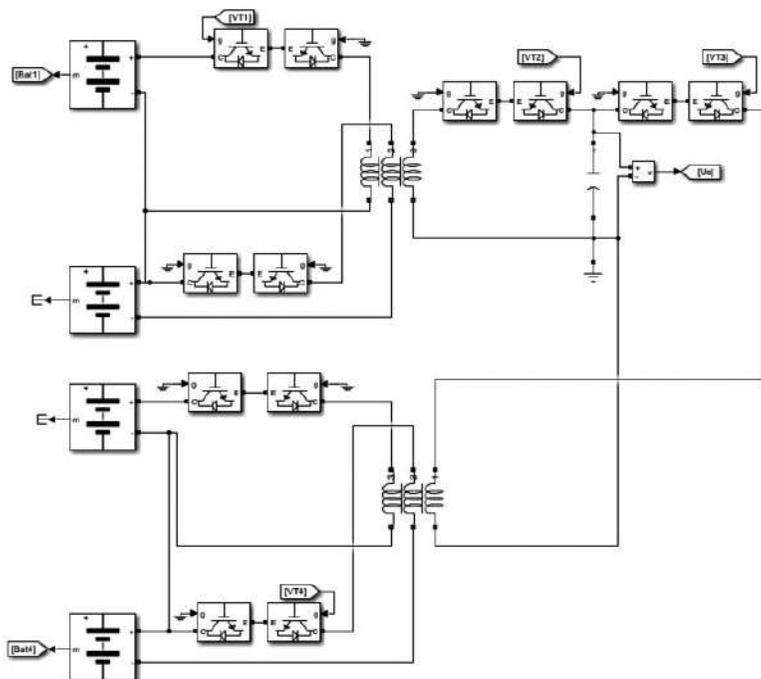


Рис. 4. Simulink-модель активной системы балансировки с многокоординатной передачей энергии

Модель включает в себя четыре элемента АКБ, номинальное напряжение которых 3,7 В, а емкость 1 А·ч. Начальный заряд верхнего левого элемента 52 %, а нижнего правого – 48 %, что имитирует статический разбаланс АКБ. Балансировочные цепи моделируются за счет использования библиотечных моделей *IGBT*-транзистора, конденсатора емкостью 100 мкФ и двух трехобмоточных дросселей, параметры которых приведены в таблице 1.

Основной задачей данной модели является передача энергии от более заряженного элемента к менее заряженному. Система управления балансиром (рис. 5) состоит из блока формирователя импульсов управления балансировочными транзисторами и блока вывода результатов моделирования.

Таблица 1

Результаты расчета режимов

Параметр	Первичная обмотка	Вторичная обмотка № 1	Вторичная обмотка № 2	Намагничивающий контур
R , мОм	1	1	1	0,1
L , мкГн	100	100	100	90

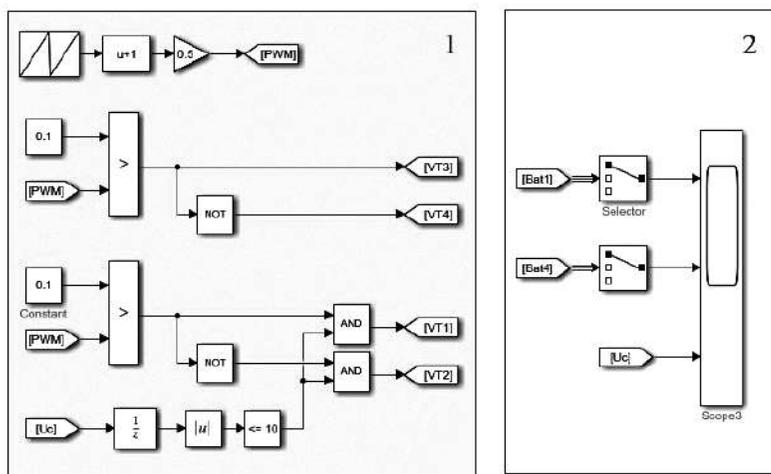


Рис. 5. Имитационная модель системы управления активной балансировки:

PWM – пилообразный периодический сигнал;
 $VT1, VT2, VT3, VT4$ – сигналы управления балансировочными транзисторами; $Bat1, Bat4, U_c$ – измеренные параметры элементов АКБ и напряжение ёмкостного накопителя

Первый блок модели системы управления формирует периодический пилообразный сигнал частотой 1 кГц и амплитудой -1 , затем сигнал поступает на сравнивающее устройство, на второй вход которого подключена константа $(0,1)$, отвечающая за заданную ширину импульсов управления. На выходе сравнивающего устройства имеется периодическая последовательность прямоугольных импульсов с коэффициентом заполнения 10 %, которая поступает на управляющий вход транзистора $VT3$. На управляющий вход транзистора $VT4$ поступает выход сравнивающего устройства через инвертор. Транзисторы $VT3$ и $VT4$ отвечают за передачу энергии от общего накопителя в недозаряженный элемент АКБ. Транзисторы $VT1$ и $VT2$ отвечают за передачу энергии от перезаряженного элемента АКБ в общий накопитель. Импульсы управления данными транзисторами формируются аналогично, за исключением контура ограничения выходного напряжения: при превышении напряжения общего накопителя 10 В запрещается подача импульсов управления на транзисторы $VT1$, $VT2$.

Основным элементом второго блока системы управления является программный осциллограф, который отображает величину состояния заряда как перезаряженного элемента, так и недозаряженного элемента, а также напряжения на общем емкостном накопителе.

Модель активного балансира предназначена для определения того объема энергии, которая может быть передана из перезаряженного элемента в недозаряженный. Результаты моделирования представлены на рис. 6.

На рисунке изображены состояния заряда перезаряженного элемента SOC_1 и недозаряженного элемента SOC_4 , а также напряжение на общей емкости, которое стабилизировано в диапазоне от 9 до 10 В. За 7 секунд от первого элемента потребляется 0,028 % заряда и передается в четвертый элемент 0,02 % заряда. Таким образом, за время балансирования 36 минут перезаряженный элемент можно разрядить на 6 % заряда, а недозаряженный элемент можно зарядить на 4,32 % заряда. Следовательно, коэффициент полезного действия системы достигает 72 %.

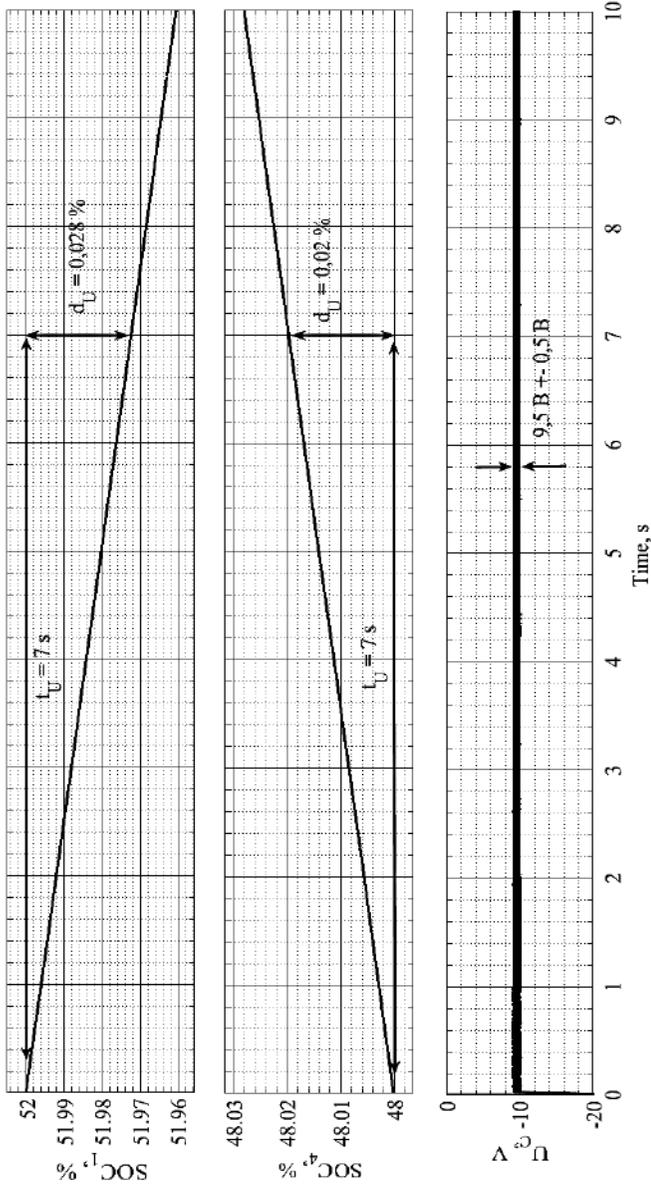


Рис. 6. Временные диаграммы передачи энергии активным балансиром:

t_U – время передачи энергии; d_U – уровень заряда, соответствующий объему переданной энергии

Работа выполнена в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (тема № FSWE-2022-0006).

Литература

1. **Груздин А.И.** Опыт создания батарей на базе литий-ионных аккумуляторов большой ёмкости // Электрохимическая энергетика. 2011. № 3 С. 128–135.

2. **Возмилов А.Г., Соломин Е.В., Калмаков В.А., Андреев А.А.** Анализ причин разбалансировки аккумуляторных батарей // Международный научный журнал альтернативная энергетика и экология. 2012. № 11. С. 65–68.

3. **Возмилов А.Г., Калмаков В.А., Андреев А.А.** Разработка и исследование систем балансировки накопителей на основе химических источников тока // Достижения науки – агропромышленному производству. 2013. С. 65–72.

4. **Лисин Д.В.** Реализация метода поэлементного контроля литий-ионных аккумуляторных батарей при работе на борту космических аппаратов научного назначения // Научное приборостроение. 2018. № 2. С. 69–74.

5. **Ганзбург М.Ф., Груздев А.И., Трофименко В.И.** Особенности построения аппаратуры контроля и защиты высоковольтных литий-ионных аккумуляторных батарей для систем электроснабжения космических аппаратов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2011. № 4. С. 29–34.

6. **Часов А.В.** Система активной балансировки с применением планарной технологии трансформатора для литий-ионных аккумуляторных батарей // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. 2020. С. 121.

7. **Мельничук О.В., Фетисов В.С.** Особенности заряда и разряда литиевых аккумуляторных батарей и современные технические средства управления этими процессами // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. № 2. С. 41–48.

8. **Рыкованов А., Беляев С.** Активные и пассивные системы баланса Li-ion аккумуляторных батарей // Компоненты и технологии. 2014. № 3. С. 121–124.

**ЖИДКОСТНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ВЕСЕННЕ-ЛЕТНЕЕ
ВРЕМЯ ГОДА**

При эксплуатации в весенне-летнее время года в зависимости от местоположения фотоэлектрические модули (ФЭМ) подвержены нагреву. Нагрев солнечных элементов может привести к уменьшению выдаваемой мощности, деградации фотоэлементов и возникновению точек «hot spot», а в будущем – к риску возникновения пожара [1].

Основная причина уменьшения выдаваемой мощности при нагреве ФЭМ заключена в физических основах работы полупроводников. У полупроводников с повышением температуры происходит усиление колебаний атомов относительно положения равновесия и расширение кристаллической решетки. Для многих проводников в области температур, много меньших температур Дебая, температурная зависимость ширины запрещенной зоны описывается эмпирическим соотношением вида [2]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}, \quad (1)$$

где $E_g(0)$ – ширина запрещенной зоны при 0 К; α и β – константы, значения, которых приведены в [2, таб.11.2]; T – температура нагрева.

При температурах, много больших температуры Дебая, зависимость ширины запрещенной зоны становится линейной.

Приведем формулы, которые показывают температурную зависимость материала фотоэлемента [3, 4]:

$$P = P_0(1 + \beta \cdot \Delta T), \quad (2)$$

где P_0 – мощность фотоэлемента при температуре 25 °С, Вт; β – температурный коэффициент мощности, 1/°С; ΔT – повышение температуры фотоэлемента, °С.

Параметры солнечных модулей указываются при стандартных тестовых условиях (обозначаемых STC) [5]. Однако температура солнечного модуля в жаркое время года способна достигать значений до 70 °С. Кроме теплообмена с окружающим воздухом и нагретых конструкций солнечная панель нагревается из-за инфракрасного света, падающего на ФЭМ, который не преобразуется в электроэнергию и нагревает модуль [6].

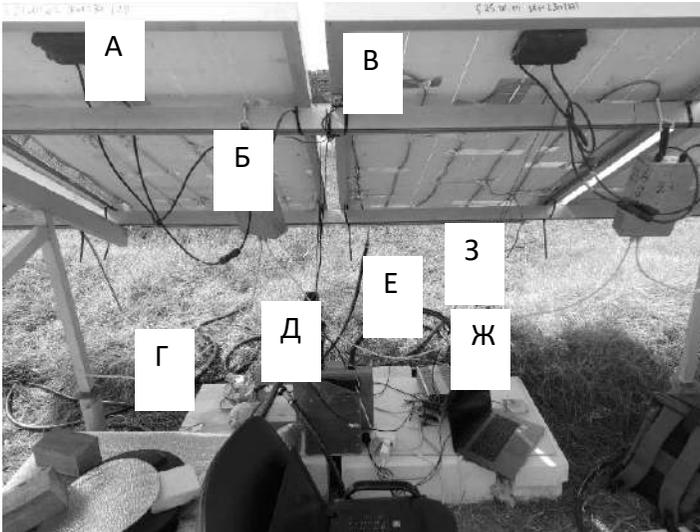
Реальные измерения температуры и выдаваемой мощности солнечных модулей были произведены на п-ве Крым в с. Карьерное 27 июля и 1 августа 2023 г. Температура модулей достигала 71 °С, а мощность солнечной панели, согласно техническим характеристикам, снижалась на 18 % [7].

Существуют различные способы охлаждения модулей [8–10]:

- естественное охлаждение;
- принудительная циркуляция воздуха;
- использование ребер охлаждения;
- открытое жидкостное охлаждение;
- охлаждение с помощью термоэлектрических модулей;
- оптическое охлаждение;
- охлаждение с помощью геля;
- закрытое жидкостное охлаждение.

Оптимальным был выбран закрытый способ жидкостного охлаждения, поскольку, кроме охлаждения модулей, данный способ позволяет отбирать дополнительное тепло от ФЭМ и использовать его для собственных нужд.

Сравнительный анализ закрытых систем жидкостного охлаждения солнечного модуля. Солнечные панели для экспериментальных исследований были установлены на металлических поддерживающих конструкциях [11] под углом 25 градусов согласно широте. СЭС расположена в с. Карьерное, координаты СЭС 45.288909 с.ш., 33.598224 в.д. Состав закрытой системы охлаждения показан на рис. 1.



**Рис. 1. Экспериментальная установка
для измерения характеристик нагретой
и охлаждаемой солнечной панели:**

- А – ФЭМ ЖКМ-230-Р60; Б – Устройство для измерения ВАХ;
- В – змеевик для охлаждения; Г – бак для хладагента в пленке;
- Д – радиатор для охлаждения жидкости; Е – ИПТ и система для измерений;
- Ж – персональный компьютер для измерений;
- З – Система шлангов и датчиков температуры

В качестве трубок для отбора тепла, с целью сравнения и нахождения наиболее эффективного материала, были выбраны трубки из нержавеющей стали (диаметр 15 мм), уложенные змеевиком и коллектором, медная трубка (диаметр 6 мм) и металлопластик (диаметр 16 мм), уложенные в змеевик (рис. 2). Данные материалы были выбраны как наиболее теплопроводные, надежные и недорогие [12].

Для охлаждения циркулирующей жидкости использовался конденсатор от холодильной камеры и радиатор от мотоблока. Конденсатор закопан в землю на глубину 25 см.

Технические характеристики тепловизора, насоса для перекачки хладагента, прибора для измерения радиации, ИПТ, пирометра, Arduino UNO, датчика температуры DS18B20 указаны в источниках [15–22].

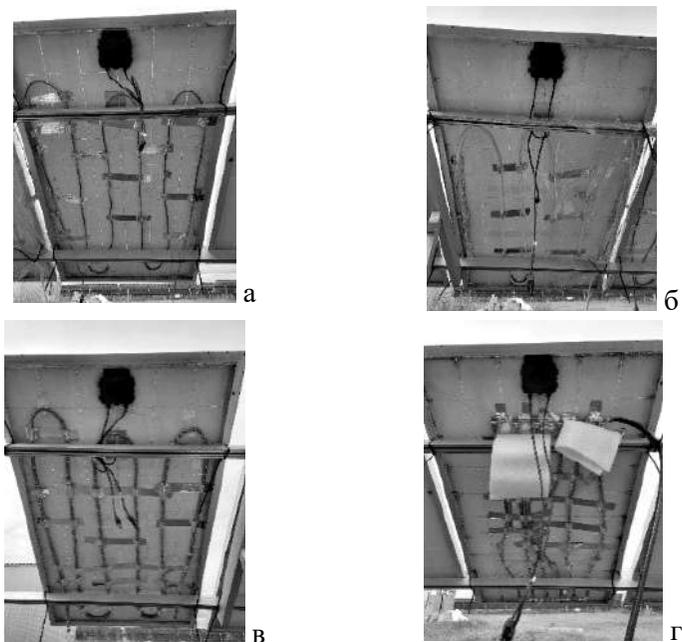


Рис. 2. Способы крепления змеевиков и коллектора к ФЭМ:

а – медная трубка, змеевик; б – металлопластик, змеевик;
в – нержавеющая трубка, змеевик; г – нержавеющая трубка, коллектор

Объем бака с циркулирующей жидкостью 100 л. Черный бак был закрыт отражающей пленкой, чтобы исключить излишний нагрев. В качестве хладагента была использована вода (рис. 1, Г).

Замеры производились 27.07.23 и 01.08.23 с 10:00 до 13:20 по московскому времени каждые 10 минут до и после охлаждения. Прогноз погоды был получен на сайте «Яндекс погода» [23] (рис. 3).

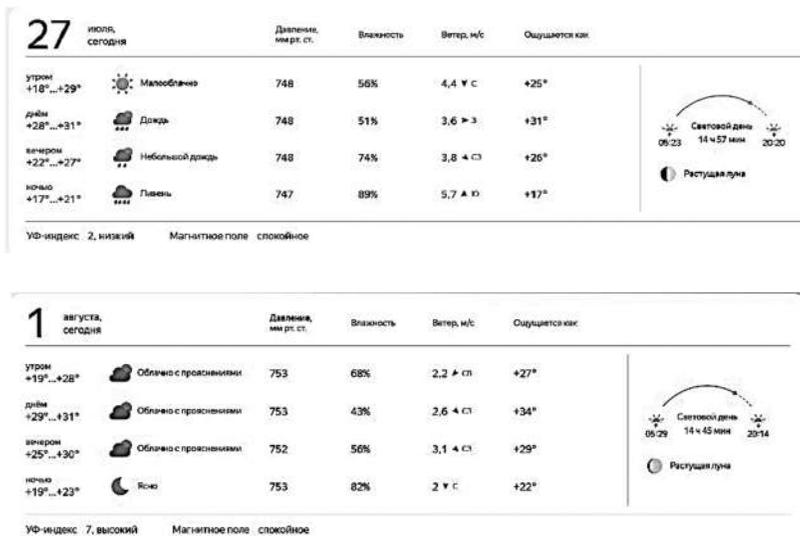


Рис. 3. Прогноз погоды

Измерения проводились до и через 10 минут после охлаждения. Минимальные и максимальные температуры фронтальной поверхности ФЭМ представлены на рис. 4. Из графика видно, что наиболее близкими по температуре являются системы с медной трубкой и нержавеющей трубкой коллекторного типа. Освещенность во время измерений в 13:25 составляла 70 Вт/м², тогда как освещенность для системы из нержавеющей стали в 12:30 составила 820 Вт/м².

Поэтому 01.08.23 ввиду пасмурной погоды были проведены дополнительные измерения для системы из нержавеющей стали коллекторного типа. В 12:25 мощностные характеристики солнечной панели с системой охлаждения коллекторного типа в сравнении с мощностными характеристиками солнечной панели без охлаждения показали увеличение выдаваемой мощности на 3,5 % или на 8 Вт (без учета мощности нагретой жидкости в контуре охлаждения). Результаты представлены на рис. 5.



Рис. 4. График точек максимальной температуры фронтальной поверхности ФЭМ 27.07.23



Рис. 5. Мощностные характеристики ФЭМ:
P1 – мощность ФЭМ с охлаждением, P2 – мощность ФЭМ без охлаждения

Таким образом, наиболее эффективной системой охлаждения является система коллекторного типа с закрытым типом, с применением в качестве герметичного теплопроводного материала Soudal, с охлаждающим контуром в виде конденсатора от холодильной установки. Данная система позволила:

- получить увеличение выдаваемой мощности электроэнергии на 3,5 % или на 8 Вт и приблизиться к значениям эталонного модуля;
- охладить охлаждаемую жидкость с 50 до 28 °С;
- снизить максимальную температуру фронтальной поверхности фотоэлектрических модулей с 66 до 38 °С.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема: «Предиктивное управление потоками энергии электрогенерирующих комплексов Арктики и Крайнего Севера, при стохастических характеристиках потребления и генерации электрической энергии: теория, синтез, эксперимент», код темы: FENG-2023-0001).

Литература

1. **Юдаев И.В.**, Даус Ю.В., Фамага В.В. Возобновляемые источники энергии: учебник для вузов. 2 изд., стер. С.-Петербург: Лань, 2021. 328 с.
2. **Шалимова К.В.** Физика полупроводников. М.: Энергоатомиздат, 1985. 392 с.
3. **Гульков В.Н., Колесниченко И.Д., Коротков К.Е.** Исследование влияния нагрева солнечных модулей на эффективность преобразования излучения // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 1. С. 10–16.
4. **Велькин В.И.** Методология расчета комплексных систем ВИЭ для использования на автономных объектах: монография. Екатеринбург: УрФУ, 2015. 226 с.

5. **Елистратов В.В., Кузнецов М.В.** Теоретические основы нетрадиционной и возобновляемой энергетики: учебное пособие. Ч. 1: Определение ветроэнергетических ресурсов региона. С.-Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2004. 59 с.

6. **STC, NOCT и PTC – что это такое?** [Электронный ресурс]. URL:<https://www.solarhome.ru/basics/solar/pv/ptc-conditions.htm?ysclid=llzzjjar7q144630607> (дата обращения: 01.09.2023).

7. **JinkoSolar JKM230P-60 Manuals** [Электронный ресурс]. URL:<https://www.manualslib.com/products/Jinkosolar-Jkm230p-60-4186139.html> (дата обращения: 01.09.2023).

8. **Махсумов И.Б.** Разработка энергокомплекса на базе возобновляемых источников энергии для электроснабжения труднодоступных районов республики Таджикистан с использованием термозащиты солнечных модулей: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Южно-Уральский Государственный Университет. Челябинск, 2020. 209 с.

9. **Тханг Л.В., Шагин А.В.** Активные методы водяного охлаждения для солнечного фотоэлектрического модуля // Инженерный вестник Дона. 2020. № 2. С. 12–25.

10. **Sunarno A. Rakin, S. Suherman A.** Passive Cooling System for increasing Efficiency of Solar Panel Output // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1379. P. 1–6. <https://doi:10.1088/1742-6596/1373/1/012017>.

11. **Бессель В.В., Кучеров В.Г., Мингалеева Р.Д.** Изучение солнечных фотоэлектрических элементов: учеб.-метод. пособие. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2016. 90 с.

