

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 4

Нижний Новгород 2025

УДК 621.3

ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2025. № 4 (31). – 120 с.

Выходит 1 раз в квартал

Журнал включен ВАК при Минобрнауки России в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по специальностям 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки), 2.4.3. Электроэнергетика (технические науки)

Главный редактор

Алексей Борисович Лоскутов, д-р техн. наук, профессор

зам. гл. редактора

Андрей Борисович Дарьенков д-р техн. наук, доцент

Елена Николаевна Соснина д-р техн. наук, профессор

отв. секретарь

Андрей Владимирович Шалухо канд. техн. наук

отв. редактор

Валерия Игоревна Казакова канд. филос. наук, доцент

выпускающий редактор

Иван Алексеевич Липужин канд. техн. наук

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Даурен Садыкович Ахметбаев

д-р техн. наук (Казахстан)

Геннадий Яковлевич Вагин

д-р техн. наук, профессор

Леонид Абрамович Герман

д-р техн. наук, профессор

Валерий Геннадьевич Гольдштейн

д-р техн. наук, профессор

Игорь Васильевич Гуляев

д-р техн. наук, профессор

Павел Владимирович Илюшин

д-р техн. наук

Александр Леонидович Куликов

д-р техн. наук, профессор

Виктор Николаевич Мещеряков

д-р техн. наук, профессор

Александр Сергеевич Плехов

канд. техн. наук, доцент

Александр Юрьевич Смирнов

д-р техн. наук, доцент

Олег Станиславович Хватов

д-р техн. наук, профессор

Александр Иванович Чивенков

д-р техн. наук, профессор

Учредитель и издатель:

федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

(603155, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

Электронная версия журнала:
<https://ie.mntu.ru>

СМИ зарегистрировано Роскомнадзором
ПИ № ФС77-81688 от 06 августа 2021 г.

ISSN 2658-6754

УДК 621.3

© Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	4
Аккад А.Ф., Соснина Е.Н. Применение нечеткой логики 2-го типа для управления <i>D-STATCOM</i> в РЭС с ВИЭ	4
Попов С.В. Особенности реализации АВР с автоматическими выключателями, оснащенными электроприводами	23
Белошистов А.И., Серов А.Л., Белошистов А.А. Микропроцессорная максимальная токовая защита для рудничного оборудования напряжением 3,3 кВ	32
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА	55
Волошин Е.А., Лучугин В.Ф., Волошин А.А. Методы планирования режимов работы микроэнергосистем	55
Иванов С.В. Практические вопросы реализации частотонезависимых измерительных органов релейной защиты с одной подводимой величиной	68
Аверьянов С.С., Трофимов А.С. Сравнительный анализ ансамблевых алгоритмов машинного обучения для обнаружения режима запуска электродвигателя	77
Крюков А.В., Суслов К.В., Овечкин И.С. Комплексное моделирование систем электроснабжения нетяговых потребителей при неполнофазных режимах работы питающей электрической сети	91
Герман Л.А., Саликов И.А. Расчет потерь мощности в тяговой сети с тяжеловесными поездами и статическим генератором реактивной мощности на посту секционирования	106

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.313

EDN ZVQRSJ

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ 2-ГО ТИПА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ *D-STATCOM* В РЭС С ВИЭ

А.Ф. Аккад

ORCID: 0009-0001-4758-3739 e-mail: feras1992@yandex.ru

Университет Алеппо

Алеппо, Сирия

Е.Н. Соснина

ORCID: 0000-0001-6207-9103 e-mail: sosnyna@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

Интеграция распределенной генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в распределительные электрические сети (РЭС) зачастую негативно влияет на общую эффективность энергосистемы. Стохастический характер ВИЭ вызывает колебания мощности и напряжения, а подключение ВИЭ к РЭС через полупроводниковые устройства (инверторы) ведет к появлению гармонических составляющих тока. Для повышения качества электроэнергии, поставляемой потребителям, в РЭС широко применяются *D-STATCOM*. Однако их применение в РЭС с ВИЭ представляет собой сложную задачу: динамический характер изменения параметров режима РЭС делает неэффективными традиционные алгоритмы управления, основанные на ПИ/ПИД-регуляторах. Статья посвящена повышению эффективности *D-STATCOM* за счет увеличения скорости реагирования на динамические изменения параметров РЭС с ВИЭ с помощью искусственного интеллекта (нечеткой логики). Предложен подход к управлению *D-STATCOM* на базе нечеткой логики 2-го типа, отличающийся от нечеткой логики 1-го типа большей гибкостью и способностью лучше справляться с неопределенностью. Смоделированы четыре сценария реакции РЭС с фотоэлектрической и ветроэнергетической энергоустановками на внешние возмущения: без регулирования и с управлением параметрами сети *D-STATCOM* на основе ПИ-регулятора, нечеткой логики 1-го типа, нечеткой логики 2-го типа. Результаты сравнения сценариев показали преимущество алгоритма на основе нечеткой логики 2-го типа, позволяющего улучшить регулирование напряжения в РЭС при внешних помехах.

Ключевые слова: ВИЭ, *D-STATCOM*, искусственный интеллект, качество электроэнергии, нечеткая логика, распределенная генерация.

Для цитирования: Аккад А.Ф., Соснина Е.Н. Применение нечеткой логики 2-го типа для управления *D-STATCOM* в РЭС с ВИЭ // Интеллектуальная электротехника. 2025. № 4. С. 4-22. EDN ZVQRSJ

APPLICATION OF TYPE 2 FUZZY LOGIC FOR D-STATCOM CONTROL IN DISTRIBUTED ENERGY NETWORKS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

A.F. Akkad

ORCID: 0009-0001-4758-3739 e-mail: feras1992@yandex.ru

University of Aleppo

Aleppo, Syria

E.N. Sosnina

ORCID: 0000-0001-6207-9103 e-mail: sosnyna@yandex.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The integration of distributed generation based on renewable energy sources (RES) into distribution electrical networks (DEN) often negatively affects the overall efficiency of the energy system. The stochastic nature of RES causes fluctuations in power and voltage, and connecting RES to DEN through semiconductor devices (inverters) leads to the appearance of harmonic current components. *D-STATCOM* is widely used in DEN to improve the power quality for consumers. However, their use in DEN with RES is a difficult task: the dynamic nature of the change in the