12. <https://srbu.ru/otoplenie/1755-truby-dlya-teplogo-pola-kakie-luchshe.html>

13. https://soudal.ru/images/stories/soudal/tds-diy/tds_fix-all-classic_ru.pdf?ysclid=llzzvlqofs882636174

14. <https://srbu.ru/stroitelnye-materialy/1898-vidy-kleya.html>

15. <https://sl.aliexpress.ru/p?key=CImuZ2E>

16. https://www.tes.com.tw/en/product_detail.asp?seq=285

17. <https://www.manualslib.com/products/Gophert-Cps-6011-10879209.html>
18. <https://sl.aliexpress.ru/p?key=HHmuZ9l>
19. <https://www.arduino.cc/en/hardware>
20. <https://fornk.ru/4907-dht11-datchik-temperature-i-vlazhnosti-datasheet-raspinovka-biblioteka-dlya-arduino/>
21. <https://teplo-energetika.ru/arduino/ds18b20-rus.pdf>
22. <https://sl.aliexpress.ru/p?key=nMwQZ4j>
23. Прогноз погоды в Карьерном [Электронный ресурс]. <https://yandex.ru/pogoda/karernoe>

*П.А. Алешин, pavel.aleshin.0303@mail.ru,
А.В. Серебряков, artemserebryakov@yandex.ru,
Н.А. Серебряков, ardtan2020@yandex.ru,
НГТУ им. П.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород*

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ МНОГООБМОТОЧНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

В России около 70 % территорий не имеют централизованного электроснабжения. Большая часть таких территорий расположена в районах с суровыми климатическими условиями: Сибирь, Дальний Восток и Крайний Север. Качественное и надежное энергообеспечение этих районов является одной из главных задач государства. Электроснабжение потребителей децентрализованных зон осуществляется с помощью малой энергетики. Под малой энергетикой подразумеваются микро-электростанции, миниэлектростанции и малые электростанции. Значительную долю малой энергетики в России составляют дизельные электростанции, их примерное количество 47 тыс. штук, а установленная мощность достигает 15 ГВт. Большинство дизель-генераторных установок (ДГУ) нуждается в модернизации [1].

Старые дизель-генераторные установки имеют релейную логику управления и защиты, их пульт управления по размерам не уступает самой генераторной установке. Контроллер генераторной установки – ее мозговой центр, и он должен отвечать самым современным требованиям.

Одним из основных недостатков известных структур дизель-генераторных установок переменной скорости вращения является наличие повышающего трансформатора. Напряжение на выходе синхронного генератора возможно сохранить на уровне номинального значения только за счет постоянства частоты вращения вала двигателя внутреннего сгорания (ДВС). При уменьшении частоты вращения вала напряжение и частота на выходе синхронного генератора также будут уменьшаться. Для того, чтобы получить стабильное выходное напряжение и стабильную частоту вращения вала ДВС, можно установить повышающий трансформатор, но это приведет к снижению КПД автономной электростанции, увеличению расхода топлива, а также к ухудшению массогабаритных показателей.

Для исключения повышающего трансформатора можно применить многообмоточный синхронный генератор, который при изменении частоты вращения вала сможет обеспечивать стабильную амплитуду выходного напряжения.

Одним из способов, с помощью которого можно стабилизировать напряжение генератора, является ступенчатое изменение числа витков обмоток статора с электромагнитным возбуждением путем переключения его обмоток в сочетании с регулированием потока возбуждения машины. В данном случае частота выходного напряжения многообмоточного синхронного генератора будет прямо пропорциональна частоте его вращения. При этом стоит учитывать, что изменение тока возбуждения позволяет изменять выходное напряжение в диапазоне $\pm 10\%$ без негативных последствий для электродвигателя.

Была разработана структурная схема дизель-генераторной установки переменной скорости вращения на основе многообмоточного синхронного генератора (рис. 1).

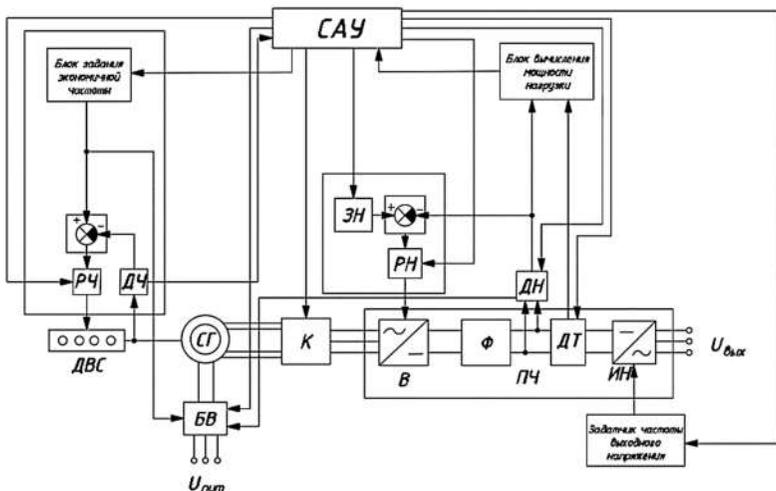


Рис. 1. Структурная схема дизель-генераторной установки переменной скорости вращения

Автономная электростанция переменного тока состоит из последовательно соединённых элементов: двигатель внутреннего сгорания (ДВС); многообмоточный синхронный генератор (СГ), в данной схеме применяется многообмоточный синхронный генератор с двумя обмотками статора; коммутатор (К); преобразователь частоты (ПЧ). Управляемый выпрямитель (В), фильтр (Ф), датчик тока (ДТ) и инвертор напряжения с выходными выводами (ИН) образуют ПЧ. Регулятор частоты вращения вала ДВС (РЧ) и датчик частоты (ДЧ) подключены к ДВС, эти элементы образуют блок формирования оптимальной частоты вращения вала ДВС, в него также входят сумматор сигналов и блок задания экономичной частоты вращения вала ДВС (БЗЭЧ). Выход блока задания экономичной частоты вращения вала ДВС соединен с блоком возбуждения многообмоточного синхронного генератора с выводами подключения питания, который, в свою очередь, соединен с обмоткой воз-

буждения многообмоточного синхронного генератора. Блок стабилизации напряжения формируется из задатчика напряжения (ЗН), регулятора напряжения (РН) и сумматора сигнала. Блок стабилизации напряжения соединен с выходом датчика напряжения (ДН), с которым также соединен блок возбуждения многообмоточного синхронного генератора. Инвертор напряжения соединен с выходом блока задатчика частоты выходного напряжения [2].

Система автоматического управления входит в состав автономной электростанции, она подключена к регулятору частоты, блоку задания экономичной частоты вращения вала ДВС, блоку возбуждения, задатчику напряжения, регулятору напряжения, датчику напряжения, датчику тока и задатчику частоты выходного напряжения. Датчик частоты и блок вычисления мощности нагрузки подключены к системе автоматического управления. САУ обеспечивает поддержание постоянства заданных значений.

Сигнал с САУ поступает на блок формирования оптимальной частоты вращения вала ДВС; также САУ подает сигналы на датчик тока и датчик напряжения. Эти элементы измеряют ток и напряжение на выходе управляемого выпрямителя. Блок вычисления мощности нагрузки подключен к системе автоматического управления, и подается сигнал на блок задания экономичной частоты вращения вала ДВС.

В программу работы БЗЭЧ заложены оптимальные данные зависимости частоты вращения вала ДВС от мощности нагрузки, соответствующие минимальному расходу топлива; он задает оптимальную частоту вращения вала ДВС. Из этого следует, что при изменении мощности нагрузки на выходных выводах (и на валу ДВС) частота вращения вала ДВС будет поддерживаться оптимальной, с точки зрения минимального потребления топлива.

Амплитуда и частота переменного напряжения многообмоточного синхронного генератора будут также изменяться в зависимости от мощности нагрузки. Стабилизация амплитуды переменного напряжения на выходных выводах осуществляется

следующим образом: коммутатор обеспечивает подключение выводов обмоток статора многообмоточного синхронного генератора к управляемому выпрямителю в зависимости от сигнала, полученного от САУ. Благодаря управляемому выпрямителю происходит преобразование переменного напряжения в постоянное напряжение.

Стабилизация выходного напряжения управляемого выпрямителя на заданном уровне осуществляется с помощью соответствующего блока; в его состав входит регулятор напряжения, подключенный к сумматору сигналов, на входы которого поступают сигналы с задатчика напряжения и с датчика напряжения. Для сглаживания входного напряжения управляемого выпрямителя на его выходе включена конденсаторная батарея, необходимая также для работы инвертора напряжения. Кроме того, конденсаторная батарея является накопителем энергии и компенсирует пики и провалы энергии в динамических режимах. Выходное напряжение управляемого выпрямителя преобразуется с помощью инвертора в переменное напряжение синусоидальной формы, амплитуда которого равна постоянному напряжению на выходе управляемого выпрямителя [3].

При изменении мощности нагрузки от нуля до номинального значения частота вращения вала ДВС, а, следовательно, и амплитуда напряжения соединенного с ним многообмоточного синхронного генератора, будут меняться в широком диапазоне. Однако за счет того, что синхронный генератор выполнен многообмоточным, и обмотки статора переключаются с помощью коммутатора, диапазон изменения амплитуды напряжения уменьшается в несколько раз. Это достигается тем, что при уменьшении частоты вращения вала ДВС до определенного порогового значения коммутатор подключает к управляемому выпрямителю обмотки статора многообмоточного синхронного генератора с большим числом витков, что обеспечивает увеличение амплитуды напряжения на входе управляемого выпрямителя.

Количество пороговых значений частоты вращения вала ДВС, при которых происходит переключение коммутатора, задается на этапе разработки автономной электростанции, исходя из условия уменьшения диапазона изменения амплитуды напряжения при изменении частоты вращения вала ДВС. Таким образом, входное напряжение управляемого выпрямителя будет меняться в заданном узком диапазоне.

Система автоматического управления дизель-генераторной установкой САУ ДГУ предназначена для измерения уровня жидкости, частоты вращения и температуры с целью формирования на основе измерений команд управления и защиты, а также информационного обеспечения эксплуатации и управления дизелем, оборудованием собственных нужд ДГУ, контроля, защиты и информационного обеспечения эксплуатации технических средств в составе ДГУ.

Блок возбуждения многообмоточного синхронного генератора, получающий питание через выводы подключения питания, формирует ток в обмотке возбуждения многообмоточного синхронного генератора с учетом сигнала от блока задания экономической частоты вращения вала ДВС и от датчика напряжения [5]. Таким образом, при изменении частоты вращения вала ДВС амплитуда переменного трехфазного напряжения на выходных выводах поддерживается на уровне, задаваемом блоком задатчика напряжения. Частота выходного трехфазного напряжения на выходных выводах при изменении частоты вращения вала ДВС поддерживается с помощью инвертора неизменной, на уровне, задаваемом задатчиком частоты выходного напряжения [6, 7].

Выводы. Разработана структурная схема дизель-генераторной установки переменной скорости вращения, позволяющая увеличить КПД установки, уменьшить расход топлива ДВС, а также улучшить массогабаритные показатели автономного генераторного комплекса. Выполнение синхронного генератора

многообмоточным, включение между обмотками статора синхронного генератора и управляемым выпрямителем коммутатора позволяет улучшить показатели автономной электростанции.

Исследование выполнено в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE-2022-0005).

Литература

1. **Обухов С.Г.** Повышение эффективности комбинированных автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук.

2. **Патент** на полезную модель RU 168615 U1, МНК H02P 9/48 (2006.1). Автономная электростанция переменного тока / А.Б. Дарьенков, С.А. Гузев // Заявл. №2016118233 от 11.05.2016; опубл. 13.02.2017. Бюл. № 5.

3. **Патент** на изобретения RU 2773744 C1, МНК H02P 9/48 (2006.1). Автономная электростанция переменного тока / А.Б. Дарьенков, И.Е. Бердников, А.П. Слuzов // Заявл. №2021138720 от 24.12.2021; опубл. 08.06.2022. Бюл. № 16.

4. **Анучин А.С., Бриз Ф., Демидова Г.Л., Рассылкин А.С., Рассудов Л.Н.** Написание и оформление научных публикаций. М.: Издательский дом МЭИ, 2022. 92 с.

5. **Обухов С.Г.** Системы автономного электроснабжения на основе дизельных электростанций: учебное пособие. Томск: ТПУ, 2013 г.

6. **Кочеганов Д.М., Стеклов А.С., Серебряков А.В.** Структура энергоэффективной ветро-дизель энергетической установки переменной скорости вращения // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 2. С. 42–52.

7. **Серебряков А.В.** Оптимизация диагностирования электромеханической части ветроэнергетических установок / Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. № 3. С. 39–46.

*В.В. Ростовский, vlad.rostovskiy.01@gmail.com,
А.В. Серебряков, artemserebrykov@yandex.ru,
НГТУ, г. Нижний Новгород*

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АВТОНОМНОГО ГЕНЕРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ МНОГООБМОТОЧНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

За прошедшие 10 лет в России достаточно высокими темпами внедряются автономные генераторные комплексы (АГК), предназначенные для выработки электроэнергии. Основным требованием при внедрении дизельных или бензиновых агрегатов является наличие данного вида топлива на месте их эксплуатации [1].

Для соответствия высоким требованиям по показателям мощности, хорошей топливной экономичности и уровню выбросов вредных веществ все современные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) вынуждены использовать в своем составе большое количество сложных и дорогостоящих систем, в основе которых лежат как механические узлы и агрегаты (например, регулировка фаз газораспределяющего механизма), так и микропроцессорные системы (например, электронное управление углом опережения зажигания), действия которых направлены на повышение эффективности работы двигателя [2].

Стоит отметить, что с улучшением показателей конкретного ДВС увеличивается его себестоимость, следовательно, дороже его обслуживание и ремонт, и ниже ресурс. Следует отметить низкую ремонтпригодность современных двигателей ввиду их конструктивных особенностей и отсутствия некоторых запчастей ремонтных размеров в продаже [3].

Как правило, в составе такого генераторного комплекса помимо двигателя внутреннего сгорания используются: синхронный генератор, канал преобразования энергии – преобразователь частоты (ПЧ), система автоматического управления (САУ), аппаратура для считывания показателей системы (датчики напряжения, тока, оборотов и др.).

Разработка автономного генераторного комплекса. Данный АГК содержит последовательно соединенные ДВС, многообмоточный синхронный генератор с двумя обмотками, коммутатор, преобразователь частоты, который состоит из управляемого выпрямителя, конденсаторной батареи (фильтра), датчика тока, инвертора. К ДВС подключены регулятор частоты РЧ и датчик частоты ДЧ вращения вала ДВС и сумматор сигналов, они подключены к блоку экономичной частоты вращения вала ДВС. Блок возбуждения многообмоточного синхронного генератора с выводами подключения питания соединен с обмоткой возбуждения многообмоточного синхронного генератора и с выходом блока задания экономичной частоты вращения вала ДВС.

Принцип работы заключается в том, что ДВС вращает генератор, в канале ПЧ происходит преобразование энергии к стандартному виду 380 В, 50 Гц. К САУ подключен блок вычисления мощности нагрузки, и в зависимости от ее значения подается сигнал через САУ на блок задания экономичной частоты вращения вала ДВС. При изменении мощности нагрузки от нуля до номинального значения частота вращения вала ДВС, а следовательно, амплитуда и частота напряжения соединенного с ним многообмоточного синхронного генератора, будут меняться в широком диапазоне. Однако за счет того, что синхронный генератор выполнен многообмоточным, диапазон изменения амплитуды напряжения уменьшается. Это достигается тем, что при уменьшении частоты вращения вала ДВС до определенного порогового значения коммутатор подключает к управляемому выпрямителю обмотки статора многообмоточного синхронного генератора с большим числом витков, что обеспечивает увеличение амплитуды напряжения на входе ПЧ.

Для исключения постоянных переключений обмоток генератора реализовано регулирование выходного напряжения при помощи изменения тока возбуждения синхронного генератора. Максимально допустимый предел регулирования напряжения синхронного генератора изменением тока возбуждения составляет $\pm 10\%$ [4, 5].

Разработка алгоритма работы автономного генераторного комплекса. Для обеспечения нормального функционирования генераторного комплекса был разработан алгоритм работы. Алгоритм представлен в виде блок-схем. Он обеспечивает стабильную работу установки (рис. 1) и контроль выходного напряжения за счёт регулирования тока возбуждения (рис. 2) и коммутации обмоток синхронного генератора в зависимости от отклонения напряжения, когда регулирование током возбуждения становится невозможным (рис. 3). Кроме того, обеспечивается задание и поддержка максимально экономичных оборотов ДВС для обеспечения топливной экономичности и экологичности [6].

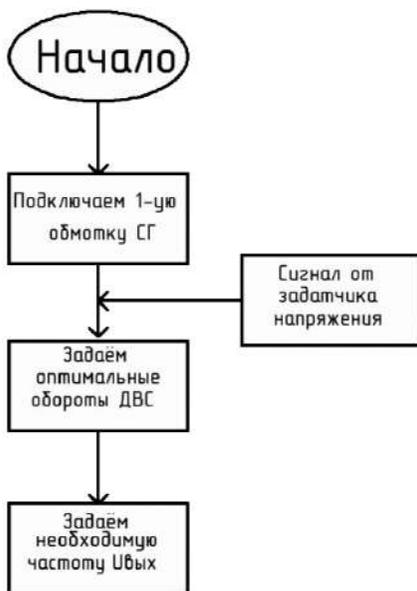


Рис. 1. Фрагмент алгоритма работы – обеспечение стабильности

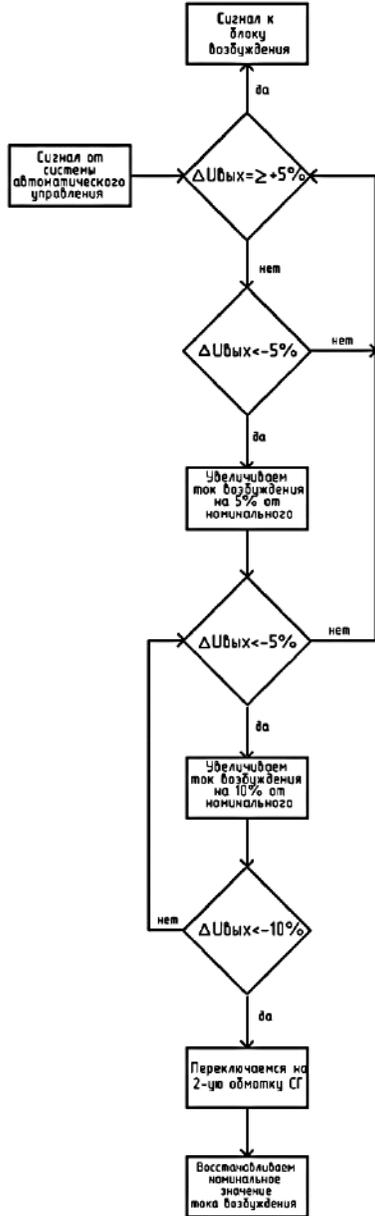


Рис. 2. Фрагмент алгоритма работы – контроль выходного напряжения за счёт регулирования тока возбуждения

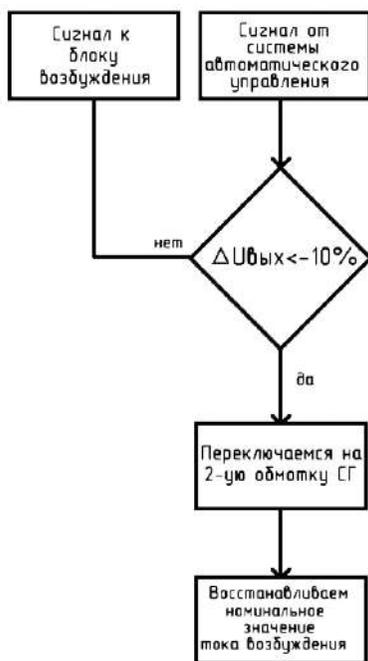


Рис. 3. Фрагмент алгоритма работы – коммутация обмоток синхронного генератора в зависимости от отклонения напряжения

Разработка алгоритмов диагностирования. Подобные АГК могут быть расположены в местах, где не будет присутствовать квалифицированный обслуживающий персонал. Для обеспечения максимальной ремонтпригодности и надёжности данного комплекса необходимо разработать алгоритмы диагностирования, которые позволят обнаружить и устранить неисправность с наименьшими затратами [7].

Для построения алгоритма диагностирования была составлена логическая модель комплекса, которая показывает взаимосвязи между элементами, построена таблица функций неисправностей, которая показывает, какие элементы остаются исправными при одном заведомо неисправном элементе [8]. Логическая модель АГК представлена на рис. 4.

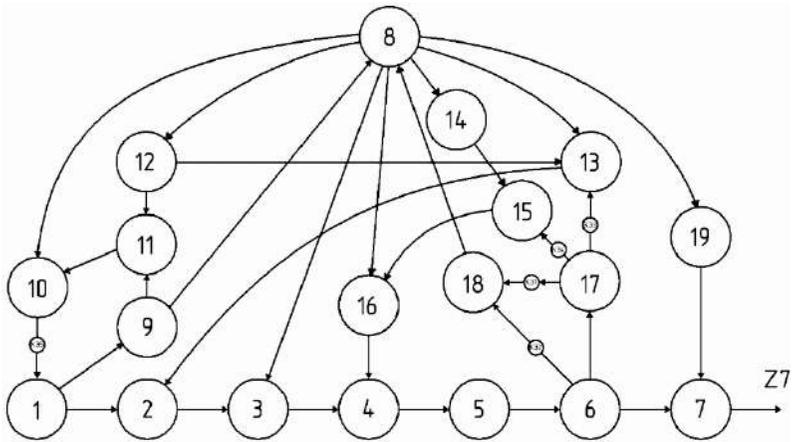


Рис. 4. Логическая модель:

- 1 – ДВС; 2 – синхронный генератор; 3 – коммутатор;
 4 – выпрямитель; 5 – фильтр; 6 – ДТ; 7 – АИН; 8 – САУ; 9 – ДЧ;
 10 – РЧ; 11 – сумматор 1; 12 – блок задания экономической частоты (БЗЭЧ); 13 –
 БВ; 14 – ЗН; 15 – сумматор 2; 16 – РН; 17 – ДН;
 18 – блок вычисления мощности нагрузки (БВМН);
 19 – задатчик частоты выходного напряжения (ЗЧВН)

На основе экспертной оценки для диагностирования был выбран метод половинного разбиения. Суть метода заключается в том, что при N функциональных элементах с равными ценами элементарных проверок необходимо выбрать первым тот контролируемый элемент, элементарная проверка которого несёт максимальное количество информации о техническом состоянии объекта диагностирования. Каждая следующая проверка выбирается по тому же принципу, т.е. делит пополам оставшееся количество блоков после выполнения предыдущей проверки в зависимости от её результатов [9]. Алгоритм диагностирования представлен на рис. 5.

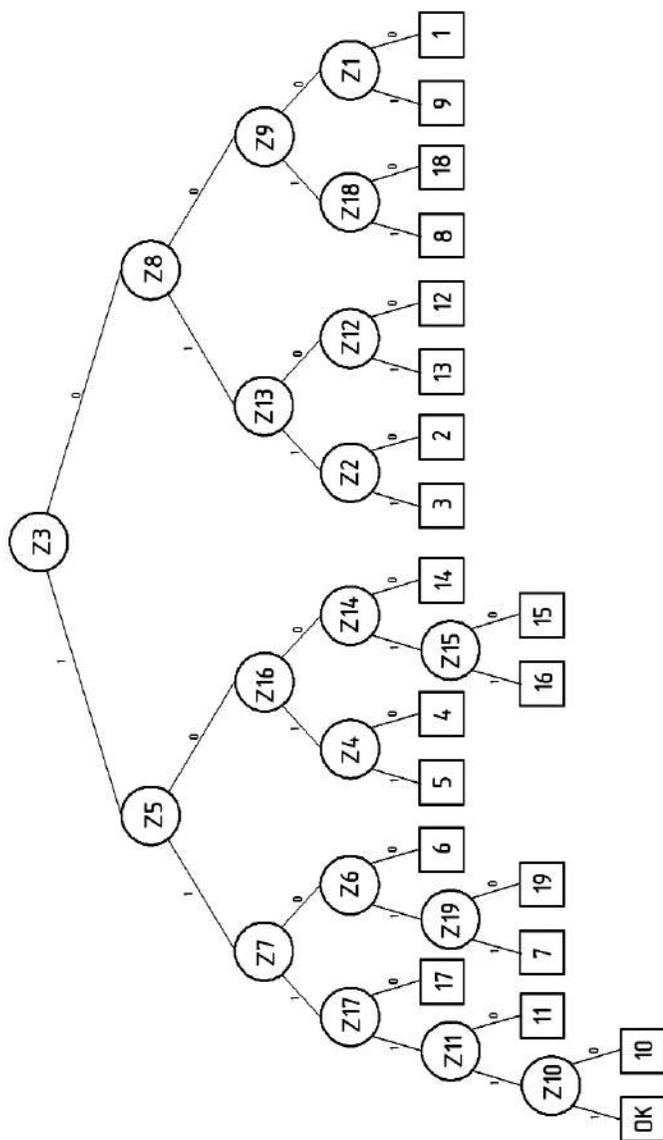


Рис. 5. Алгоритм диагностирования

Вывод: в данной работе предложена функциональная схема АГК на базе многообмоточного синхронного генератора для реализации электроснабжения объекта, находящегося вдали от централизованного электроснабжения. Разработан алгоритм работы, учитывающий все возможные режимы работы комплекса, а также обеспечивающий максимальную топливную экономичность и экологичность. Разработан алгоритм диагностирования, позволяющий обнаружить неисправность каждого из элементов комплекса.

Исследование выполнено в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE-2022-0005).

Литература

1. **Редько И.Я., Малоземов А.А., Казанцев М.А.** Состояние, проблемы и перспективы применения средств малой энергетики на базе поршневых двигателей внутреннего сгорания для нефтедобывающей отрасли // Малая энергетика. 2006. № 1–2.

Салихов А.А. Неоцененная и непризнанная «малая» энергетика. М.: Издательство «Новости теплоснабжения», 2009. 176 с.

2. **Шустров Ф. А.** Анализ конструктивных решений по созданию транспортной энергоустановки на базе свободнопоршневого двигателя внутреннего сгорания // Молодой ученый. 2016. № 20 (124).

3. **Патент** на описание полезной модели RU 168615 U1, МНК Н02Р 9/48 (2006.1). Автономная электростанция переменного тока / А.Б. Дарьенков, С.А. Гузев // Заявл. №2016118233 от 11.05.2016; опубл. 13.02.2017. Бюл. № 5.

4. **Описание изобретения** к патенту RU 2773744 С1, МНК Н02Р 9/48 (2006.1). Автономная электростанция переменного тока / А.Б. Дарьенков, И.Е. Бердников, А.П. Слuzов // Заявл. №2021138720 от 24.12.2021; опубл. 08.06.2022. Бюл. №16.

5. **Ростовский, В.В., Серебряков, А.В., Серебряков, Н.А.** Анализ функциональной схемы автономного источника питания с дифференцированной нагрузкой // Будущее технической науки. Сборник научно-технических статей конференции. Нижний Новгород, 2023. С. 181–182.

6. **Осипов О.И., Усынин Ю.С.** Техническая диагностика автоматизированных электроприводов: учебник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 160 с.

7. **Серебряков А.В.** Метод диагностирования технического состояния автономных генераторных комплексов // Труды X Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2018. Материалы докладов конференции. 2018. С. 48–51.

8. **Серебряков А.В., Стеклов А.С., Титов В.Г.** Мониторинг и прогнозирование технического состояния автономных генераторных комплексов. Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018. 174 с.

*К.М. Афанасьев AfanasyevKM@mpei.ru,
Г.Р. Титова TitovaGR@mpei.ru, НИУ «МЭИ», Москва*

АКТИВНО-АДАПТИВНЫЕ СЕТИ В ПРИМЕНЕНИИ К СИСТЕМАМ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Внедрение возобновляемых источников энергии в современную энергетическую систему разных стран и создание систем распределенной генерации предъявляют повышенные требования к гибкости и быстродействию управления [1]. В отличие от классических сетей электроснабжения, в которых электрическая мощность передается в одном направлении, а потребители принимают минимальное участие в состоянии устройства централизованной энергосистемы, распределенная генерация подразумевает наличие множества источников энергии небольшой (порядка

нескольких киловатт) мощности, выработка которых зависит от погодных условий и желания их владельца [2]. Одно из ключевых преимуществ систем распределенной генерации – это возможность расположения потребителей энергии в непосредственной близости к источникам, таким, как солнечные панели и ветровые электростанции, без необходимости проводить линии электропередач на большие расстояния в труднодоступные и малонаселенные регионы.

Повышенная сложность современной энергосистемы, в которую входят как традиционные, так и нетрадиционные источники, требует быстродействующего адаптивного управления динамической нагрузкой и генерацией, для обеспечения баланса между выработкой и потреблением электроэнергии в каждый момент времени. Создание интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС) возможно благодаря прогрессу в развитии информационных технологий, позволяющих осуществлять сбор и анализ огромного массива данных, отображающих текущее состояние энергосистемы, и реагировать на изменения ключевых параметров на основе механизма обратной связи с целью повышения качества и надежности электроснабжения.

Возможность информационных технологий проводить быстрые вычисления способствует управлению перетоками мощности между домами, предприятиями, накопительными системами (аккумуляторными батареями). Для корректной работы интеллектуальных сетей необходим обмен информацией (векторные измерения; показатели качества электроэнергии, внешняя среда и т.д.) между центрами управления, которыми зачастую являются трансформаторные подстанции и распределительные пункты, оснащенные автоматизированными интеллектуальными измерительными системами (АИИС). Также система должна быть максимально самодиагностируемой, с использованием результатов в определении алгоритма функционирования автоматических систем режимного и противоаварийного управления.

Активность потребителей, включенных в данные сети, реализуется благодаря установке интеллектуальных систем учета электроэнергии с возможностью управления спросом. Активный потребитель способен, основываясь на своем энергетическом балансе, определять объемы получаемой из сети электроэнергии и степень своего участия в ее продаже на оптовом и розничном рынках.

Управляемость ИЭС ААС достигается путем применения следующих технических средств:

- *Управляемые устройства регулирования (компенсации) реактивной мощности* и, как следствие, напряжения. Позволяют поддерживать нормируемые уровни напряжения в контролируемых узлах электрической сети. Делятся на статические и динамические. К статическим относятся: батареи статических конденсаторов, управляемые шунтирующие реакторы, статические тиристорные компенсаторы. Динамические компенсаторы – электромашинные устройства, такие как асинхронизированные компенсаторы.

- *Устройства регулирования параметров сети.* Позволяют изменять сопротивление элементов схемы замещения сети, влияя на ее пропускную способность. Так, к примеру, управляемые устройства продольной компенсации представляют из себя секции батарей статических конденсаторов, включенных в сеть последовательно, и реакторов, подключенных параллельно через силовые тиристоры. Плавное управление емкостным сопротивлением линии позволяет также перераспределять мощность по параллельным линиям.

- *Преобразователи видов тока.* Предназначены для согласования двух участков системы, использующих разные виды тока (переменный и постоянный, что актуально для распределенной генерации с использованием возобновляемых источников), или разную частоту напряжения [3].

- *Устройства ограничения токов короткого замыкания.* Учитывая сложность выполнения систем релейной защиты в условиях распределенной генерации, могут использоваться токо-

ограничивающие реакторы, или устройства, выполненные на основе силовой электроники, использующие высокотемпературные проводники, включаемые последовательно в цепь короткого замыкания [1].

• *Накопители электроэнергии.* Выполняют функцию выравнивания графиков нагрузки. Способны запасать энергию в период повышенной солнечной или ветровой активности и выдавать мощность потребителям в период дефицита или пикового потребления. Также гарантируют бесперебойность питания ответственных потребителей и собственных нужд подстанций. В качестве накопителей могут использоваться аккумуляторные батареи (статические) и электромашинные (динамические), запасующие энергию в форму инерции вращающихся масс на валу. Для подключения накопителей к системе необходимо использовать преобразователи напряжения.

Важную роль в функционировании активно-адаптивных сетей играют цифровые (интеллектуальные) трансформаторные подстанции, включающие в себя:

- интеллектуальные трансформаторы и комплектные распределительные устройства;
- цифровые системы учета и измерения электрических показателей;
- автоматизированные системы, позволяющие произвести переключения и реконфигурацию схемы сети в зависимости от внешних факторов;
- адаптивные системы релейной защиты и автоматики (РЗА), являющиеся куда более сложными и изменчивыми в сравнении с классическими системами. Так, разрабатываются протоколы, позволяющие непрерывно настраивать микропроцессорные системы РЗА для адаптации к текущему режиму работы микросети, применяя устройства автоматического расчета параметров срабатывания защиты. Применение такой концепции осложнено тем, что действующие требования предписывают необходимость проверки работоспособности релейной защиты после каждого

внесения изменения в настройки или конфигурацию, что приводит к необходимости изменения нормативно-технической документации [5];

- системы, обеспечивающие защиту от электромагнитных воздействий и киберугроз.

Задача оценивания состояния и управления ИЭС ААС возложена на программируемые блоки мониторинга и прогнозирования режимов работы электроэнергетической системы. Основные функции: оценка текущего режима и интеллектуальное прогнозирование параметров предстоящего режима с использованием продвинутых нейросетевых технологий и машинного обучения; оценочное определение слабых мест системы в предстоящем режиме; оценка пропускных способностей связей системы с целью оптимального распределения потоков энергии путем автоматических управляющих воздействий; расчет показателей, характеризующих переход из нормального режима работы системы в предаварийный и обратно с оценкой опасности переходных и послеаварийных состояний.

В заключение можно сделать вывод, что применение активно-адаптивных сетей как в условиях распределенной генерации малой мощности, так и в более классических системах, является перспективным направлением, выводящим качество функционирования энергосистемы и взаимодействия потребителей и производителей энергии на новый уровень.

Литература

1. **Основные положения** Концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью, 2012. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://ru.readkong.com/page/osnovnye-polozeniya-konceptii-intellektualnoy-energosisitemy-2775281> (Дата обращения 23.10.2023).

2. **Головщиков В.О., Закирова С.З.** Распределенная генерация (включая возобновляемые источники энергии), как элемент интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью // Современные технологии и научно-технический прогресс. Т. 1. С. 86–87.

3. **Чивеньков А.И., Крахмалин И.Г.** Универсальный преобразователь как основа для согласования параметров источников распределенной сети с ВИЭ // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 1. С. 112–125.

4. **Кубарьков Ю.П.,** Кулаев И.С., Алехин Р.А. Оптимизация уровней напряжения в активно-адаптивных сетях с распределенной генерацией // Вестн. Самар. Гос. Техн. Ун-та. Сер. Технические науки. 2018. № 3 (59). С. 154–164.

5. **Шарьгин М.В.,** Куликов А.Л., Вуколов В.Ю., Петров А.А. Адаптивная релейная защита электрических сетей с источниками распределенной генерации // Известия РАН. Энергетика. 2020. № 3. С. 60–68.

6. **Сидоров Д.Б., Богов Ч.В., Габолаев В.В.** Реализация концепций активно-адаптивных сетей и интеллектуального учета в установках распределенной генерации в распределительных сетях среднего напряжения // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. 2021. С. 557–662.

7. **Абдуназарова, Р. А.** Внедрение искусственного интеллекта в возобновляемую энергетику // Молодой ученый. 2023. № 24 (471). С. 8–10.

ОБЩАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ЦЕНОЛОГИЯ

*Д.В. Луценко, lutsenko@bk.ru,
КИЦ ООО «Техноценоз», Калининград*

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСОПОТРЕБЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Рассматриваемый в докладе подход является результатом применения комбинаторного рангового анализа для прогнозирования ресурсопотребления организационных систем [1]. Под организационной системой понимается объединение людей, совместно реализующих некоторую программу или цель и действующих на основе определённых процедур и правил [2]. Охарактеризуем организационную систему (далее – ОС), обладающую негауссовыми свойствами.

В соответствии с организационно-штатным делением в ОС входят структурные подразделения. Структурное подразделение: 1) реализует или участвует в реализации технологического (производственного) процесса, расходуя на это соответствующие ресурсы; 2) характеризуется собственной подсистемой управления в лице руководителя (начальника) или другого ответственного лица; 3) имеет для контроля расходования ресурсов соответствующие приборы учёта. В работах профессора В.И. Гнатука структурное подразделение определяется как объект или пространственно-технологический кластер [3]. Далее структурное подразделение, входящее в ОС, будем называть объектом.

По результатам учёта формируется набор данных, отражающий ресурсопотребление объектов системы в анализируемом интервале времени. Констатируется, что данные по ресурсопотреблению обладают негауссовыми свойствами [4]. Это делает невозможным

применение среднего и среднеквадратического отклонения в качестве информативно насыщенных свёрток анализируемых выборок [4]. При этом основным инструментом обработки и представления таких данных является аппарат ранговых распределений [3, 4].

В качестве анализируемого ресурса выберем электрическую энергию, а учётные данные представим таблицей (рис. 1,а), в которой номера строк соответствуют объектам, номера столбцов – временным интервалам, а отдельное значение – величине электропотребления (далее – ЭП) объекта за соответствующий интервал времени. Проранжируем значения в столбцах таблицы данных в убывающем порядке, в результате чего каждому значению в столбце будет присвоен целочисленный ранг. Таким способом формируются две таблицы: ранговых параметрических распределений (рис. 1,б) и ранговых отображений (рис. 2,а).

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	$W_{n,t}$	$W_{n,(t+1)}$	$W_{n,(t+2)}$	...	$W_{n,(T-1)}$	$W_{n,T}$

а) таблица исходных данных по электропотреблению

Ранг	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	$W_{n,t}$	$W_{n,(t+1)}$	$W_{n,(t+2)}$	...	$W_{n,(T-1)}$	$W_{n,T}$

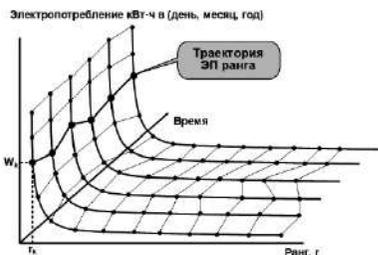
б) таблица ранговых параметрических распределений

Рис. 1. Данные по электропотреблению

Столбцы таблицы (рис. 1,б) образуют последовательность ранговых параметрических распределений, каждое из которых устанавливает взаимно-однозначное соответствие между величиной электропотребления и целочисленным рангом. Традиционно в ранговом анализе последовательность ранговых параметрических распределений представляется трёхмерной ранговой параметрической

поверхностью (рис. 2,б), а на гипотезе об устойчивости её формы разработаны техноценологические методы прогнозирования с фиксированной первой точкой, без фиксированной первой точки, с делением на кастовые зоны [5, 6].

Номер объекта	t	(t+1)	(t+2)	...	(T-1)	T
1	$r_{1,t}$	$r_{1,(t+1)}$	$r_{1,(t+2)}$	...	$r_{1,(T-1)}$	$r_{1,T}$
2	$r_{2,t}$	$r_{2,(t+1)}$	$r_{2,(t+2)}$	...	$r_{2,(T-1)}$	$r_{2,T}$
3	$r_{3,t}$	$r_{3,(t+1)}$	Ранг объекта по ЭП в определённом временном интервал			$r_{3,T}$
4	$r_{4,t}$	$r_{4,(t+1)}$				$r_{4,T}$
...
n	$r_{n,t}$	$r_{n,(t+1)}$	$r_{n,(t+2)}$	...	$r_{n,(T-1)}$	$r_{n,T}$



а) таблица ранговых отображений

б) ранговая параметрическая поверхность

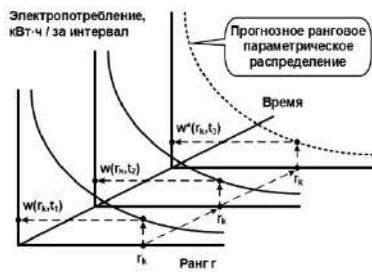
Рис. 2. Построение ранговых параметрических распределений

В процессе функционирования, а также сложного взаимодействия (иногда трудно формализуемого) в организационной системе объекты меняют свои ранги. Это явление получило название «ранговая динамика» [1, 7]. Для учёта явления ранговой динамики в прикладных задачах разрабатывается комбинаторный ранговый анализ. При прогнозировании это позволяет устанавливать каждому объекту наиболее вероятный занимаемый им ранг и определять по нему значение на прогнозном ранговом параметрическом распределении.

Итак, основная идея структурно-параметрического прогнозирования заключается в прогнозе взаимно-однозначного рангового отображения (рис. 3,а), рангового параметрического распределения (рис. 3,б) и соотнесении значений на прогнозном ранговом параметрическом распределении с объектами системы. Здесь следует отметить принципиальное отличие предлагаемого подхода от прогнозирования техноценологическими методами с фиксированной первой точкой, без фиксированной первой точки и с делением на кастовые зоны [5, 6]. В перечисленных методах применяется

двойная аппроксимация: сначала аппроксимируется каждое ранговое параметрическое распределение по двухпараметрической зависимости вида $w(r) = W_1 / r^\beta$, а затем подбираются модели временных рядов первой точки $W_1(t)$ и рангового коэффициента $\beta(t)$, что привносит существенную ошибку в итоговый прогноз. Кроме этого, в перечисленных методах соотношение прогнозного значения каждому из объектов на ранговом параметрическом распределении выполняется при условии постоянства рангов, что не учитывает явление ранговой динамики.

Номер объекта	Значение ранга						
	t_1	t_2	t_3	...	T	T'	
1	1	2	4	...	1	1	
2	2	Прогнозное ранговое отображение				2	
4	4					4	
5	5	6	5	...	4	3	
...	
n	n	n	n	...	n	n	



а) структурное прогнозирование

б) параметрическое прогнозирование

Рис. 3. Идея структурно-параметрического прогноза

Предлагаемая методика направлена на устранение недостатков в уже ставших традиционными техноэнологических методах и повышение точности прогнозирования.

Итак, представим таблицу ранговых параметрических распределений (рис. 1,б) матрицей:

$$W_r = \| w_{r,t} \|_{r=1,t=1}^{n,T}, \tag{1}$$

где n – количество объектов, T – количество временных интервалов.

Составим из столбцов матрицы (1) последовательность распределений:

$$\mathbf{W}_r(t) = \mathbf{W}_r^{(t_1)}, \mathbf{W}_r^{(t_2)}, \dots, \mathbf{W}_r^{(t_T)} = [\mathbf{W}_r^{(t_i)}]_{i=1}^T, \quad (2)$$

где $\mathbf{W}_r^{(t_i)} = \|\mathbf{w}_r\|_{r=1}^n$ – вектор рангового параметрического распределения размерности n , соответствующий первому столбцу матрицы (1), в котором значения упорядочены в убывающей последовательности; T – длина последовательности.

Для произвольного момента t выделим два соседних ранговых параметрических распределения из последовательности (2) $\mathbf{X} = \mathbf{W}_r^{(t-1)}$, $\mathbf{Y} = \mathbf{W}_r^{(t)}$.

Пусть вектора \mathbf{X} и \mathbf{Y} связаны регрессионной зависимостью:

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

где \mathbf{w} – вектор коэффициентов; b – порог; \mathbf{Y} – вектор зависимых переменных; \mathbf{X} – вектор независимых переменных; \mathbf{E} – вектор ошибок.

Определим коэффициенты зависимости \mathbf{w} и b в (3). Тогда при условии, что зависимость сохранится в будущем, прогнозное ранговое параметрическое распределение в момент времени $(t+1)$ $\hat{\mathbf{W}}_r^{(t+1)}$ определяется как

$$\hat{\mathbf{W}}_r^{(t+1)} = \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{W}_r^{(t)} + b. \quad (4)$$

Выражения (3), (4) определяют порядок прогнозирования рангового параметрического распределения на шаг вперёд. Отрицательным здесь является то, что регрессионная зависимость (3) характеризует связь между двумя соседними ранговыми параметрическими распределениями и не отражает связь в последовательности в целом. Выполним сдвиговую процедуру (рис. 4), в которой формируются последовательности векторов независимых $\mathbf{X}(t) = \mathbf{W}_r^{(t_1)}, \mathbf{W}_r^{(t_2)}, \dots, \mathbf{W}_r^{(t_{T-1})}$ и зависимых $\mathbf{Y}(t) = \mathbf{W}_r^{(t_2)}, \mathbf{W}_r^{(t_3)}, \dots, \mathbf{W}_r^{(t_T)}$ переменных.

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	$W_{n,t}$	$W_{n,(t+1)}$	$W_{n,(t+1)}$	$W_{1,(t+2)}$	$W_{n,(t+2)}$	$W_{1,(t+3)}$	...	$W_{n,(T-1)}$	$W_{n,T}$
	$\underbrace{\hspace{2cm}}_{X_1}$		$\underbrace{\hspace{2cm}}_{Y_1}$		$\underbrace{\hspace{2cm}}_{X_3}$			$\underbrace{\hspace{2cm}}_{X_m}$	
			$\underbrace{\hspace{2cm}}_{Y_2}$			$\underbrace{\hspace{2cm}}_{Y_3}$			$\underbrace{\hspace{2cm}}_{Y_m}$

Рис. 4. Последовательная сдвиговая процедура

Очевидно, что последовательность $X(t)$ сдвинута относительно последовательности $Y(t)$ на один отсчёт назад. Далее преобразуем последовательности $X(t)$ и $Y(t)$ в обобщённые вектора независимых X^* и зависимых Y^* переменных:

$$X^* = \begin{cases} X_k, & k = 1; \\ \begin{bmatrix} X^* \\ X_k \end{bmatrix}, & k = 2, \dots, m, \end{cases} \quad Y^* = \begin{cases} Y_k, & k = 1; \\ \begin{bmatrix} Y^* \\ Y_k \end{bmatrix}, & k = 2, \dots, m, \end{cases} \quad (5)$$

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

Итак, на основе сдвиговой процедуры получены обобщённый вектор независимых X^* и зависимых Y^* переменных. Зависимость между данными векторами характеризует связь между ранговыми распределениями в последовательности (2) в целом. По зависимости между X^* и Y^* , установленной с использованием различных алгоритмов и методов (искусственные нейронные сети, машина опорных векторов, метод наименьших квадратов и др.), на заданный горизонт можно построить достаточно точный прогноз (рис. 5).

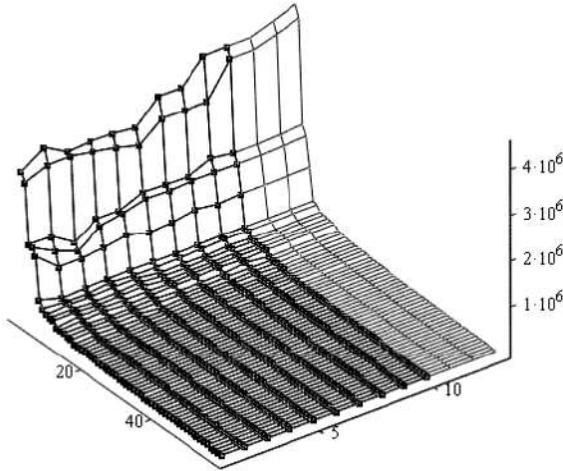


Рис. 5. Результат параметрического прогнозирования:
фрагмент поверхности с квадратами – фактические данные;
фрагмент поверхности без квадратов – прогнозные данные

Прогноз на основе регрессионной зависимости (3) строится по рекуррентному выражению:

$$\hat{\mathbf{W}}_r^{(t_k)} = \begin{cases} w^T \cdot \mathbf{W}_r^{(t_r)} + b, & k = 1; \\ w^T \cdot \hat{\mathbf{W}}_r^{(t_{k-1})} + b, & k = 2, \dots, p, \end{cases} \quad (6)$$

где k – шаг прогноза; p – горизонт прогнозирования; $\mathbf{W}_r^{(t_r)}$ – ранговое параметрическое распределение, соответствующее моменту прогнозирования T .

Структурное прогнозирование. Перейдем к формальному описанию структурного прогнозирования. Ранговые конфигурации и их классификация введены и подробно рассмотрены в работах [1, 7–9]. В прогнозировании применяют 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 одно и того же множества $\{\overline{1, n}\}$ важно понимать их отличие. Так как

ранговые конфигурации заданы на множестве $\{\overline{1, n}\}$, они также являются подстановками, с которыми можно выполнять следующие действия: возведение в степень, умножение, взятие обратной подстановки [1, 7–9].

Итак, при построении последовательности ранговых параметрических распределений $W_r(t)$ (2) также строится последовательность ранговых отображений (рис. 2,а):

$$\pi(t) = \pi_{t_1}, \pi_{t_2}, \dots, \pi_{t_T} = [\pi_{t_i}]_{i=1}^T. \quad (7)$$

Путём выполнения операции левого умножения над элементами последовательности $\pi(t)$ строится последовательность сдвиговых ранговых отображений [1, 7]:

$$\begin{aligned} t=1, 2, \dots, T-1, \quad \sigma_t &= \pi_t^{-1} \circ \pi_{t+1}, \\ \sigma(t) &= \sigma_{t_1}, \sigma_{t_2}, \dots, \sigma_{t_{T-1}} = [\sigma_{t_i}]_{i=1}^{T-1}, \end{aligned} \quad (8)$$

где \circ – операция умножения подстановок.

Сдвиговое ранговое отображение σ характеризует связь между двумя соседними ранговыми отображениями в последовательности $\pi(t)$ (7).

Прогнозирование ранговых конфигураций строится на поиске наиболее вероятной ранговой конфигурации и использовании её для продолжения последовательности. Для этого ранговая конфигурация представляется подстановкой и преобразуется в подстановочную матрицу:

$$\Pi = \|\pi_{i,j}\|_{i,j=1}^n, \pi_{i,j} = \begin{cases} 1, & s(i) = j; \\ 0, & s(i) \neq j, \end{cases} \quad (9)$$

где s – подстановка, соответствующая ранговой конфигурации.

Последовательность ранговых конфигураций преобразуется в последовательность подстановочных матриц вида:

$$\Pi(t) = \Pi_{t_1}, \Pi_{t_2}, \dots, \Pi_{t_T} = [\Pi_{t_i}]_{i=1}^T. \quad (10)$$

Далее по последовательности подстановочных матриц определяется матрица частот:

$$\mathbf{H}^* = \sum_{t=1}^T \Pi_t . \quad (11)$$

Матрица частот (11) может быть получена как для последовательности $\pi(t)$ (7), так и для последовательности $\sigma(t)$ (8). Пусть матрица частот \mathbf{H}^* есть таблица назначений в задаче о назначениях с запретными назначениями [10]. Решая данную задачу на максимум, определяем подстановку, доставляющую максимум следующей функции:

$$s_{\max} = \arg \max_s \sum_{i=1}^n \mathbf{H}_{i,s(i)}^* . \quad (12)$$

Если подстановка s_{\max} определена для последовательности ранговых отображений $\pi(t)$ (7), то соответствующее ей ранговое отображение обозначим как π^* . Если подстановка s_{\max} определена для последовательности сдвиговых ранговых отображений $\sigma(t)$ (8), то соответствующее ей сдвиговое ранговое отображение обозначим как σ^* . Ранговые конфигурации π^* и σ^* , определённые путём решения задачи о назначениях, рассматриваются как наиболее вероятные.

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

$$i = 1, 2, \dots, n , \hat{w}_i = [\hat{\mathbf{W}}_r]_{\pi^*(i)} , \quad (13)$$

где i – номер объекта системы; \hat{w}_i – прогнозное значение параметра i -го объекта; $\hat{\mathbf{W}}_r$ – вектор прогнозного рангового параметрического распределения; $\pi^*(i)$ – значение ранга, устанавливаемое i -му объекту по ранговому отображению π^* .

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

$$\hat{\pi}(k) = \begin{cases} \pi_T \circ \sigma^*, & k = 1; \\ \hat{\pi}_{k-1} \circ \sigma^*, & k = 2, 3, \dots, p, \end{cases} \quad (14)$$

где $\hat{\pi}(k)$ – последовательность прогнозных ранговых отображений; k – шаг прогноза; p – горизонт прогнозирования; π_T – ранговое отображение, соответствующее моменту прогнозирования T .

Выполняя проекцию (13) для спрогнозированных ранговых отображений и ранговых распределений, устанавливают значения параметра для каждого из объектов системы. При существенной ранговой динамике целесообразно прогнозировать последовательность ранговых отображений по выражению (14); в противном случае лучше выполнять проекции на основе одного рангового отображения π^* . В общем виде методика структурно-параметрического прогнозирования состоит из четырех этапов, каждый из которых включает определённые шаги (рис. 6).



Рис. 6. Этапы методики структурно-параметрического прогнозирования

На этапе формирования исходных данных осуществляется сбор данных по электропотреблению с точек учёта. Далее выполняется приведение данных к табличному виду, проводится их проверка, по результатам которой восстанавливаются утраченные, выявляются и корректируются ошибочные данные. После этого выполняется сортировка данных и формируются таблицы ранговых параметрических распределений (рис. 1,*б*) и ранговых отображений (рис. 2,*а*).

На этапе параметрического прогнозирования таблица ранговых параметрических распределений (рис. 2,*а*) преобразуется в матрицу (1), совокупность столбцов которой представляется последовательностью ранговых параметрических распределений (2). Применительно к последовательности ранговых параметрических распределений осуществляется сдвиговая процедура (рис. 4) и формируются обобщённые вектора независимых и зависимых переменных (5). Далее в соответствии с установленной степенью полиномиальной зависимости составляется система линейных алгебраических уравнений, решая которую по методу наименьших квадратов, определяют соответствующие коэффициенты. С использованием полученных коэффициентов выполняется прогнозирование последовательности ранговых параметрических распределений (6).

На этапе структурного прогнозирования таблица ранговых отображений (рис. 2,*а*) преобразуется в последовательность ранговых отображений (7). Путём левого умножения формируется последовательность сдвиговых ранговых отображений (8). В зависимости от интенсивности ранговой динамики выбирается последовательность ранговых или сдвиговых отображений. Выбранная последовательность преобразуется в последовательность подстановочных матриц (9), с использованием которой составляется таблица назначений (10). Путём решения задачи о назначениях (12) определяется наиболее вероятная ранговая конфигурация, с использованием которой на заданный горизонт продолжается последовательность ранговых отображений (14).

На этапе проекции ранговых оценок фиксируется прогнозное ранговое отображение и прогнозное ранговое параметрическое распределение. Далее осуществляется сопоставление значений на прогнозном ранговом распределении с каждым объектом (13). В результате выполнения этого действия на глубину прогнозных данных формируется итоговый прогноз за систему в целом.

Программная реализация методики структурно-параметрического прогнозирования. Рассмотренная методика прогнозирования была реализована в виде автоматизированного рабочего места (далее – АРМ) аналитика или другого специалиста, который в соответствии со своими должностными обязанностями строит прогнозы. В качестве языка программирования выбран С#, с использованием которого разработаны классы. Приведем их описание и основные операции с объектами этих классов. Класс для работы с матрицами реализует операции с матрицами вещественных чисел: сложение, вычитание, определение минора и определителя, нахождение обратной матрицы. Класс для работы с подстановками реализует операции по умножению подстановок, возведению в степень, взятию обратной подстановки. Класс для работы с двудольными графами реализует операции поиска добавляющего маршрута в двудольном графе и нахождения максимального паросочетания. Класс для решения задачи о назначениях предназначен для решения задачи о назначениях в таблице с запретными назначениями по венгерскому алгоритму. Класс для решения системы линейных алгебраических уравнений предназначен для составления ее в матричном виде и решения по методу наименьших квадратов.

Как представляется, аналитик, кроме самого прогнозирования, должен иметь возможность проверить используемый метод прогнозирования на проверочной совокупности данных. С учётом этого к АРМ был предъявлен перечень требований, предполагающий решение следующих задач:

– импорта учётных (первичных) данных из файла Excel или из файла с расширением .txt, в котором разделителем значений является табуляция;

- сортировки первичных данных, построения матриц ранговых параметрических распределений и ранговых отображений;
- выбора степени полиномиальной зависимости, горизонта прогнозирования, а также той совокупности данных из первичных, которая будет использована для построения прогноза;
- разделения данных на обучающие (используемые для построения прогноза) и контрольные (используемые для проверки точности прогноза);
- построения структурно-параметрического прогноза на заданный горизонт;
- просмотра данных в табличном виде, а также их экспорта в файл txt или Excel для возможного использования в других приложениях;
- вычисления и оценки ошибок прогнозирования.

В строке меню стартового окна АРМ аналитик, нажав на кнопку «Импорт данных», выполняет импорт первичных (учётных) данных, после чего осуществляется формирование совокупности исходных данных (рис. 6), включающую таблицы (рис. 7): исходных данных, ранговых параметрических распределений, ранговых отображений и др.

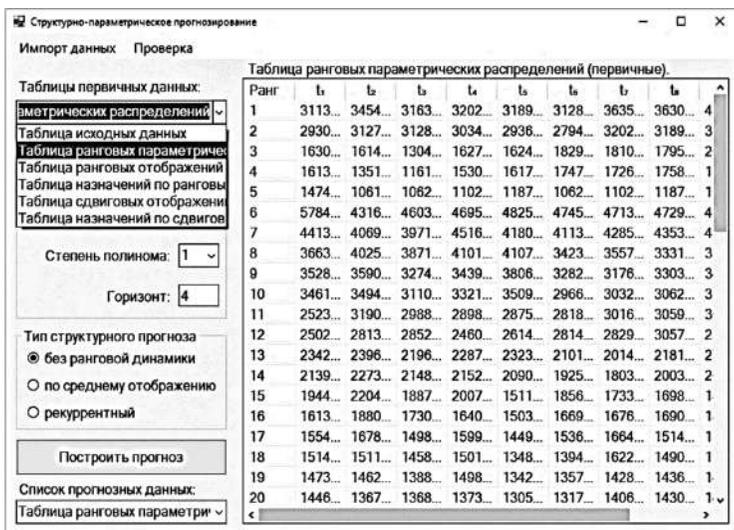


Рис. 7. Перечень первичных данных

Далее аналитик, выбрав в выпадающем списке только таблицу исходных данных, нажимая левой кнопкой мыши по её столбцам, отмечает временные отсчёты, устанавливающие ту совокупность данных из первичных, которая будет использоваться для построения прогноза. После этого устанавливается степень полиномиальной зависимости, горизонт прогнозирования, а также тип структурного прогноза. После нажатия кнопки «Построить прогноз» строится структурно-параметрический прогноз на заданный горизонт. Выбирая в выпадающем списке прогнозных данных соответствующий элемент (рис. 8), аналитик может просмотреть прогнозные таблицы: ранговых параметрических распределений, ранговых отображений, данных.

В АРМ реализованы следующие типы структурного прогноза. В случае установки «без ранговой динамики» (см. рис. 8) структурный прогноз не выполняется, а ранговое отображение, соответствующее моменту прогнозирования, используется для проекции ранговых оценок.

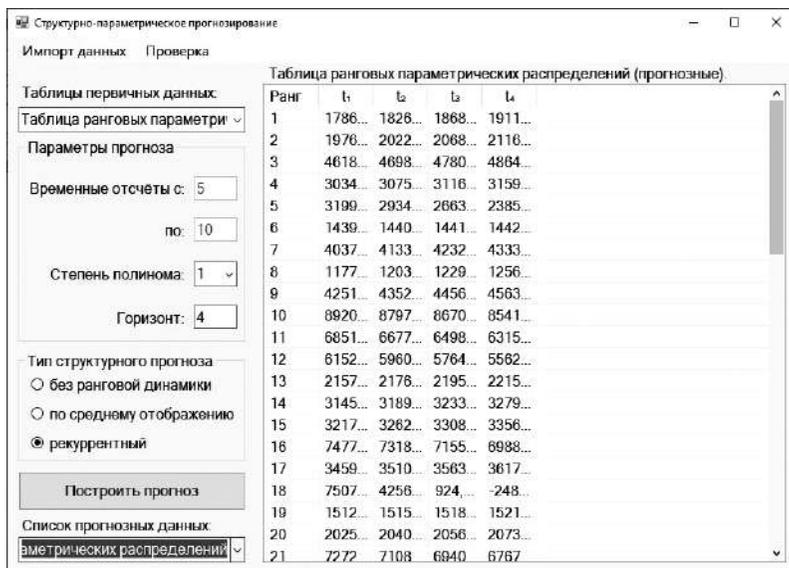


Рис. 8. Перечень прогнозных данных

Использование этой установки соответствует гипотезе о неизменности рангов в техноценологических методах прогнозирования с фиксированной первой точкой, без фиксированной первой точки, с делением на кастовые зоны. В случае установки «по среднему отображению» для выполнения операции проекции будет использовано ранговое отображение π^* , найденное путём решения задачи о назначениях для последовательности (7). В случае установки «рекуррентный» последовательность ранговых отображений (7) будет рекуррентно продолжена по (14) с использованием сдвигового рангового отображения σ^* , найденного путём решения задачи о назначениях для последовательности (8).

Переход в окно проверки осуществляется путём нажатия в строке меню кнопки «Проверка», далее «СП прогноз». В открывшемся окне аналитик щелчком левой кнопки мыши по столбцам таблицы выделяет данные для обучения. Затем, задав глубину контрольных данных и нажав на кнопку «Разделить данные» (рис. 9), выделяет контрольные и обучающие выборки данных. Для получения прогноза аналитику необходимо нажать на кнопку «Построить прогноз», после чего на глубину контрольных выборок данных строится структурно-параметрический прогноз. Выбрав соответствующий элемент в одном из выпадающих списков обучающих, контрольных или прогнозных данных, аналитик может просмотреть их в табличном виде (см. рис. 9).

После нажатия кнопки «Вывести ошибки» аналитик может просмотреть информацию по ошибкам прогнозирования, которые делятся на абсолютные и относительные, структурные, параметрические и итоговые, а также по системе в целом (рис. 10).

При нажатии кнопки «Сбросить параметры» (см. рис. 9) аналитик может изменить параметры прогноза, повторно его выполнить и сравнить полученные результаты.

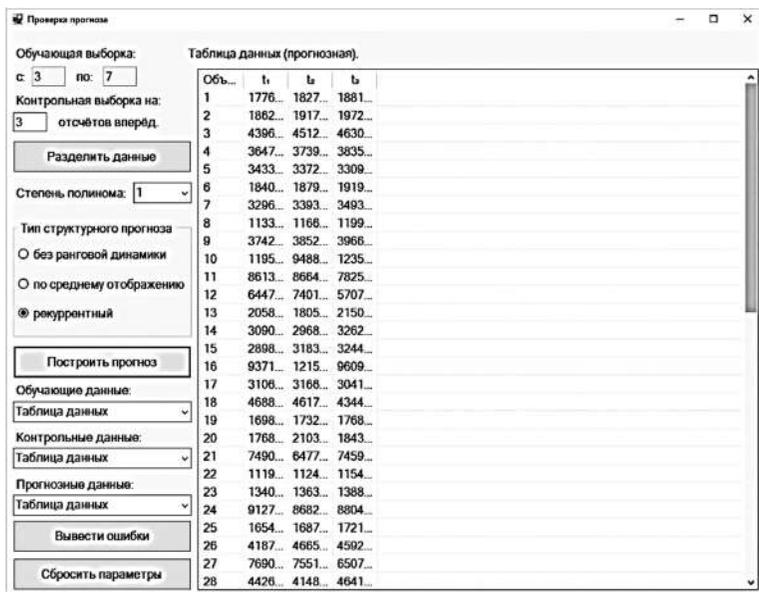


Рис. 9. Окно проверки структурно-параметрического прогноза

Таблица сводных данных	Значение
Таблица абсолютных параметрических ошибок.	
Таблица абсолютных структурных ошибок.	
Таблица абсолютных итоговых ошибок.	23,56
Таблица относительных параметрических ошибок (%)	28,74
Таблица относительных итоговых ошибок (%).	24,14
доля ошибок величиной > 10%	23,56
Распределение структурной ошибки, %:	
доля нулевых ранговых отклонений, %	28,74
доля единичных ранговых отклонений, %	29,31
доля ранговых отклонений величиной 2 или 3, %	22,41
доля ранговых отклонений величиной >3, %	19,54
Распределение итоговой ошибки, %:	
доля ошибок величиной < 2%	16,67
доля ошибок величиной от 2 до 5%	21,84
доля ошибок величиной от 5 до 10%	20,11
доля ошибок величиной > 10%	41,38
За систему в целом:	
Шаг прогноза	Ошибка, %
1	2,13
2	0,65
3	0,78

Рис. 10. Ошибки структурно-параметрического прогноза

Выводы. Таким образом, развитие комбинаторного рангового анализа позволило за счёт учёта явления ранговой динамики уточнить разработанные в техноценологическом подходе методы прогнозирования с фиксированной первой точкой, без фиксированной точки, с делением на кастовые зоны. Принципиально новым в предлагаемой методике является деление прогноза на параметрический (по последовательности ранговых параметрических распределений) и структурный (по последовательности ранговых отображений). При этом оценивать качество прогноза можно по следующим ошибкам:

– параметрической, обусловленной неполным учётом закономерностей в последовательности ранговых параметрических распределений, определяющих форму трехмерной ранговой параметрической поверхности;

– структурной, обусловленной неточным учётом явления ранговой динамики;

– итоговой, связанной с неточно выполненной ранговой проекцией.

На основе методики структурно-параметрического прогнозирования удалось разработать АРМ аналитика. Опытная эксплуатация АРМ на данных по ресурсопотреблению различных организационных систем, обладающих негауссовыми свойствами, подтвердила его работоспособность и практическую ценность.

Литература

1. **Луценко Д.В.** Комбинаторная теория ранговой динамики: трактат. Калининград: КИЦ «Техноценоз», 2017. 113 с. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/ktrd.pdf>.

2. **Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А.** Введение в теорию управления организационными системами: учебник. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2017. 264 с.

3. **Гнатюк В.И.** Закон оптимального построения техноценозов: компьютерная версия переработанная и доп. М.: Издательство ТГУ – Центр системных исследований, 2005 – 2023. 450 с. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru>.

4. **Кудрин Б.И.** Введение в технетику. Томск: Изд-во ТГУ, 1993. 552 с.

5. **Фуфаев В.В.** Ценологическое определение параметров электропотребления, надежности, монтажа и ремонта электрооборудования предприятий региона: монография. М.: Центр системных исследований, 2000. 320 с.

6. **Лагуткин О. Е.** Прогнозирование параметров многономенклатурных химических производств: дис. канд. тех. наук: 05.09.03. М.: МЭИ, 1994. 201 с.

7. **Луценко Д.В.** Основы применения комбинаторной теории ранговой динамики в исследовании функционирования припортового регионального электротехнического комплекса // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 4 (38) Т. 2. С. 122–127.

8. **Луценко Д.В.** Методика составления плана повышения энергетической эффективности припортового регионального электротехнического комплекса // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4. Т. 2. С. 125–129.

9. **Луценко Д.В., Гнатюк В.И.** Методика определения целевого рангового параметрического распределения в задаче снижения электропотребления регионального электротехнического комплекса // Балтийский морской форум: материалы VIII Международного Балтийского морского форума 5–10 октября 2020 г. [Электронный ресурс]: в 6 томах. Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2020. Т. 6. С. 178–181.

10. **Лесякова Л.В.** Прикладные задачи о назначениях (модели, алгоритмы решения) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия. Системный анализ и информационные технологии. 2017. № 2. С. 22–27.

*В.И. Гнатюк, mail@gnatukvi.ru,
БФУ им. И.Канта, г. Калининград
В.С. Олейник, vitoskenigsberg@mail.ru,
М.С. Жукова, melikh82@mail.ru, КИЦ, г. Калининград*

АНАЛИЗ НОМЕНКЛАТУРЫ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Огромный вклад в теорию управления внесли труды профессора Новикова Д.А. Одним из основных можно считать [1], где описываются модели, методы и технологии управления организационными системами. Данные подходы применимы для различных предметных областей. Изучение публикаций сотрудников Института проблем управления РАН позволяет сделать вывод о востребованности моделей и технологий управления при решении прикладных задач, в том числе в управлении номенклатурой программного обеспечения (ПО) организационной системы технопарка. Рассмотрение данной системы с позиции выбора вариантов применяемого ПО для использования сотрудниками в условиях неопределенности и воздействия внешней среды, позволяет предложить аппарат теории управления для формирования методов и технологий принятия управленческих решений в тех ситуациях, где ранее это выполнялось эвристически.

Для описания системы управления номенклатурой ПО технопарка необходимо выделить ее составляющие (субъекты управления, управляемые субъекты), выявить взаимосвязи между ними и формально их описать. В соответствии с [1] в технопарке можно выделить три вида деятельности: основную, вспомогательную (поддерживающую) и управленческую. Любой вид деятельности описывается в соответствии с рис. 1.



Рис. 1. Структурные компоненты деятельности

Технопарк ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» (КГТУ) является структурным подразделением, которое необходимо для создания условий, благоприятных для организации, развития и деятельности малых инновационных предприятий, ускоренного производственного освоения результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, изобретений и открытий учеными, преподавателями, аспирантами и студентами ФГБОУ ВО «КГТУ».

Одной из задач деятельности технопарка является обеспечение сотрудников необходимым набором ПО, предназначенным для решения задач в соответствии с должностными инструкциями. Выбор из перечня альтернативных вариантов ПО обычно осуществляется конечным пользователем. При данном подходе, как правило, не учитываются издержки и трудности, которые могут возникнуть при расширении разнообразия ПО, установленного на различных ПЭВМ должностных лиц организации. Эти издержки связаны с затратами на лицензирование, осуществление поддержки и др.

Кроме затрат, выражаемых в денежном эквиваленте, существуют временные затраты: на обучение пользователей, администраторов, сам процесс администрирования разнообразного ПО. Это, в конечном итоге, влияет на производительность организации, выражается в потерянной прибыли и дополнительных накладных

расходах. Возникает необходимость построения такой номенклатуры ПО технопарка, которая, с одной стороны, способна решать поставленные перед сотрудниками задачи, а с другой – обеспечивать минимальные затраты на всестороннее обеспечение. Анализу должна подлежать номенклатура ПО технопарка в целом, а не отдельный набор на конкретной ПЭВМ должностного лица. Таким образом, принятие решения руководителем будет основываться не только на характеристиках ПО для решения набора задач конкретного должностного лица, но и на характеристиках системы ПО технопарка, как некой экосистемы.

Термин «экосистема» широко используется в биологии для описания интеграции живых организмов и их среды обитания. Впоследствии данное понятие пришло в информационные технологии, в которых выделяют цифровые экосистемы, особенностью которых является конкуренция программных средств за применяемость пользователями для решения поставленных задач. За счет конкуренции осуществляется эволюция данных систем, она же является движущей силой естественного отбора, при этом выживают наиболее приспособленные виды ПО.

Экосистема ПО технопарка представляет собой взаимосвязанную совокупность экземпляров ПО и отношений между ними. Данная взаимосвязанная совокупность объединена общими целями функционирования, обладает свойством эмерджентности как система.

Основываясь на трудах В.И. Гнатюка [3,4], можно дать следующее определение подобной системы. Экосистема ПО организации – это ограниченная в пространстве и времени взаимосвязанная совокупность неделимых экземпляров ПО, объединенных слабыми связями. Связи носят особый характер, выражающийся в зависимости ПО между собой по форматам взаимодействующих данных, а также многообразии решаемых задач. Взаимосвязанность экосистемы ПО определяется единством конечной цели, достигаемой с помощью общих систем управления, всестороннего обеспечения и др. Рассмотрение номенклатуры ПО на более

высоком системном уровне позволяет увеличить информативность при принятии решений руководителем, задействовать рассмотрение, наряду с индивидуальными характеристиками ПО, системных оценок зафиксированного в определенный момент времени состояния системы.

В сложившихся условиях актуальной является задача управления номенклатурой ПО технопарка. В соответствии с этим необходимо формально описать структуру системы управления номенклатурой ПО технопарка, а также модели принятия решений субъектом и объектом управления. В модели управления технопарком центр обладает функцией управления, агент же – это управляемый субъект. Технопарк как организационная система состоит из следующих должностных лиц, участвующих в процессе принятия решения на установку того или иного ПО: директор технопарка – центр нулевого уровня организационной системы; системный администратор – агент и центр первого уровня; остальные сотрудники технопарка – агенты. Причем следует отметить, что данные компоненты обладают активным поведением, т.е. способны осуществлять самостоятельный выбор и принятие решений, основываясь на своих предпочтениях. Системный администратор относится к центру за счет того, что отвечает не только за работоспособность номенклатуры ПО, но и за обеспечение защиты информации в технопарке и осуществляет управление сотрудниками технопарка в части администрирования номенклатуры ПО.

Опишем модель принятия решений сотрудником технопарка по выбору ПО из множества альтернатив для решения поставленной задачи. Для того, чтобы определить, как задаются предпочтения данного сотрудника, сформулируем порядок его взаимодействия с другими сотрудниками, управляющими субъектами, управляемыми объектами.

Зададимся следующим – сотрудник способен выбирать определенные альтернативы ПО из множества A допустимых альтернатив, которые отвечают требованиям по функциональности и безопасности. Совершаемое действие обозначим через y , ($y \in A$) по предпочтению, отдаваемому определенной альтернативе ПО.

Действие сотрудника $y \in A$ технопарка по выбору ПО определяет результат деятельности $z \in A_0$ (множество, содержащее возможные результаты). При осуществлении выбора ПО сотрудник имеет личные предпочтения, способен оценивать результат деятельности $z \in A_0$ в зависимости от своего выбора, обладая информацией о возможностях и удобстве применения альтернативы ПО. Данные предпочтения будем обозначать как R_{A_0} , а множество вероятно возможных предпочтений – $R_{A_0}^*$. Предположим, что каждому элементу из множества предпочтений $R_{A_0}^*$ можно поставить во взаимно однозначное соответствие параметр r , который характеризует степень (или вероятность) достижения поставленной руководителем цели или результата. В качестве примера можно рассматривать параметр r как вероятность или степень достижения плановых показателей деятельности сотрудником к определенному руководителем сроку.

Обозначим переменной I информацию о поведении других сотрудников при осуществлении выбора ПО, при этом обстановкой будем считать совокупность множеств S уже установленных на ПЭВМ сотрудников видов ПО. При выборе определенной альтернативы ПО $y \in A$ сотрудник использует свои предпочтения, имея определенную информацию об обстановке, получает результат деятельности. Обозначим через $W_I(\cdot)$ закон, устанавливающий зависимость результата деятельности сотрудника от выбранного предпочтения и обстановки.

Таким образом, выбор сотрудником из определенного множества альтернатив ПО, можно описать выражением $P^{W_I}(R_{A_0}^*, A, I) \subseteq A$, которое обозначает множество альтернатив ПО, наиболее предпочтительных для сотрудника. Определяясь с ПО для решения поставленной задачи, предполагаем, что сотрудник ведет себя рационально и на основе имеющейся информации об обстановке выбирает действия, которые максимизируют его результат. От результата деятельности зависит заработная плата и размер

премиальной надбавки, поэтому сотрудник заинтересован в максимизации результата деятельности. К наиболее распространенным способам задания предпочтений относятся попарное сравнение альтернатив по определенным показателям, а также вычисление функции полезности, которая выражает некоторую полезность альтернативы в виде действительного числа. Сотрудник в соответствии с определенным выше обязан выбрать альтернативу, которая максимизирует функцию полезности.

Технопарк как организационная система представлен совокупностью сотрудников, совместно реализующих цель организации, действия которых реализуются по определенным правилам и с помощью установленных процедур, называемых механизмами функционирования. Предпочтения сотрудника в технопарке определены на множестве результатов деятельности, которые зависят не только от его действий, но и от среды функционирования, а также от действий других структурных элементов системы. В данной ситуации возникает неопределенность при выборе, выражающаяся в отсутствии информации о совокупности множеств ПО, установленного на ПЭВМ других сотрудников и их действиях. Если известен закон $W_f(\cdot)$, устанавливающий зависимость результата деятельности сотрудника от выбранного предпочтения и обстановки, то данную неопределенность можно снять. При этом легко установить индуцированные предпочтения сотрудника R_A на множестве A , зная предпочтения R_{A_0} на множестве A_0 .

Для решения поставленной задачи опишем модель предпочтений и информированности. Зададим функцию полезности сотрудника при осуществлении выбора как $v(\cdot)$, которая определяет предпочтения сотрудника на множестве результатов A_0 . Тогда можно заключить, что зависимость результата деятельности $z \in A_0$ от действий сотрудника по выбору альтернативы ПО $y \in A$ и

обстановки $\theta \in \Theta$ описывается функцией $z = w(y, \theta)$, а ранее определенный закон $W_I(\cdot)$ – функцией $w(\cdot)$, зависящей от множества экземпляров ПО S , имеющегося в управляемом объекте, дополненным выбранными альтернативами ПО в результате действий A , множества параметров P , которыми можно описать управляемый объект. Под управляемым объектом в технопарке понимается ПЭВМ сотрудника. Модель выбора сотрудником технопарка из определенных альтернатив ПО для решения поставленной задачи представлена на рис. 2.

Для сотрудника технопарка существенной является информация об обстановке, для него важно знать, какое ПО используют его коллеги, чтобы обеспечить совместимость передаваемых данных. Предположим, что сотруднику, принимающему решение о выборе альтернативы ПО, известна обстановка, т.е. известна информация о совокупности ПО, установленных на каждой из ПЭВМ сотрудников технопарка.

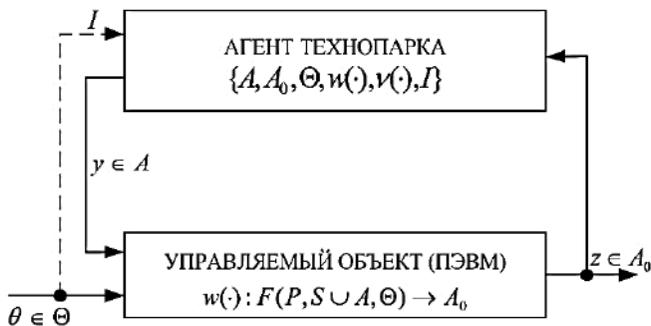


Рис. 2. Модель выбора ПО сотрудником технопарка

Данную информацию можно хранить в базе данных и обеспечивать доступ к ней с использованием разработанного приложения. В данном случае любому действию сотрудника $y \in A$ по выбору ПО можно поставить в соответствие результат его деятельности $z = w(y) \in A_0$. Тогда целевую функцию сотрудника можно охарактеризовать следующим видом $f(y) = v(w(y))$, где $v(\cdot)$ – функция

полезности. Рациональным будет считаться поведение сотрудника, при котором осуществляется максимизация целевой функции:

$$P^{WI}(R_{A_0}^*, A, I) = \mathop{Arg \max}_{y \in A} f(y) \quad (1)$$

Выбор сотрудника технопарка при рациональном поведении при известной зафиксированной обстановке зависит только от его собственных действий. Предположим, что субъект, принимающий решение, максимизирует свою целевую функцию, т.е. обладает рациональным поведением.

Опишем модель принятия решения центром (руководителем) с целью управления агентами (сотрудниками) технопарка. Целью управления для центра будем считать формирование такой номенклатуры ПО технопарка, которая, с одной стороны, способна решать поставленные перед сотрудниками задачи, а с другой – обеспечивать минимизацию затрат на ее содержание. Требуется описать предпочтения руководителя по выбору управляющих воздействий на подчиненных сотрудников.

Модель принятия решения центром можно обозначить следующим кортежем: $\Psi_0 = \{U_A, U_v, U_I, A_0, \theta, w(\cdot), v_0(\cdot), I_0\}$ (индекс «0» относится к обозначению переменных, относящихся к руководителю). В соответствии с [1] обозначим различные действия руководителя в зависимости от выбранной стратегии управления: $u_A \in U_A$ (институциональное управление), $u_v \in U_v$ (мотивационное управление), $u_I \in U_I$ (информационное управление). В соответствии с должностными инструкциями руководитель отвечает за результат деятельности своих сотрудников, поэтому следует считать результатом деятельности руководителя при осуществлении управления совокупность результатов деятельности его сотрудников при использовании ПЭВМ для решения поставленных задач. Управляемым объектом для сотрудников является закрепленная за ними ПЭВМ.

Система управления сотрудниками технопарка изображена в виде связей и введенных ранее обозначений (рис. 3). Управление технопарком заключается в побуждении сотрудников к выбору определенных альтернатив ПО для решения поставленных задач, которые максимизируют функцию полезности самого начальника,

т.е. определяют его множество предпочтительных действий. Множество $U \times A_0$ определяет предпочтения начальника технопарка $v_0(\cdot)$. При этом учитывается имеющаяся у него информации I_0 о номенклатуре ПО, ограничениях и решаемых задачах. На основании зависимости целевой функции руководителя от действий сотрудников, множество $U \times A$ определяет целевую функцию начальника технопарка $f_0(\cdot)$. Рациональный выбор сотрудника технопарка $P(\cdot)$ определяется управляющим воздействием начальника $u(\cdot) \in U$.

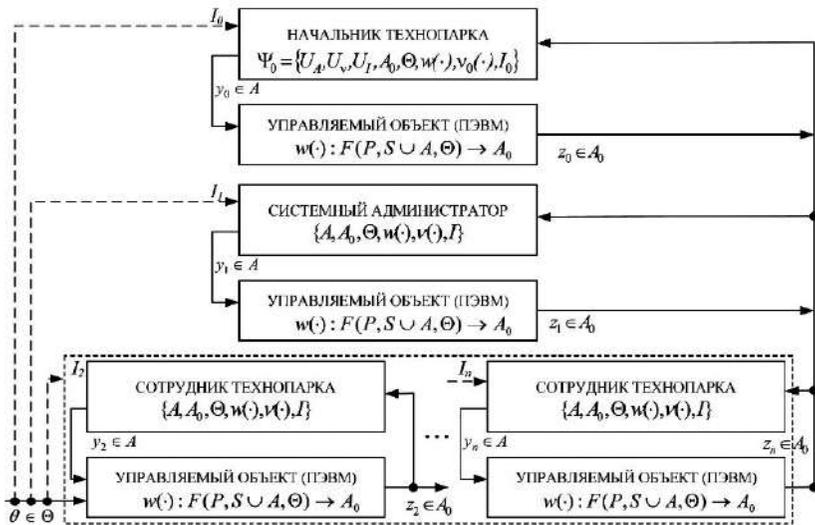


Рис. 3. Структура системы управления технопарком

Множество рационального выбора сотрудника технопарка можно описать следующим выражением:

$$P(u) = P^{wI} \left(R_{A_0(u_A)}^*(u_v), A(u_A), I(u_I) \right) \subseteq A. \quad (2)$$

Из выражения (2) можно заключить, что если руководитель применяет управление $u \in U$, то множество $P(u) \subseteq A$ представляет совокупность действий сотрудника. Возникает задача оценки влияния обстановки на действия сотрудников по выбору ПО для реше-

ния задач и определения некоторых ограничений по выбору со стороны центра (руководителя). Для решения поставленных задач предлагается использовать методологию описания системы с использованием математического аппарата негауссовых распределений [3–5].

Данные методы успешно применялись для оптимизации номенклатуры техники в различных предметных областях на протяжении десятков лет. Методология оценивает полезный эффект от функционирования видов техники и затраты на обеспечение данного процесса с системной точки зрения. Наиболее полезным считается такое состояние системы, когда, с одной стороны, присутствует максимальная неоднородность распределения видообразующих параметров между экземплярами видов техники, что обеспечивает расширение выполнения функциональных задач такой номенклатурой техники, а с другой стороны – необходимо осуществлять равномерное распределение параметрического ресурса по совокупности экземпляров видов технических изделий. Вторым аспектом достигается максимально возможной унификацией набора видов технических изделий, что способствует снижению затрат на обеспечение процесса функционирования системы.

В различных научных областях понятие энтропии определяется по-разному. Некоторые определения приводятся в [3–5]. Так, под энтропией понимается величина, количественно характеризующая меру, степень неравномерности распределения энергии в системе; в теории информации – мера неопределенности ситуации. В соответствии со вторым началом термодинамики в замкнутой системе энтропия системы не убывает. По мнению авторов, показатель энтропии способен оценить влияние обстановки на выбор ПО сотрудником технопарка и ограничения руководителя на множестве альтернатив.

Номенклатура ПО организационной системы стремится к наилучшему состоянию при выборе сотрудником такого действия, при котором выполняются описанные выше условия системных ограничений с использованием анализа показателя энтропии си-

стемы по выбранным функционально значимым для ПО параметрам. Целевую функцию можно описать следующими выражениями [5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_W \xrightarrow{\Lambda(r_b), W(r) \rightarrow var} max; \\ H_W = - \sum_{i=1}^S \frac{\int_{r_i}^{r_i + \Lambda(r_{bi})} W(x) dx}{W_\Sigma} \ln \left(\frac{\int_{r_i}^{r_i + \Lambda(r_{bi})} W(x) dx}{W_\Sigma} \right); \\ W_\Sigma = \int_0^\infty W(x) dx; \end{array} \right. \quad (3)$$

где H_W – ресурсная энтропия; $\Lambda(r_b)$ – ранговое видовое распределение, построенное на основе численностей видов ПО; $W(r)$ – ранговое параметрическое распределение по выбранному параметру номенклатуры ПО; r_b – переменная, определяющая ранг вида ПО по численности экземпляров; r – переменная, определяющая параметрический ранг экземпляра ПО по выбранному параметру; S – количество видов ПО; i – индекс суммирования; r_i – левая граница ранга на ранговом параметрическом распределении для i -го вида ПО; $\Lambda(r_{bi})$ – количество экземпляров i -го вида ПО; x – непрерывный аналог параметрического ранга r ; W_Σ – параметрический ресурс системы по выбранному функционально значимому параметру;

r_{bi} – ранг i -го вида ПО на ранговом видовом распределении.

Следует отметить, что вычисление ресурсной энтропии осуществляется по всем выбранным функционально значимым параметрам, описывающим виды ПО номенклатуры организационной системы. Изменение значения ресурсной энтропии H_W осуществляется путем варьирования постоянной Λ_0 и показателя β_Λ рангового видового распределения, а также показателя рангового параметрического распределения β_W [3–5].

Тем самым критерии совершенствования номенклатуры ПО организационной системы задают органичное соотношение между количественными и качественными показателями ПО, составляющего номенклатуру системы, между крупным и мелким, дорогостоящим и дешевым, уникальным и унифицированным. Альтернатива

ПО, которая будет обеспечивать максимальное значение H_w , наилучшим образом впишется в существующую номенклатуру ПО организационной системы и позволит повысить производительность труда и сократить издержки на обеспечение функционирования ПО.

Наилучшей с точки зрения системных ограничений является такая номенклатура ПО организационной системы, которая обеспечивает максимизацию решения функциональных задач (или приемлемый уровень) и характеризуется максимальным значением ресурсной энтропии по выбранным функционально значимым параметрам, которыми можно описать эту номенклатуру. Стремление к увеличению энтропии способствует выполнению принципа равномерного распределения параметрических ресурсов по совокупностям экземпляров видов ПО. При планировании выбора альтернативы ПО сотрудником технопарка необходимо учитывать изменения показателей ресурсной энтропии.

Система уравнений (3) описывает подходы к пониманию целевой функции руководителя организационной системы технопарка. Основываясь на принципе оптимистичных оценок, подразумевающим выбор действий сотрудниками, приводящий к максимизации целевой функции руководства, в общем виде выражение $K(u) = \max_{y \in P(u)} f_0(u, y)$ определяет целевую функцию руководства при использовании управления $u \in U$. Величину $K(u)$, $u \in U$, можно определить как некоторую переменную, характеризующую эффективность управления. Таким образом, для обеспечения максимизации эффективности управления ($K(u) \rightarrow \max_{u \in U}$) необходимо выполнение ряда условий: обеспечение максимума функции полезности сотрудников при выборе номенклатуры ПО для решения поставленных задач, с одной стороны, и обеспечение системных номенклатурных ограничений, сформулированных системой уравнений (3).

Литература

1. **Новиков Д.А.** Теория управления организационными системами. 3-е изд., испр. и дополн. М.: Издательство физико-математической литературы, 2012. 604 с.

2. **Губко М. В., Новиков Д.А.** Теория игр в управлении организационными системами. М.: Синтег, 2002. 148 с.

3. **Гнатюк В.И.** Закон оптимального построения техноценозов [Монография] // Вып. 29. Ценологические исследования. М.: Изд-во «Томский государственный университет – Центр системных исследований», 2005. 384 с.

4. **Гнатюк В.И., Кивчун О.Р., Луценко Д.В.** Динамическая модель управления электропотреблением объектов припортового электротехнического комплекса // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 4 (38). Т. 2. С. 112–117.

5. **Олейник В.С., Луценко Д.В., Голубков А.В.** Параметрический анализ многономенклатурной организационно-технической системы техноценологического типа с использованием концепции баз данных // Материалы VIII Международного Балтийского морского форума – 2020. Т. 6. Калининград: БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2020. С. 9.

*В.И. Гнатюк, mail@gnatukvi.ru,
БФУ им. И.Канта, г. Калининград,
В.С. Олейник, vitoskenigsberg@mail.ru,
М.С. Жукова, melikh82@mail.ru, КИЦ, г. Калининград*

РАСЧЕТНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В современных условиях количество и разнообразие программного обеспечения, применяемого при выполнении разнородных задач ежедневно увеличивается, при этом ужесточается финансовая политика, повышаются требования к уровню цифровизации и качеству учета в номенклатуре программного обеспечения.

Однако в различных системах с недостаточной эффективностью проводятся работы по сокращению затрат на содержание номенклатуры программного обеспечения за счет применения современных систем поддержки принятия решений, а также глубокой цифровизации и комплексной автоматизации.

Для исследования процессов управления номенклатурой ПО на системном инфраструктурном уровне широко используется технoценoлогический подход, автором которого является Б.И. Кудрин. В данном подходе инфраструктура отождествляется с технoценoзом, а преимущественным методом исследования является разработанный В.И. Гнатюком ранговый анализ [1].

Для описания системы управления номенклатурой ПО организационной системы (далее ОС) необходимо выделить ее составляющие элементы (субъекты управления, управляемые субъекты), выявить взаимосвязи между ними и формально их описать. В соответствии с [2] в ОС можно выделить три вида деятельности: основную, вспомогательную (поддерживающую) и управленческую.

Управление номенклатурой ПО, охватывающее системный уровень рангового анализа, включает в себя сбор, первоначальную обработку и пополнение данных в рамках единого алгоритма, оценку интервалов, прогнозирование, нормирование, потенцирование и др. Объект управления в этих процедурах – вычислительно-параметрический комплекс, понимаемый как совокупность видов программного обеспечения с характеристиками, функционирующих в единой управляющей системе, и комплексной поддержки, которая реализует цель – оптимальное развитие [3].

Возникает необходимость построения такой номенклатуры ПО, которая, с одной стороны, способна решать поставленные перед сотрудниками задачи, а, с другой – обеспечивать минимальные затраты на обеспечение данного набора [4].

Оптимальное управление номенклатурой ПО – это направленное обязательное для исполнения организационно-техническое воздействие на объекты системы с использованием методов рангового анализа [3]. Иными словами, управление понимается как

действие по приведению номенклатуры ПО к рациональному составу. Объекты системы обладают совокупностью свойств, каждое численно характеризуется параметром, который может быть измерен.

По результатам измерения формируется расчётно-параметрический комплекс (РПК), где содержатся данные, обработка которых производится с помощью программного функционала, входящего в процедурный комплекс. Цель работы с данными – получение детерминированных инвариантов, поступающих в аналитическую подсистему, и далее – в систему поддержки принятия решений [3].

Объект исследования – технопарк «Калининградский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «КГТУ»). Здесь системным администратором с помощью специальной программы были собраны данные – установленное программное обеспечение на рабочих местах (вид ПО, закреплённого за конкретным сотрудником), а также объём памяти (Мб), занимаемого места на жестком диске установленного ПО.

Первой обязательной процедурой, реализуемой в процессе подготовки данных, является их проверка на взаимосвязанность; второй обязательной процедурой – проверка на негауссовость. Из совокупности имеющихся данных делается выборка, на которой определяются среднее и стандарт. Затем к этой выборке прибавляется часть данных, взятых из совокупности, и снова определяются среднее и стандарт. Подобная процедура наращивания выборки продолжается до полного исчерпания совокупности.

Далее строится нормированная зависимость значений среднего и стандарта от объема выборки. Если обнаруживается устойчивый рост зависимости, то они считаются негауссовыми. На негауссовых выборках данных поиск детерминированных инвариантов, пригодных для выработки информации, применяемой в процессе принятия решений, осуществляется методами рангового

анализа. И в качестве инвариантов используются параметры формы кривых ранговых распределений, построенных по имеющимся расчетным данным [1]. Согласно центральной предельной теореме при увеличении объема выборки выборочное среднее по вероятности стремится к математическому ожиданию [4].

Данные, полученные в результате сбора информации по номенклатуре ПО ОС, являются верифицированными. На первом этапе подвергающаяся проверке выборка данных нормировалась к минимальному значению. Функционал зависимости первого и второго моментов от максимального значения на выборке представлен на рис. 1.

$$M(J, \alpha) := \frac{\int_1^J x^{-\alpha} dx}{\int_1^J x^{-(1+\alpha)} dx}$$

$$M(J, \alpha, m) := \frac{\int_1^J (x - m)^2 \cdot x^{-(1+\alpha)} dx}{\int_1^J x^{-(1+\alpha)} dx}$$

Рис. 1. Фрагмент кода расчета зависимости первых двух моментов

Построенные графики зависимости первых двух моментов выборки данных по численности ПО от объема выборки, представленные на рис. 2 и 3, свидетельствуют о существенной зависимости первых двух моментов от объёма выборки, что подтверждает её принадлежность к негауссовой генеральной совокупности, а также обоснованность применения методов рангового анализа для описания номенклатуры ПО ОС [4].

Следующий этап проверки данных – построение видового распределения и аппроксимационной зависимости

$$\Omega(x) = \frac{\Omega_0}{x^{1+\alpha}} \quad (1)$$

где Ω_0 – постоянная распределения; $\Omega(x)$ – количество видов, представленных численностью x ; α – показатель видового распределения.

Фрагмент кода для построения видового распределения представлен на рис. 4.

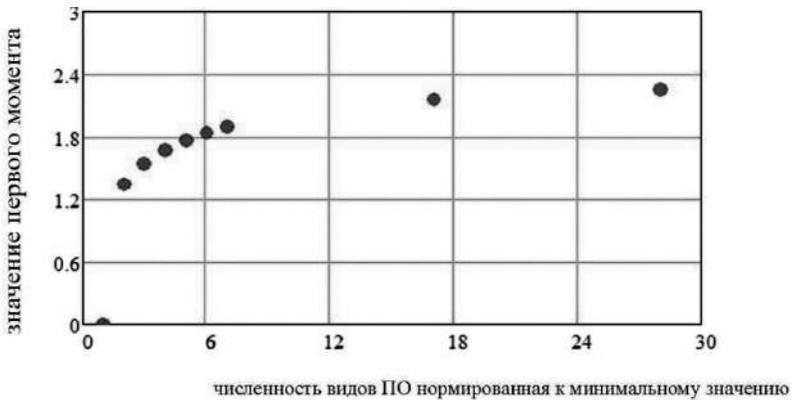


Рис. 2. График зависимости первого момента выборки по численности ПО

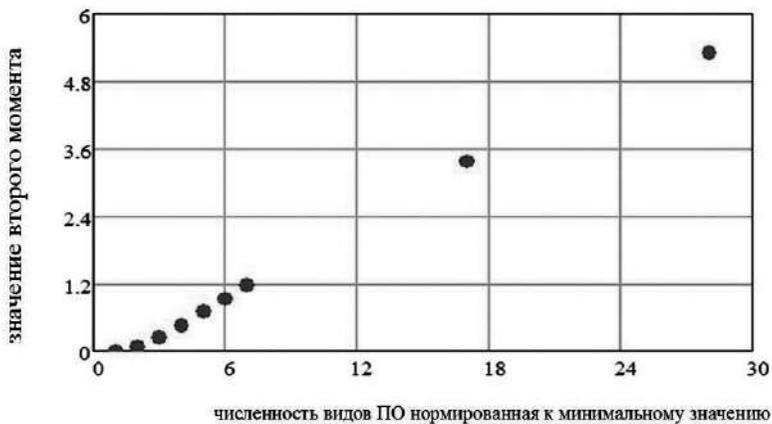


Рис. 3. График зависимости второго момента выборки по численности ПО

```

sh(i,C) := | n ← 0
           | b ← Ci
           | for j ∈ i.. rows (C) - 1
           |   | n ← n + 1 if b = Cj
           |   | break otherwise
           |   | j ← rows (C) if j = rows (C) - 1
           |   ( b )
           |   ( n )
           |   ( j )

dh(C) := | C ← sort (C)
         | i ← 0
         | k ← 0
         | while k < rows (C)
         |   | b ← sh(k,C)
         |   | Ai,0 ← b0
         |   | Ai,1 ← b1
         |   | i ← i + 1
         |   | k ← b2
         | A

```

Рис. 4. Фрагмент кода для построения видового распределения

С точки зрения последующей оптимизации номенклатуры ПО ОС важное значение имеет аппроксимация распределений, задача которой состоит в том, чтобы подобрать аналитическую зависимость, наилучшим образом описывающую совокупность точек. Аппроксимация может осуществляться различными методами, каждый из которых обладает как достоинствами, так и недостатками.

Основываясь на научных трудах В.И. Гнатюка, был выбран метод наименьших квадратов (МНК), как наиболее подходящий для полученных данных. Суть метода заключается в отыскании параметров аналитической зависимости, которые минимизируют

сумму квадратов отклонений эмпирических значений от значений, рассчитанных по аппроксимационной зависимости, которое описывается следующим выражением (2) [1].

$$\Omega_{\text{МНК}}(x) = \frac{C}{x^{1+\alpha}} \quad (2)$$

где $C = \exp(A_0)$ – постоянная распределения Ципфа; $\alpha = |A_1| - 1$ – показатель распределения Ципфа.

Результаты видового распределения и аппроксимационная зависимость представлены на рис. 5.

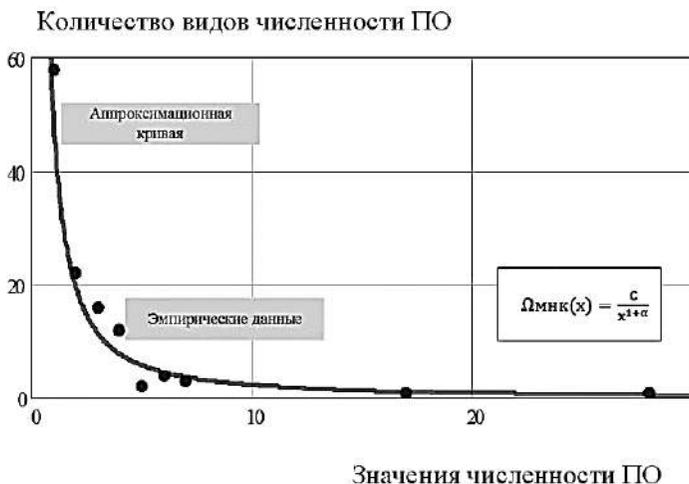


Рис. 5. Видовое аппроксимированное распределение

Построим аппроксимированное ранговое видовое распределение системы, которое описывается следующим выражением (3):

$$\lambda(r_\lambda) = \frac{\lambda_0}{(r_\lambda)^{\beta\lambda}} \quad (3)$$

где λ_0 – постоянная распределения; $\beta = |A_1|$ – показатель распределения. В графической форме ранговое видовое аппроксимированное распределение представлено на рис. 6.

Итак, можно отметить, что при управлении номенклатурой ПО ОС выбор рационального варианта будет основой для поддержки принятия решений ответственным должностным лицом в подразделении, отвечающего за установку и настройку ПО.

Таким образом, математические методы, использующие негауссовы распределения, можно применять для описания данных по номенклатуре ПО ОС.

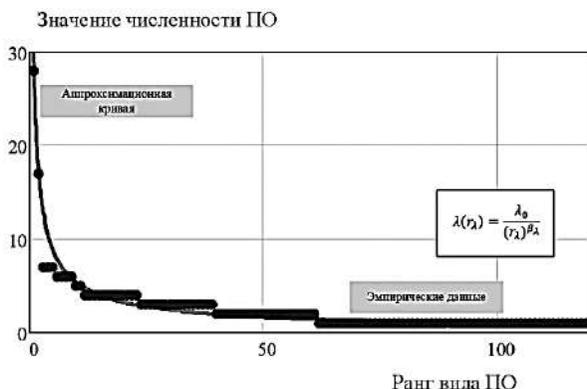


Рис. 6. Ранговое аппроксимированное распределение

Литература

1. **Гнатюк В.И.** Закон оптимального построения техноценозов [Монография]. 3-е изд., перераб. и доп. Электронные текстовые данные. Калининград: Изд-во КИЦ «Техноценоз», 2019.
2. **Новиков Д.А.** Теория управления организационными системами. 3-е изд., испр. и дополн. М.: Издательство физико-математической литературы, 2012. 604 с.
3. **Губко М. В., Новиков Д.А.** Теория игр в управлении организационными системами. М.: Синтег, 2002. 148 с.
4. **Олейник В.С., Луценко Д.В., Голубков А.В.** Параметрический анализ многономенклатурной организационно-технической системы техноценологического типа с использованием концепции баз данных // Материалы VIII Международного Балтийского морского форума – 2020. Т. 6. Калининград: БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2020. С. 9.

*С. А. Хорьков, horkov_07@mail.ru, УдГУ, Ижевск,
Ф.И. Маврикиди, mavrikidi@mail.ru, ИПНГ РАН, Москва,*

ПРИЧИННОСТЬ ЦЕНОЗОВ И СИСТЕМ

Техноценозы и естественные системы являются вариантами воплощения общей теории сложных систем. Их познанию и моделированию была посвящена вторая половина XX века. И сегодня с развитием информационных и сетевых технологий это направление получило беспрецедентную техническую базу, завоевывая все новые научные области и природные пространства.

Сейчас мы находимся в уникальном моменте, когда из материи (физики, механики) начинает развиваться символическая реальность (язык – информатика, искусственный интеллект), демонстрируя их неразрывную связь. Это явление было замечено в 90-х годах как тенденция к дематериализации, т.е. *нульмеризации* – сегодня *цифровизации*, науки. Цифровизация в естественнонаучном плане есть переход во фрактальную Вселенную – компьютер есть усеченное пространство фракталов. Именно поэтому, в силу универсальности фрактальной топологии материи, мышления и природы, стал возможен этот технологический скачок. Но, кроме технологии, этот скачок несет в себе новые теоретические возможности, которые скрыты за видимым прогрессом. Они заключаются в возможности развития формальной теории систем на базе фрактально-хаотических представлений.

Как отмечалось ранее [1], наука о сложных системах не вышла за рамки физических представлений и не смогла отобразить присутствующей системам двойственности. Её суть в том, что сложная система должна иметь как символическую – управляющую, часть, так и материальную – управляемую. Символическая часть обеспечивает возможность развития, качественной, событийной трансформации структуры и состава системы. Материальная часть обеспечивает инертное, качественно-однородное движение. В таком виде техногенные системы оказываются в потоке современных тенденций. Но

встал вопрос, на который ранее обращали внимание биологи и философы – в таком виде движение системных объектов отличается от движения физических, и причинность здесь более разнообразна. Например, существует так называемая загадка человеческого движения, которую каждый может обнаружить самонаблюдением – что движет нами, органами, эмоциями? Как наши мысли, решения, желания преобразуются в физическую активность?

До недавних пор символическая природа систем и ценозов оставалось недоступной формализации. Однако с развитием теории фракталов положение изменилось. Фракталы являются двойственными материально-символьными объектами и появились на стыке физики и теоретической информатики (рис. 1, К. Falconer Fractal Geometry of Nature. Mathematical Foundations and Application. Wiley, 2003. P. 96. Fig. 6.3).

Эта двойственность – связь материи и символа – исследована Г. Патти [2]. Его вывод, который согласуется с математикой фракталов – символ есть вырожденная материя. Он возникает в пределе делимости/вырождения материи, когда от неё остается нульмерное пространство *фрактальных границ* тел. Это ясно видно на примере итеративной системы функций – основного и наиболее естественного способа генерации фрактальных образов (рис. 2).

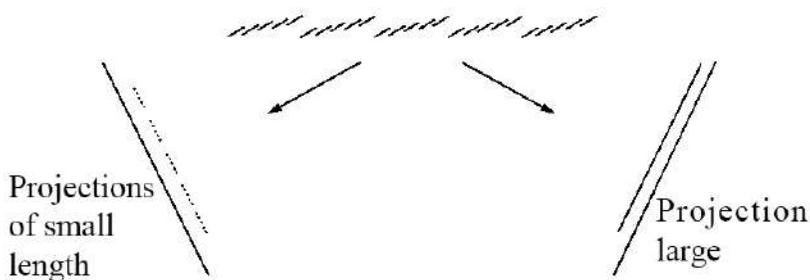


Рис. 1. Материально-символьная природа фракталов:

слева – нульмерная проекция, символы;
справа – сплошная проекция, материя

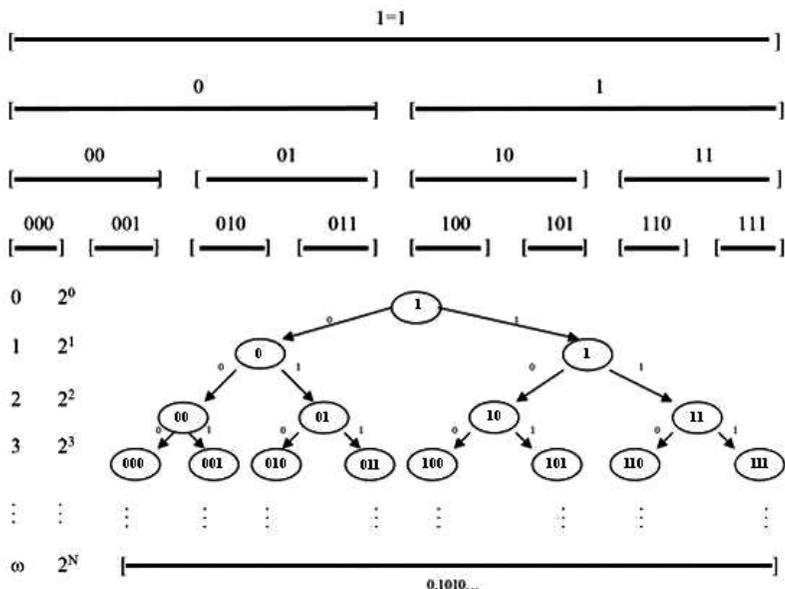


Рис. 2. Итеративная система функций как дерево бесконечной делимости материи и образования символических объектов:

отрезки – материальные фрагменты,
 кружки в ветвях – образование строк символов

Авторами была предпринята попытка описания математики ценозов и систем на базе фрактальных представлений [3], которая логически привела к необходимости полного анализа причинности их динамики. Данная работа посвящена представлению в своей основной части формализации причинных связей объектов двойной природы, таких как ценоз, представляющий систему (целое), воплощающий в себе материальный, энергетический и/или информационный ресурс, иерархическая многоуровневая структура которого состоит из самоподобных (символических) элементов.

Методологической основой анализа причинных связей является положение о самодвижении материи [4], а, значит, и о самоорганизации ценозов и естественных систем. При этом

конечное взаимодействие конечных вещей имеет своей основой вечное взаимодействие отдельных частей материальной субстанции. Одновременно взаимодействие тел и явлений природы представляет собой сложное переплетение различного вида взаимодействий элементов как одного структурного уровня, так и элементов разных структурных уровней.

Динамика ценозов как системных объектов должна охватывать не только техническую часть, но и учитывать взаимодействие системы с внешней средой, предвидеть и диагностировать отдаленные последствия реакции природной среды, ведущие зачастую к возникновению нештатных ситуаций, явлений технически обоснованных, но неприемлемых с социальной, политической и экологической точки зрения. Для того, чтобы эти разноприродные явления наравне с мышлением лица, принимающего решение (ЛПР), можно было включить в единый формализм, должен быть выработан единый язык.

Один из вариантов – естественный язык – является слишком лабильным и неоднозначным, зависимым от психики ЛПР, но позволяет увидеть аналогии. Если бы удалось включить в наведение мостов его второй полюс – число, то лабильность языка, неустойчивость планов содержания понятий была бы дополнена их ригидностью, устойчивостью. Тогда аналогии приобрели бы терминологический характер и, обретя таким образом *асимметричный дуализм своего знака*, могли составить основу языка системного взгляда. Такой язык мог бы послужить кандидатом на роль *нейтрального языка* В. Паули – общего языка внешнего и внутреннего миров человека [5]. Тем самым техногенные и естественные системы органично включались бы в мышление ЛПР, что позволило бы формализовать их взаимодействие. В этом случае технический язык ЛПР не был бы ограничен физикой «видел» бы адекватную картину эффектов и последствий своих действий.

Такой язык оказывается возможным на основе фрактальных представлений о двойственности и их теоретико-числовой модели в виде объединения U_S вещественных R и 2-адических (компьютерных) чисел Z_2 , названной числовой асимметрией:

$$U_S = R \times Z_2,$$

которая играет роль пространства системных объектов. Более широко язык рассматривают как самостоятельную, отличную от физики, действующую среду, в которой антиномично сопряжены вещьность и деятельность [6, 7]. В дальнейшем указанную антиномию расчлняют на частные антиномии: объективности и субъективности слова, речи и понимания, свободы и необходимости, индивидуума и народа [6].

Можно показать, основываясь на психофизиологии восприятия человека, что числовая асимметрия тождественна пространству восприятия, первой $1cc$ и второй $2cc$ сигнальной системы

$$U_H = 1cc \times 2cc \cong U_S.$$

Первая сигнальная система реагирует на воздействия, оказываемые на все органы чувств, ориентирует человека в физическом материальном мире и направлена на техническое управление материальными объектами. Вторая сигнальная система реагирует на слова, тексты, теории, и потому имеет символический характер, способна к автореферентности, самоописанию. Это свойство открывает возможность трансформации техногенной системы в более широком спектре движений, нежели диктуемых физикой.

Отсюда становится понятным, что спектр движений ценоза-системы значительно шире, нежели его как физического объекта. Разница между этими множествами заключается в возможности существования символических и семантических энергий-движений, которые исходят из второй сигнальной системы и пространства

2-адических чисел Z_2 . То, что этот вопрос не сводится к физике, ясно уже из того, что техногенные системы как и живые организмы способны самостоятельно генерировать движение, т.е. они несут в себе его источник.

Движения-причины. Рассмотрим вопрос о движениях в пространстве числовой асимметрии как объективной реальности. В пространстве числовой асимметрии отсутствуют и не будут вводиться какие-либо координатные системы физики. Все, что можно здесь сделать, это рассмотреть относительные движения точек

$$u = x \cdot \xi \quad \text{и} \quad v = y \cdot \eta, \quad x, y \in R, \xi, \eta \in Z_2. \quad u \in U_S \cong U_H.$$

Имеем четыре производные, определяющие базисные движения:

$$E = \frac{du}{dv} = (e_1 = \left. \frac{du}{dv} \right|_{\infty}, e_2 = \left. \frac{du}{dv} \right|_2, e_3 = \left. \frac{du}{dv} \right|_{\infty}, e_4 = \left. \frac{du}{dv} \right|_2)$$

$$\left. du \right|_{\infty} = \left. dx \right|_{\infty} \cdot \xi \qquad \left. du \right|_2 = x \cdot \left. d\xi \right|_2$$

$$\left. dv \right|_{\infty} = \left. dy \right|_{\infty} \cdot \eta \qquad \left. dv \right|_2 = y \cdot \left. d\eta \right|_2.$$

Здесь знаки $\left| \right|_{\infty}$ и $\left| \right|_2$ обозначают метрику и ультраметрику соответственно. Тогда, с учетом существования обратных элементов, $\exists z = x^{-1}, \exists \zeta = \xi^{-1}$, получим:

$$e_1 = \left. \frac{dx}{dy} \right|_{\infty} \cdot \frac{\xi}{\eta}, \quad e_2 = \left. \frac{dx}{d\eta} \right|_2 \cdot \frac{\xi}{y}, \quad e_3 = \left. \frac{d\xi}{dy} \right|_{\infty} \cdot \frac{x}{\eta}, \quad e_4 = \left. \frac{d\xi}{d\eta} \right|_2 \cdot \frac{x}{y}.$$

Связь движений обнаруживается, если взять произведение их выражений, с учетом гиперболического соотношения для метрик в общей формуле числа

$$\|u\| = \left| x \right|_{\infty} \cdot \left| \xi \right|_2 \quad \text{и} \quad \|v\| = \left| y \right|_{\infty} \cdot \left| \eta \right|_2, \quad \text{и поэтому} \quad \left| \bullet \right|_{\infty} \cong \frac{\left\| \bullet \right\|}{\left| \bullet \right|_2}.$$

Перемножив базисные движения, с учетом обратимости элементов, получим:

$$e_1 \cdot e_2 \cdot e_3 \cdot e_4 = \frac{c_x^2}{c_v^2} \cdot (x \cdot y^{-1})^2 \cdot (\xi \cdot \eta^{-1})^2 = c_u \cdot (e_1 \cdot e_2 \cdot e_3 \cdot e_4) \cdot L \cdot \Lambda \neq 0,$$

Здесь $L \in R$ и $\Lambda \in Z_2$, поэтому, в силу произвольности выбранных точек u и v общее выражение для числовой асимметрии с учетом причинности-энергетики переписывается в виде:

$$U_S = U_H = (e_1 \cdot e_2 \cdot e_3 \cdot e_4) \cdot L \cdot \Lambda,$$

Причинно-рефлексивный круг. Четыре причины можно рассмотреть как функции между подпространствами числовой асимметрии. Получим рефлексивный круг как круговорот причин:

$$\begin{array}{ccc} Z_2 & \xrightarrow{e_4} & Z_2, \\ e_3 \uparrow & & \downarrow e_2, \\ R & \xleftarrow{e_1} & R. \end{array}$$

Рассмотрим эти четыре причины с точки зрения топологии. Все они действуют в *поле* объективной реальности, как во внутреннем, так и во внешнем мирах.

1. $e_1: R \rightarrow R$ – моторное действие, движение в физическом пространстве. Действует в физическом мире. Возникновение/порождение нового. Эмерджентность в теории систем.

2. $e_2: Z_2 \rightarrow R$ – преобразование символической реакции в физическое действие. Материализация, конвергирующее действие/причина.

3. $e_3: R \rightarrow Z_2$ – действие внешнего материального, физического стимула на символическое пространство системы.

4. $e_4: Z_2 \rightarrow Z_2$ – внутрисистемные преобразования, перестройка организации, структуры. Принятие решений.

Из определения видно, что пары движений-энергий связаны отрицанием/инволюцией:

$$e_1 = inv e_4, \quad e_2 = inv e_3.$$

В соответствии с рефлексивными свойствами пространства

$$U_S \cong U_H = (R \times Z_2) \times (R \times Z_2) \times \dots \times (R \times Z_2) = (R \times Z_2)^n$$

рефлексивный круг *многомодален многопредметен*. В каждой модальности действуют своя четверка движений-энергий. Все они оказываются взаимосвязанными как части и целое.

В моделях ценозов модальностями можно считать интерпретации моделей [8]. Все модели двойственны, все имеют меры и метрики, что позволяет в потенции количественно оценивать их ресурсы и структуры. Пространство моделей гиперболическое. Ресурсы простейших моделей связаны на гиперболическом пространстве законом масштабирования. Эту связь можно представить и как тензорное произведение топологических пространств. Насколько известно авторам, такая техника еще недостаточно развита и не доведена до расчетных формул [9, 10]. С точки зрения считающей парадигмы точных наук здесь наличествует принципиальная трудность – взаимная неопределимость метрик двух числовых систем. Поэтому определима только e_1 , частично определимы e_2 и e_3 , и полностью неопределима e_4 . Поэтому пока здесь напрашивается не прогноз, но диагноз. Не причинно-следственная картина, но анализ симптомов, узких мест, слабых звеньев.

Причинно-рефлексивный круг в естествознании известен как круговорот материи, состоящий из многочисленных разноприродных циклов, действующих на всех масштабах [4]. Здесь можно усмотреть новую структуру числового моделирования как двух систем уравнений для внешней и внутренней сред ценоза. Их сопряжение можно провести по, например, энергии e_1 . Здесь внешнее пространство R должно будет включено в такой же причинно-рефлексивный круг окружающей среды.

В теории систем поиск материальной причины *эмерджентности* – появления новых качеств – теряется в «нульмерном» тумане. По-видимому, причинно-рефлексивный круг может служить кандидатом на объяснение этого феномена.

Эти интересные и важные вопросы требуют отдельной большой работы и здесь не рассматриваются.

Литература

1. **Шрейдер Ю.А.** Сложные системы и космологические принципы // В кн.: Герасимова И.А. Противоположности и парадоксы. М.: Канон+, 2008. С. 287–318.

2. **Pattee Н.** Evolving Self-reference: Matter, Symbols, and Semantic Closure // Communication and Cognition—Artificial Intelligence. 1995. 12(1–2). 9–28,

3. **Хорьков С.А., Маврикиди Ф.И.** Ценозы, системы и их модели. Ижевск: Изд. центр. Удм. ун-та, 2021. 92 с.

4. **Лойфман И.Я., Стадник В.П.** Единство природы и круговорот материи. Свердловск: Изд-во Урал. ун-та, 1988. 204 с.

5. **Gieser S.** Jung, Pauli and Symbolic Nature of Reality // In The Pauli – Jung Conjecture and Its Impact Today. Atmanspacher H., Fuchs C. (eds.). Imprint Academic, 2014. P. 151–180.

6. **Флоренский П.А.** У водоразделов мысли (Черты конкретной метафизики). Том 3(1). С. 144–145.

7. **Pike К.** Language as particle, wave and Field // The Texas Quarterly 2:2(1959), 37–54.

8. **Хорьков С.А.** Проблема расчета электропотребления многономенклатурного цеха промышленного предприятия, модели и методики её решения. Ижевск: Изд-во ИЖГТУ, 2019. 124 с.

9. **Ryan R.A.** Introduction to tensor Product of Banach Spaces. Springer, 2002.

10. **Петров А.Е.** Тензорный метод двойственных сетей. М.: ООО «Центр информационных технологий в природопользовании», 2007. 496 с.

Р.В.Гурина, roza-gurina@yandex.ru, УлГУ, г. Ульяновск
В.В. Лизяева, vilenabedash@yandex.ru,
ОГАОУ многопрофильный лицей № 20, г. Ульяновск

ЦЕНОЛОГИЧЕСКАЯ САМООРГАНИЗАЦИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Самоорганизующиеся системы изучает *синергетика* – научное направление, возникшее во второй половине прошлого столетия (Г. Хакен и И. Пригожин) [1, 2]. Положения синергетики с тех пор были распространены практически на все сферы естественнонаучных и гуманитарных знаний. Синергетика вначале распространялась на биологию и экологию, рассматривая процессы самоорганизации на микро- и макроуровнях развития биосферы. Распространив теорию на Вселенную, синергетика признала самоорганизацию объектов космоса на всех его структурных уровнях – от микро- до мегауровня [3, 4].

Однако синергетические явления плохо изучены применительно к социальным явлениям. В настоящей работе рассматривается *синергетика образовательных систем на основе ценологического подхода*, который лишь точечно применяется в сфере образования (Ульяновский государственный университет). Вышесказанное составляет один из аспектов новизны исследования, излагаемого в данной статье.

Ключевое слово ценологической теории и ценологического подхода – *ценоз*. Не любое сообщество определяется как ценоз. *Ценоз* – это сообщество, имеющее определённое место обитания, ранговое распределение (РР) объектов (единиц, особей) в котором описывается уравнением гиперболы. При этом РР – это распределение, в котором параметры объектов выстраиваются по рангу от максимального до минимального значения.

Ценология как научное направление, изучающее ценозы разной природы, зародилась около 40 лет назад, когда профессором МЭИ Б.И. Кудриным было совершено открытие нового типа цено-

зов – *техноценозов*. Им создано учение о техноценозах (технетика) – технических изделиях как «сообществах», самоорганизующихся в ценозы с гиперболическим ранговым распределением изделий-особей в них (www.kudrinbi.ru) [5, 6].

Особенностями и признаками таких сообществ являются:

- относительно однородное жизненное пространство;
- связь особей между собой и окружающей их средой;
- борьба особей за ресурсы;
- способность сообщества к саморегулированию;
- гиперболическое РР объектов (особей) в сообществе.

1. Фрактальная самоорганизация образовательных объектов по ценологическому принципу. По Б.И. Кудрину РР объектов в техноценозе, как и в любом ценозе, является *гиперболическим H -распределением* и выражается математической зависимостью [5]

$$W = \frac{A}{r^\beta}, \quad (1)$$

где W – численные значения параметров, характеризующих ценоз; r – ранговый номер объекта ценоза (1, 2, 3...), A – максимальный параметр объекта ($W = A$ при $r = 1$), β – показатель, влияющий на кривизну гиперболы. В педагогических ценозах ранжируются такие характеристики, как успеваемость, рейтинг в баллах участников ЕГЭ, число учащихся, поступивших в вузы и др. Следовательно, ценозы представляют собой системы с H -распределением объектов в них. Это является необходимым признаком сообщества как ценоза. Б. И. Кудрин перенес терминологию из биологии в понятийный аппарат ценологии (особь – единица ценоза и др.)

Проверка сообщества на наличие последнего признака «ценозности» осуществляется двумя параллельными способами. Во-первых – аппроксимацией эмпирического РР математической зависимостью (1) с помощью компьютерных программ, осуществляющих регрессионный анализ и определяющих квадрат коэффициента регрессии R^2 . Значение коэффициента регрессии R (корень квадратный из R^2) показывает уровень совпадения эмпирических

точек с аппроксимационной гиперболой. На втором этапе производится построение эмпирической зависимости в двойном логарифмическом масштабе и аппроксимация полученной прямой с вышеизложенными требованиями и регрессионным анализом.

Теория Б.И. Кудрина развита его последователями [7] и распространена на другие сферы научных знаний. Авторы настоящей работы успешно используют этот подход в образовании [8–13].

В технике «особи» – отдельные технические объекты, в космосе – астрономические объекты, в системе образования «особи» – это единицы образовательных систем (участники образовательного процесса, классы, учебные группы, школы и т.д.), мощность популяции – это количество учащихся в группе. Школа – это тоже социоценоз, состоящий из особей – отдельных структурных единиц – классов [8, 9]. При этом количество классов в школе составляет мощность популяции. Система школ района, города – это ценоз более крупного масштаба, где структурная единица – школа.

Б.И. Кудрин сразу обратил и заострил внимание на *механизм самоорганизации техники в системы с гиперболическим распределением* (подобный биологии), который до сих пор не раскрыт. Действительно, объекты ранговых распределений: 120 тыс. электродвигателей Магнитки, 60 тыс. – Запсиба устанавливались на протяжении многих лет разными специалистами и управленцами, работавшими независимо друг от друга, живших в разное время, в разных городах. Никто из них не задавался целью формировать кривую *H*-распределения. Биоценозы и экоценозы формируются без прямого участия человека, хотя и здесь механизм образования ценозов неясен. Но он в корне не ясен в формировании *H*-распределений всех видов технических изделий, формирующих техносферу, порождённую человеком [5]. Аналогичные рассуждения справедливы для других видов ценозов: экономических, космических, социальных и др. Однако почему объекты самоорганизуются именно так? На это пока нет ответа.

В ходе изучения различного рода ценозов на различных иерархических уровнях, исследователи-ценологи пришли к выводу о фрактальном характере ценологических процессов. По Мандельброту [15] *фракталом является структура, в которой части подобны целому*. Фрактальность проявляется многократным повторением исходной фигуры в меньших и больших масштабах. Следовательно, *самоподобие* – основное свойство фракталов.

Модель иерархического синергетического строения системы образования по ценологическому принципу представляет совокупность самоподобных систем-аналогов возрастающего масштаба. В данной работе *впервые* изложена и обоснована **идея фрактальной самоорганизации социальных, в том числе образовательных систем**. В работе обосновывается фрактальность как неотъемлемая свойство педагогических (образовательных) ценозов, что составляет *новизну* и ценность настоящего исследования. Самоподобие фрактальных уровней образовательных систем обусловлено не геометрией, а наличием на разных иерархических уровнях *ценозов*, которые самоорганизуются в соответствии с *H-распределением* (1). То есть мы заявляем о *ценологической фрактальности*, выраженной в самоорганизации социумов на разных иерархических уровнях *не по геометрическому, а по ценологическому типу*.

Ниже иллюстрируется фрактальное самоподобие образовательных систем-ценозов на нескольких иерархических масштабных уровнях: I уровень – учебная группа; II уровень – школа, вуз; III уровень – город, регион; IV уровень – уровень страны; V – мировой уровень. Схема рис. 1 иллюстрирует вышесказанное.

Чтобы определить тесноту ценологической связи между выборками значений параметров *W* с разных иерархических уровней, применялся метод корреляционного анализа Пирсона [15]. Для рассмотренных пар *H-распределений* образовательных сообществ с двух разных уровней вычислены коэффициенты Пирсона. Они имеют высокие значения, близкие к 0,9. Таким образом, результаты сравнительного анализа парных выборок образователь-

ных объектов двух разных иерархических уровней методом Пирсона свидетельствует о ценологическом фрактальном характере самоорганизации образовательных сообществ, объектов, систем на всех уровнях.



Рис. 1. Пирамидальная схема, отражающая фрактальную иерархию уровней (1–5) самоорганизации образовательных объектов (учащихся, образовательных учреждений); ГРР – гиперболические ранговые распределения (*H*-распределения)

2. Примеры рейтинговой самоорганизации объектов в образовании на разных иерархических уровнях. Доказательством изложенного является полученный обширный эмпирический графический материал *H*-распределений или гиперболических ранговых распределений (ГРР) образовательных объектов на разных уровнях с аппроксимацией зависимостью (1) с высокой степенью точности: коэффициент корреляции *R* во многих случаях имеет значения 0,8–0,9. Графики *H*-распределений перестраивались в двойном логарифмическом масштабе, в котором гипербола преобразуется в прямую, также с высокой степенью аппроксимации. В качестве примеров приведен ряд графиков ГРР, иллюстрирующих вышесказанное (рис. 2–7).

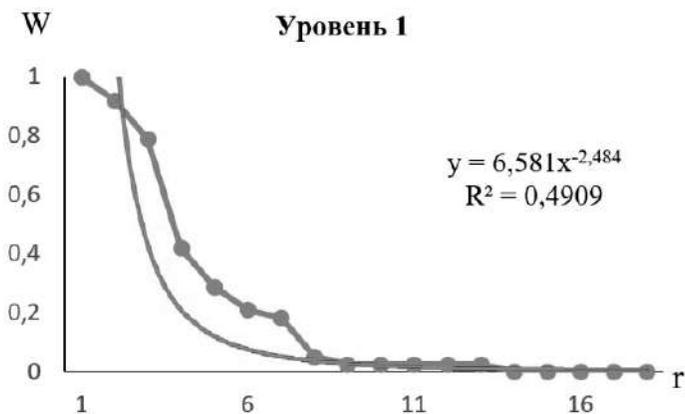


Рис. 2. ГРР учащихся 10-го класса одного из лицеев г. Ульяновска – участников Всероссийской олимпиады школьников по математике (2022 г.):

W – приведённое количество баллов (максимальное количество баллов – 38);
 r – ранговый номер учащегося; $\beta = 2,48$; $R = 0,7$

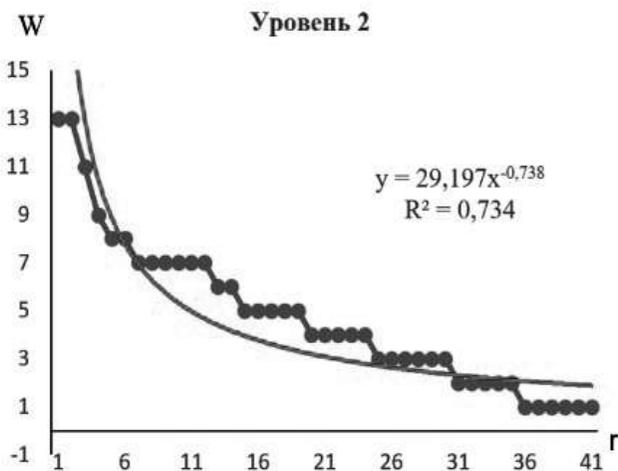


Рис. 3. ГРР преподавателей разных кафедр УлГУ по индексу Хирша (2014 г.):

W – показатель цитируемости,
 r – ранговый номер по рейтингу; $\beta = 0,74$; $R = 0,86$

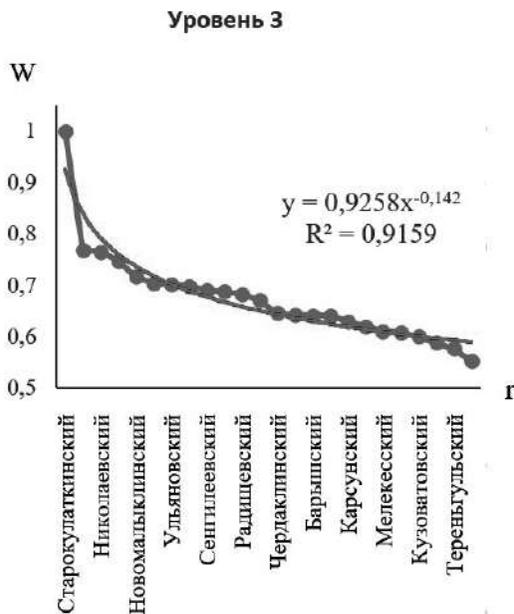


Рис. 4. ГРР участников ЕГЭ по истории в Ульяновской области (2023 г.): W – приведённое количество баллов, r – ранговый номер района;
B = 0,14; R = 0,96

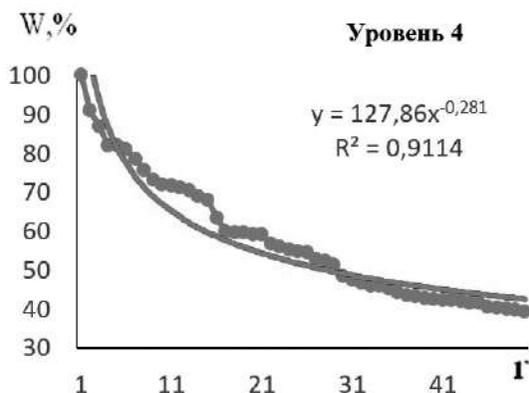


Рис. 5. ГРР лучших школ России по конкурентоспособности выпускников (2000 г.):
W – количество баллов, r – ранговый номер школы; $\beta = 0,28$; R = 0,95

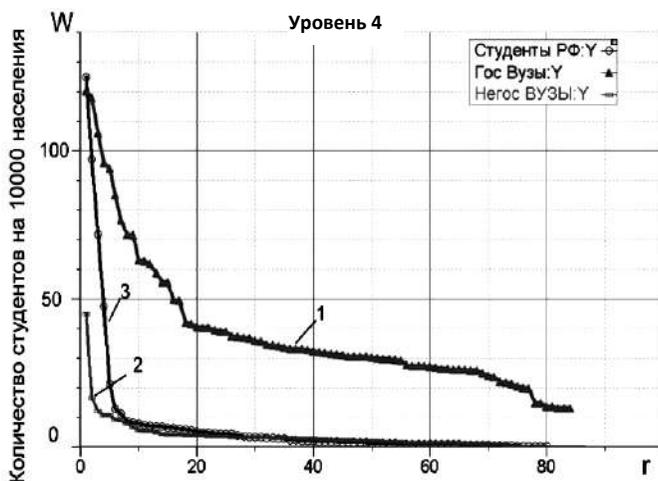


Рис. 6. РР количества студентов вузов на 10 000 населения по регионам РФ (2007 г.):

- 1 – РР студентов государственных вузов; 2 – негосударственных вузов;
 3 – общее РР студентов государственных + негосударственных вузов ($\beta = 0,96$;
 ранги: 1 – Москва, 2 – Санкт-Петербург, 3 – Свердловская область,
 12 – Республика Башкортостан, 36 – Ульяновская область,
 85 – Ненецкий автономный округ; $W = 0,2$)

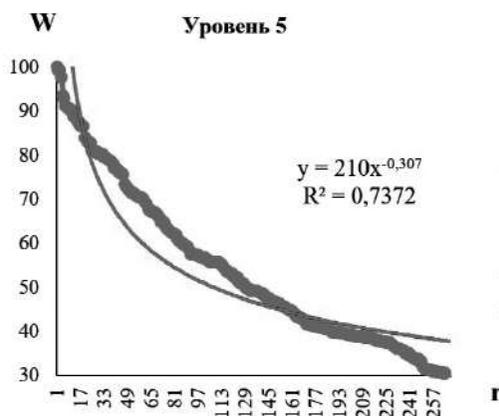


Рис. 7. ГРР участников международной олимпиады по физике (2023 г.):

- W – количество баллов, r – ранговый номер учащегося; $\beta = 0,3$, $R = 0,86$;
 1–4 место – участники из Китая, 10 место – участник из России,
 268 место – участник из Таджикистана

Результаты и выводы. Выявлен характер фрактальной самоорганизации образовательных объектов, который соответствует ценологическому принципу на всех иерархических уровнях образовательных систем-ценозов. Результаты подтверждены в ходе сравнительного анализа парных выборок образовательных объектов с разных иерархических уровней методом Пирсона. Однако почему образовательные объекты самоорганизуются именно в ценозы на всех иерархических уровнях – на это пока нет ответа.

Применение рангового анализа является ядром *ценологического подхода в методологии науки*.

Литература

1. **Хакен Г.** Синергетика. М.: Мир, 1980. 404 с.
2. **Пригожин И.** От существующего к возникающему. М.: КомКнига, 2006. 296 с.
3. **Шарлье К.** Небесная механика. М.: Наука, 1966. 627 с.
4. **Гурина Р.В.** Ценологический принцип самоорганизации космической материи: Бог не играет в кости // Физическое образование в вузах. 2021. Т. 27. № 2. С. 13–27.
5. **Кудрин Б.И.** Введение в технетiku. Томск, 1993. 552 с.
6. **Кудрин Б.И.** Техногенная самоорганизация. Для технариев электрики и философов. // «Ценологические исследования». Вып. 25. М.: Центр системных исследований, 2004. 248 с.
7. **Гнатюк В. И.** Оптимальное построение техноценозов. Теория и практика // «Ценологические исследования». Вып. 9. М.: Центр системных исследований, 1999. 272 с.
8. **Гурина Р.В.** Ранговый анализ образовательных систем (ценологический подход): методические рекомендации для работников образования // «Ценологические исследования». Вып.32. М.: Технетика, 2006. 40 с.
9. **Гурина Р.В., Евсеев Д.А.** Ранговый анализ, или ценологический подход, в методологии прикладных исследований: Монография. Ульяновск: УлГУ, 2018. 287 с.
10. **Гурина Р.В.** О включении ценологических знаний в содержание образования // Проф. образование в современном мире. 2017. Т. 7. № 3. С. 1246–1252.

11. **Гурина Р.В., Морозова Е.В.** Ценология – учение о ценах разной природы //Образовательные технологии. 2020. № 1. С. 40–49.

12. **Гурина Р.В., Морозова Е.В., Кошева В.В.** Ранговый анализ в оценке валидности олимпиадных заданий // Профессиональное образование в современном мире. 2020. Т. 10. № 4. С. 4302–4309.

13. **Гурина Р.В.** Проблемы формирования у студентов ценологических знаний и представлений как составляющих научной картины мира // Учёные записки ЗабГУ. 2017. Том 12. № 6. С. 74–79.

14. **Мандельброт Б.** Фрактальная геометрия природы. Москва–Ижевск: 2002. 656 с.

15. **Сидоренко Е.В.** Методы математической обработки в психологии. СПб.: ООО «Речь», 2002. 350 с.

А.А. Ковалёв, sheynin@mail.ru, БФУ им. И. Канта, Калининград
Н.Н. Шушарина, nnshusharina@gmail.com,
А.А. Зайцев, aa039@yandex.ru

НОРМИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ РАНГОВОГО АНАЛИЗА

Нормирование двигательной активности человека является крайне актуальной проблемой, так как в России реализуется «Стратегия формирования здорового образа жизни населения, профилактики и контроля неинфекционных заболеваний на период до 2025 года» [1]. Однако рекомендации ВОЗ и Минздрава РФ по занятиям физической культурой не учитывают индивидуальные особенности человека [2]. В настоящее время отсутствует методология нормирования двигательной активности на основе рангового анализа [3].

Анализ работ в области нормирования физической нагрузки позволил выделить два подхода: до цифровизации и после (рис. 1). Разумная норма интенсивности усилия позволит создать необходимый оздоровительный и тренировочный эффекты. Для определения такой нормы может быть использован параметр – частота сердечных сокращений (ЧСС, уд/мин).

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ОЗДОРОВИТЕЛЬНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ	
ДО ЦИФРОВИЗАЦИИ	ПОСЛЕ ЦИФРОВИЗАЦИИ
<p>П.В. Лесгафт, Г.Л. Аланасенко, Авиценна, Ж.К. Холодов, Н.М. Амосов, Н.А. Бернштейн, В.М. Волков, А.Д. Жуков, Н.Е. Ларинский, Ф.Н. Кузовлев, Е.Г. Мильнер, К.В. Судаков, В.М. Покровский, В.И. Белов, А.Г. Фурманов, М.Б. Юспа, И.И. Брехман, Р.А. Хайрулин, А.И. Суханов, Т.И. Сулимов, С.Н. Попов, П.К. Анохин, Ю.Н. Вавилов</p> <p>А.А. Виру, Ф. Конкони, П. Брегг, К. Купер, Л.А. Ланцберг, Р. Гиббс, Х. Линдеман, Э.Т. Хоули, Б.Д. Френкс, Дж.Х. Уилмор</p>	<p>В.Н. Селуянов, Е.Б. Мьякинченко, С.П. Евсеев, А.А. Зайцев, Е.Н. Алексеева, Н.Н. Голякова, Т.Д. Федотова, С.В. Савин, О.Н. Степанова, В.А. Усков, В.Л. Кондаков, Э.В. Буланова, В.Г. Осипов, Н.К. Ким</p> <p>С.К. Киффер, Д. Науман, К. Сиверуд, Х. Селбоскар, С. Людерсен, У. Эжелунд, У. Вислофф</p>
<p>Дозирование физической нагрузки осуществляется по общим формулам с учетом контрольных замеров, учитывающих текущее состояние человека</p>	<p>Дозирование двигательной активности посредством современных цифровых технологий</p>
<p>Отсутствие цифровых технологий, малая информативность, персонификация без учета суточных данных деятельности человека</p>	<p>Отсутствует теория дозирования двигательной активности человека на основе методологии рангового анализа. Не учитываются суточные данные с носимых устройств</p>

Рис. 1. Подходы к нормированию физической нагрузки

С целью определения индивидуальных норм оздоровительной физической нагрузки разработана технология нормирования физической нагрузки, фундаментом которой является теория рангового анализа [4–6] и закон энергетического баланса человеческого организма [7, 8] (рис. 2).

На подготовительном этапе проводится анализ исходных данных. На втором этапе – сбор суточных данных ЧСС (рис. 3).

На этапе обработки суточных данных ЧСС применяются инструменты рангового анализа – аппроксимация значений ЧСС и построение ранговых распределений (рис. 4) [4–6].

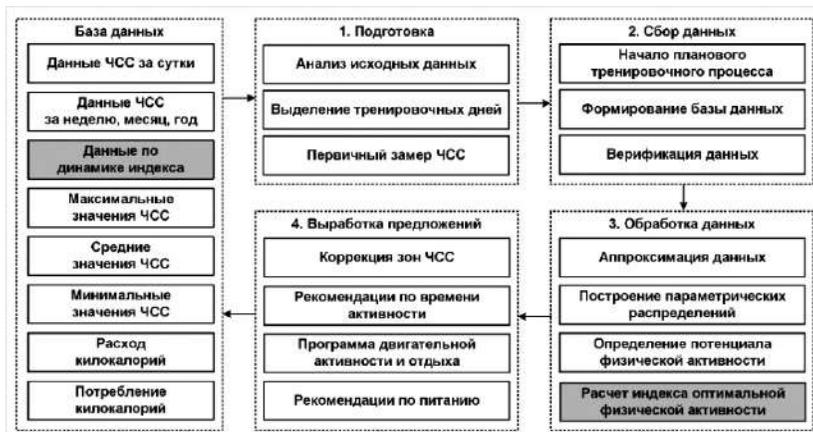


Рис. 2. Технология нормирования физической нагрузки

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1		01.03.2018	02.03.2018	03.03.2018	04.03.2018	05.03.2018	06.03.2018	07.03.2018	08.03.2018	09.03.2018	10.03.2018	11.03.2018	12.03.2018
2	0:00	53	50	51	48	48	50	50	56	56	52	55	48
3	0:01	52	50	53	49	50	52	65	56	56	52	48	48
4	0:02	53	50	49	50	63	63	63	63	63	58	52	49
5	0:03	52	49	49	51	50	57	57	57	58	52	53	51
6	0:04	53	50	54	51	49	57	57	57	55	52	49	52
7	0:05	53	49	49	49	46	51	50	56	54	51	49	53
8	0:06	50	49	50	50	46	51	50	56	58	52	50	52
9	0:07	50	50	50	50	48	51	54	57	55	50	49	53
10	0:08	52	50	51	49	48	50	47	70	56	51	50	54
11	0:09	51	50	49	50	49	51	48	58	58	51	51	47
12	0:10	60	51	50	49	51	51	48	54	60	50	50	48
13	0:11	55	58	50	49	55	55	49	53	62	51	50	49
14	0:12	49	50	50	50	55	48	49	53	59	51	50	50
15	0:13	52	49	49	50	49	49	50	54	60	65	50	51
16	0:14	50	54	51	49	58	49	51	54	60	60	50	50
17	0:15	50	50	50	49	49	49	52	55	60	60	50	50
18	0:16	51	50	50	48	48	49	53	56	61	61	50	50
19	0:17	56	52	50	50	47	48	52	55	64	59	48	51

Рис. 3. Таблица с цифровыми данными пульса

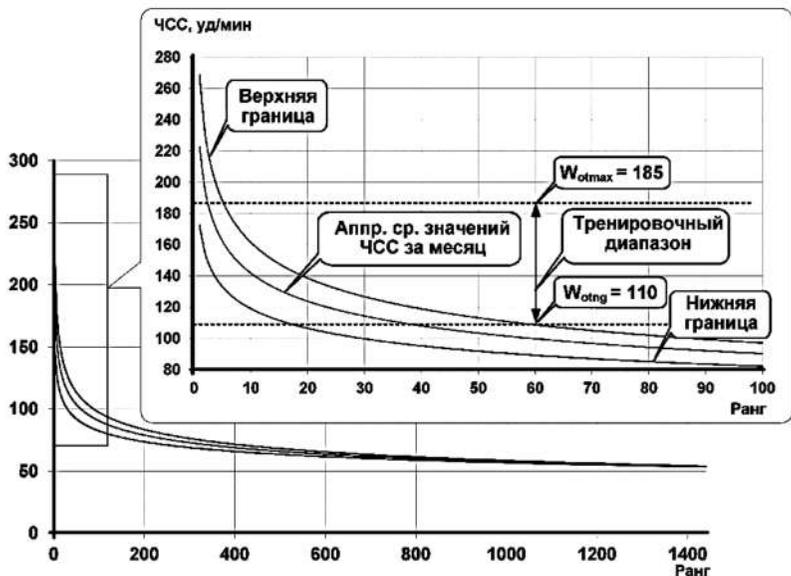


Рис. 4. Верхняя и нижняя границы тренировочной нагрузки

На четвертом этапе подхода формируются рекомендации (нормы) нахождения в зонах ЧСС (рис. 5) [4–6]. Рекомендуемая частота пульса соответствует значениям ЧСС нижней, средней и верхней границ (рис. 4).

Уровень подготовки					
Зона ЧСС	ЧСС, уд/мин.	Нач.	Ср.	Продв.	Эффект
Анаэробная	до 185	1 мин	4 мин	8 мин	Анаэр.
Пороговая	до 167	1 мин	4 мин	7 мин	Анаэр.
Аэробная	до 148	4 мин	7 мин	12 мин	Аэроб.
Средняя	от 110 до 130	9 мин	22 мин	31 мин	Аэроб.
Время, мин	-	15 мин	37 мин	58 мин	-

Рис. 5. Нормы нахождения в зонах ЧСС, в минутах

Полученные рекомендации могут быть использованы в качестве персональных норм физической активности, а через определенный период времени (месяц, квартал, год) могут быть обновлены с помощью вышеперечисленных этапов. Выполнение самих норм можно отслеживать как во время или после занятий (рис. 6), а также спустя неделю с помощью индекса оптимальной физической активности, который учитывает всю активность за неделю [7, 8].



а



б

Рис. 6. Экран смарт-часов:

а – ЧСС в реальном времени; б – общее время нахождения в зонах ЧСС

Таким образом, на основе теории рангового анализа разработана технология нормирования физической нагрузки. В рамках данной технологии разработана научно обоснованная методика оптимального нормирования двигательной активности, которая включает 4 этапа [6, 7].

Работа проведена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения государственного задания № FZWM-2020-0013.

Литература

1. **Приказ Минздрава России** от 15.01.2020 г. № 8 «Стратегия формирования здорового образа жизни населения, профилактики и контроля неинфекционных заболеваний на период до 2025 года».
2. **Минздрав России** // Электронные данные. Режим доступа URL: <https://minzdrav.gov.ru/news/2020/02/18/13372-spetsialistaminzdrava-rossii-razrabotany-rekomendatsii-po-zanyatiyu-sportom-dlya-naseleniya> (дата обращения 22.06.2022).
3. **Kieffer S.K., Nauman J., Syverud K., Selboskar H., Lydersen S., Ekelund U., Wisløff U.** Association between Personal Activity Intelligence (PAI) and body weight in a population free from cardiovascular disease // The HUNT study The Lancet Regional Health – Europe. Volume 5, June 2021, 100091.
4. **Кудрин Б.И.** Введение в технетику. Томск: ТГУ, 1993. 552 с.
5. **Гнатюк В.И., Шейнин А.А.** Методы нормирования номенклатуры и ресурсопотребления инфраструктурных объектов // Промышленная энергетика. 2017. № 6. С. 31–33.
6. **Шейнин А.А., Геллер Б.Л.** Принцип оптимальной комбинации элементов для систем различного типа // Материалы IX Международного Балтийского морского форума: в 6 т. Калининград, 2021. С. 215–218.
7. **Зайцев А.А., Шейнин А.А.** Особенности управления двигательной активностью человека с применением рангового анализа частоты сердечных сокращений // В сборнике: Восток – Россия – Запад. Физическая культура, спорт и здоровый образ жизни в XXI веке. Материалы XXII международного симпозиума. Калининград, 2021. С. 33–38.
8. **Шейнин А.А., Косенков О.Н.** Критериально-алгоритмическая система закона энергетического баланса человеческого организма // Энергоэффективность. Ценология. Экология и Энергобезопасность. Материалы научной конференции. Астрахань, 2020. С. 221–237.

ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЮ

Электропотребление объектов регионального электротехнического комплекса (далее – РЭК), в который входит 64 расположенных в Калининградской области объекта, постоянно растёт, как видно из данных с 2015 по 2022 гг. (рис. 1). Это объясняется непрерывным увеличением доли технической составляющей, поскольку современные технические средства производства и автоматизированные системы технического контроля комплектуются энергоёмким оборудованием (системы охлаждения и поддержания постоянной температуры, серверные, блоки питания, стабилизаторы напряжения и т.п.), происходит рост установленной мощности, растет электропотребление объектов.

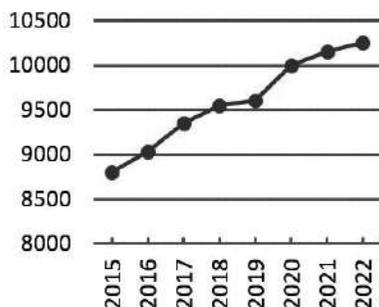


Рис. 1. Электропотребление регионального электротехнического комплекса, МВт·ч в год

Кроме того, рост обусловлен несовершенством существующих методик управления, а его децентрализованный характер приводит к тому, что специалисты материально-технического обеспечения органов управления слабо влияют на режим эксплуатации технических средств в реальных условиях.

В соответствии с программой «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 28 июля 2017 г. № 1632-р, цифровая форма хранения и обработки данных названа одним из важных факторов производства во всех сферах социально-экономической деятельности. Целью применения цифрового двойника является управление электропотреблением РЭК, он задействует один из параметров системы – электропотребление, и называется однопараметрическим. РЭК рассматривается как организационно-техническая система (далее – система, если не указано иное).

При этом решаются задачи обеспечения как устойчивого функционирования электротехнического комплекса, так и прогнозируемого процесса электропотребления, реализуемого с максимальной энергоэффективностью и минимумом потерь. То есть желаемый результат заключается в снижении затрат на управление и всестороннее обеспечение, а также улучшение следующих характеристик:

- устойчивости электроснабжения за счет нормирования;
- гибкости процессов управления электропотребления;
- энергоэффективности технологических процессов [2].

Согласно ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий», цифровой двойник – это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием и/или его составными частями.

Доказано, что такие организационно-технические системы, как рассматриваемый РЭК, генерируют негауссовы выборки [3]. Следовательно, процесс построения цифрового двойника должен быть согласован с перспективой реализации в нем процедур рангового анализа. Неотъемлемым элементом рангового анализа является принятое разделение данных на слои: первичные (исходные данные, подвергшиеся предварительной обработке) и вторичные.

Для реализации наиболее точного отображения реальной системы в цифровом двойнике необходимо объединить всю доступную информацию, в том числе имеющиеся слои данных, в единую структуру (рис. 2).

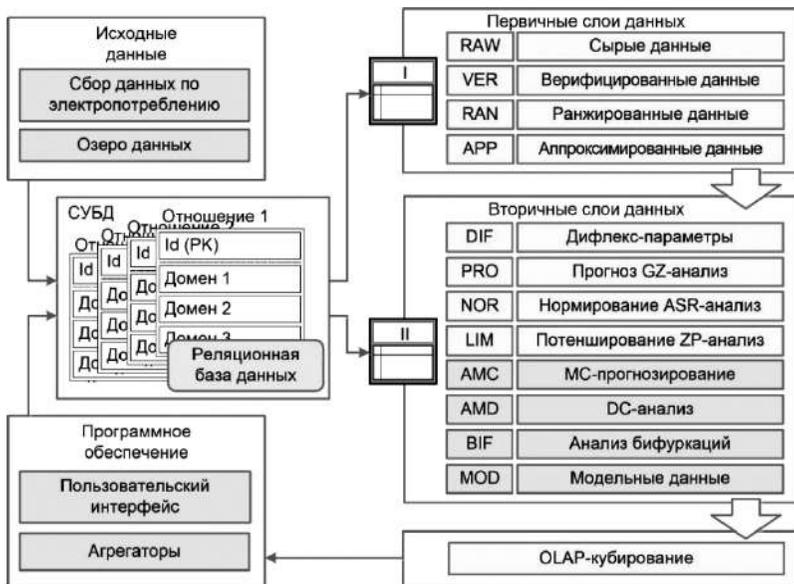


Рис. 2. Структура цифрового двойника РЭЖ

В комплекс исходных данных, кроме показаний счетчиков, взаимосвязей между отдельными компонентами и условий окружающей среды, могут входить рабочие настройки, информация о проверках и техническом обслуживании. При этом данные должны непрерывно передаваться в цифровой двойник, чтобы отображать актуальное состояние системы.

В ходе анализа предметной области определены следующие сущности, подлежащие отображению в реляционной БД:

$$T = \{O, Pr, OP, L, S, LS, T, PA, I\},$$

где T – совокупность отношений, представленных таблицами БД; O – объект; Pr – параметры; OP – параметры объектов; L – слои данных; S – наборы слоев данных; LS – состав наборов

слоев данных; T – временные периоды; PA– процедуры рангового анализа; I – данные в различных слоях, в т.ч. по электропотреблению.

На рисунке 3 представлена информационно-логическая модель БД, учитывающая имеющиеся значимые атрибуты объектов и их взаимосвязи. Особенностью предлагаемой модели является то, что на каждом временном интервале объект может характеризоваться сразу несколькими слоями данных. Данная особенность позволяет наиболее полно и всесторонне исследовать поведение и состояние объектов в любой момент времени и, что весьма важно, в динамике, а также производить на основании этих данных OLAP-кубирование.



Рис. 3. Фрагмент информационно-логической модели реляционной БД по электропотреблению

Построенная по указанной схеме БД соответствует требованиям первой, второй и третьей нормальных форм [2]. Каждый кортеж ее центральной таблицы содержит всего один показатель (число), идентифицируемый составным первичным ключом, включающим идентификаторы слоя данных, объекта и временного периода, каждый из которых также является внешним ключом, ссы-

лающимися на одну из трех соответствующих таблиц. Для дальнейшей работы с данными их необходимо привести к более привычному виду двумерной матрицы, отображающей один слой, где строки будут обозначать объекты, а столбцы – периоды.

Для этого строится производное отношение «TmpL», формирующее таблицу, в которой объекты расположены в строках, а временные периоды – в столбцах:

$$\text{TmpL} = \pi_{\text{period_id}} \left(\sigma_{\text{layer_name}=\text{x}} \left(I_{\text{layer_id}} \triangleright \triangleleft I_{\text{idL}} \right) \right), \quad (2)$$

где id – идентификатор слоя; π – операция проекции; σ – операция селекции; x – целевой слой для формирования матрицы.

Следующим шагом является применение оператора «pivot» с использованием сформированного набора столбцов TmpL для получения результирующей двумерной матрицы, содержащей данные о всех объектах по временным интервалам применительно к целевому слою:

$$\text{ML} = \rho_{\text{pvt}} \left(\pi_{\text{TmpL}}(\text{period}) F_{\text{sum}} \text{value}(\text{Indications}) \right), \quad (3)$$

где F_{sum} – агрегатная функция; ρ – операция переименования столбца.

Аналогичным образом, путем реализации двух этапов обработки базы данных операциями реляционной алгебры, формируется цифровой профиль объекта – двумерная матрица, содержащая данные о целевом объекте по временным периодам и всем имеющимся слоям:

$$\text{TmpO} = \pi_{\text{layer_id}} \left(\sigma_{\text{object_name}=\text{x}} \left(I_{\text{object_id}} \triangleright \triangleleft I_{\text{idO}} \right) \right), \quad (4)$$

$$\text{MO} = \rho_{\text{pvt}} \left(\pi_{\text{TmpO}}(\text{layer}) F_{\text{sum}} \text{value}(\text{Indications}) \right). \quad (5)$$

Третьим вариантом применения указанных операций является формирование среза базы данных – двумерной матрицы, содержащей данные о целевом временном периоде по всем объектам и актуальным для них слоям:

$$\text{TmpP} = \pi_{\text{object_id}} \left(\sigma_{\text{period_name}=\text{x}} \left(I_{\text{period_id}} \triangleright \triangleleft I_{\text{idP}} \right) \right), \quad (6)$$

$$\text{MP} = \rho_{\text{pvt}} \left(\pi_{\text{TmpP}}(\text{object}) F_{\text{sum}} \text{value}(\text{Indications}) \right). \quad (7)$$

Кроме того, одно из основных преимуществ применения цифрового двойника, позволяющее с наибольшей эффективностью использовать разработанные ранее методики и подходы – постоянное поддержание данных в актуальном состоянии и возможность быстрого автоматического пересчета всех показателей при каждом поступлении новых данных или их обновлении, причем с учетом уже имеющихся данных (рис. 4).

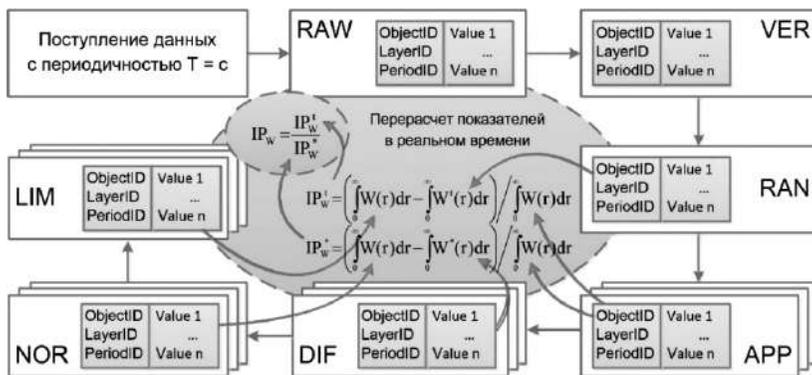


Рис. 4. Схема агрегирования данных в реальном времени из различных слоев

Построенная реляционная база данных и операции агрегирования данных по объектам, временным интервалам, слоям данных и наборам слоев является основой для построения цифрового двойника РЭК. В некотором смысле, цифровой двойник – это виртуальный аналог объекта или процесса, позволяющий охарактеризовать поведение в моделируемых условиях [5].

Во всех процедурах рангового анализа, как стандартных, так и тонких, используется числовая функция, которая устанавливает соответствие между предварительно упорядоченными значениями электропотребления и соответствующими дискретными рангами. Ранговое параметрическое распределение по электропотреблению представляет собой аналитическую числовую функцию, которая

определена на множестве ранговой топологической меры. Это распределение получено путем аппроксимации ранжированного множества значений электропотребления объектов РЭК, как правило, приемников или потребителей [3]:

$$\left[\{W_k\}_{k=1}^n \xrightarrow{f:W \rightarrow R} \{R_k\}_{k=1}^n \right] \xrightarrow{\text{Аппрокс}} W = f(x), \quad (8)$$

где $\{W_k\}_{k=1}^n$ – множество значений электропотребления; $\{R_k\}_{k=1}^n$ – множество топологических рангов; $W(x)$ – функция рангового параметрического распределения по электропотреблению; x – ранговая топологическая мера.

Процедуре ранжирования предшествуют загрузка, очистка, форматирование и верификация данных:

$$\left\{ \begin{array}{l} \{W_k^{\text{raw}}\}_{k=1}^n \xrightarrow{\text{Verific}} \{W_k^{\text{ver}}\}_{k=1}^n; \\ \{W_k^{\text{ver}}\}_{k=1}^n \xrightarrow{\text{Rangin}} \{W_k^{\text{ran}}\}_{k=1}^n; \\ \{W_k^{\text{ran}}\}_{k=1}^n \xrightarrow{\text{Аппрокс}} \{W_k^{\text{app}}\}_{k=1}^n; \end{array} \right. \quad (9)$$

где $\{W_k^{\text{raw}}\}_{k=1}^n$ – множество «сырых» значений электропотребления; $\{W_k^{\text{ver}}\}_{k=1}^n$ – множество верифицированных значений; $\{W_k^{\text{ran}}\}_{k=1}^n$ – множество ранжированных значений; $\{W_k^{\text{app}}\}_{k=1}^n$ – множество аппроксимированных значений.

Первичные слои (raw – сырые данные, ver – верифицированные, ran – ранжированные, app – аппроксимированные) являются основой цифровой профилизации. Вторичные слои (dif, pro, nor, lim и другие) содержат данные об аномалиях, прогнозах, нормах и лимитах.

Из всех имеющихся в базе данных слоев формируется OLAP-куб – многомерный хранимый массив данных. В каждом конкретном случае из куба могут быть задействованы любые необходимые слои, профили, срезы и их комбинации (рис. 5).

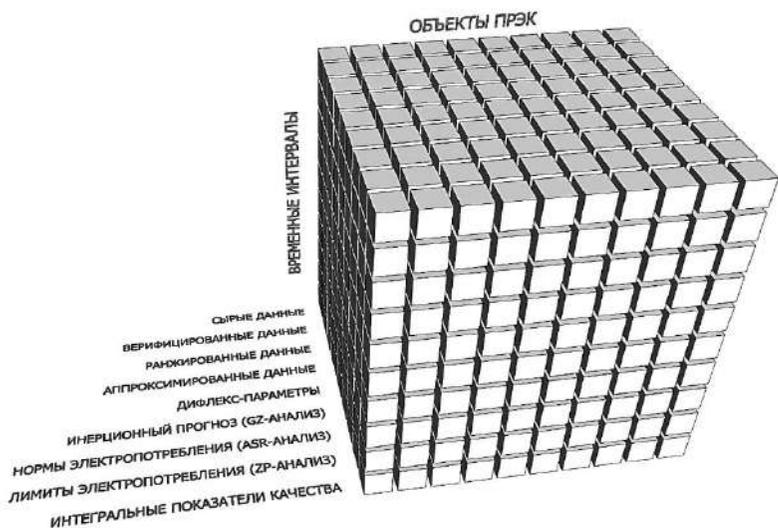


Рис. 5. OLAP-куб, сформированный на основе данных об электропотреблении

Использование полученного таким образом OLAP-куба и применение к различным слоям данных схемы агрегирования в реальном времени (см. рис. 5) позволяет реализовать любые процедуры рангового анализа, что показано на примере интеллектуального нормирования электропотребления.

В результате расчетов найдены нормирующие коэффициенты для каждого объекта на всех временных периодах в рамках установленного срока приведения системы в целевое состояние (рис. 6). Данные нормы пересчитываются при обновлении данных, и при очередной итерации нормирующие коэффициенты могут изменяться.

Оптимальное управляющее воздействие, назначенное объекту k на очередном временном интервале, может рассматриваться как норма, учитывающая статистические особенности электропотребления объекта на обозримом временном этапе. В соответствии с коэффициентами рассчитаны модельные значения, характеризующие состояние системы на каждом временном интервале в рамках указанного срока (табл. 1).

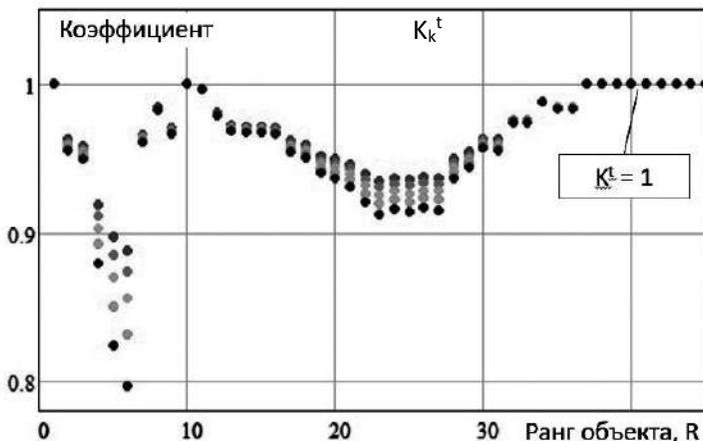


Рис. 6. Нормирующие коэффициенты управляющего воздействия K_k^t

Таблица 1

**Модельные значения электропотребления
объектов системы на моделируемом периоде, кВт·ч/месяц**

	Период 1	Период 2	Период 3	Период 4	Период 5
Объект 1	$2.038 \cdot 10^6$	$2.037 \cdot 10^6$	$2.036 \cdot 10^6$	$2.036 \cdot 10^6$	$2.036 \cdot 10^6$
Объект 2	$1.373 \cdot 10^6$	$1.320 \cdot 10^6$	$1.266 \cdot 10^6$	$1.213 \cdot 10^6$	$1.159 \cdot 10^6$
Объект 3	$9.362 \cdot 10^5$	$8.954 \cdot 10^5$	$8.546 \cdot 10^5$	$8.137 \cdot 10^5$	$7.729 \cdot 10^5$
Объект 4	$8.967 \cdot 10^5$	$8.175 \cdot 10^5$	$7.383 \cdot 10^5$	$6.590 \cdot 10^5$	$5.798 \cdot 10^5$
Объект 5	$8.598 \cdot 10^5$	$7.608 \cdot 10^5$	$6.619 \cdot 10^5$	$5.629 \cdot 10^5$	$4.639 \cdot 10^5$
Объект 6	$7.809 \cdot 10^5$	$6.824 \cdot 10^5$	$5.838 \cdot 10^5$	$4.852 \cdot 10^5$	$3.867 \cdot 10^5$
Объект 7	$3.859 \cdot 10^5$	$3.723 \cdot 10^5$	$3.587 \cdot 10^5$	$3.451 \cdot 10^5$	$3.315 \cdot 10^5$

Таким образом, применение рассмотренных подходов создает основу для повышения качества проводимых энергосберегающих мероприятий и позволит управлять энергопотреблением с учётом не только индивидуальных особенностей объектов, но и их взаимосвязанности в пределах РЭЖ, а также динамики системы в целом.

Научная новизна материала заключается в дополнении существующей методологии управления электропотреблением путем применения операций реляционной алгебры для работы с базами

данных, содержащих исходные сведения о состоянии и динамике системы, поступающие от входящих в ее состав объектов, а также результаты применения к ним различных процедур рангового анализа.

Практическое значение заключается в том, что в ситуации постоянного увеличения тарифов на электроэнергию, а также неуклонного повышения технической оснащенности существенно увеличиваются соответствующие расходы бюджета.

Немаловажными в процессе управления электропотреблением организационной системы являются оптимизация и автоматизация процессов работы с данными. Эффективным инструментом для решения этих задач является цифровой двойник системы.

Литература

1. **Гнатюк В.И., Кивчун О.Р., Морозов Д.Г.** Реализация процедуры режимного нормирования для подсистем регионального электроэнергетического комплекса // Фёдоровские чтения – 2021: Тр. 51-й Межд. научно-практ. конф. 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. <http://gnatukvi.ru/index.files/giperkache.pdf>.

5. **Гнатюк В.И.** Цифровой двойник техноценоза по электропотреблению. Калининград, 2020. <http://gnatukvi.ru/index.files/cifrodvoin.pdf>.

Учебное издание

ФЁДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ 2023

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

Москва. 15 – 17 ноября 2023 г.

Компьютерная верстка А.В. Худяковой

Подписано в печать	20.12.23.	Печать ризография	Формат 60x90 1/16
Печ. л. 29,75	Тираж 25 экз.	Изд. № 23н-143	Заказ №

Оригинал-макет подготовлен в РИО НИУ «МЭИ».
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.
Отпечатано в типографии НИУ «МЭИ».
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13.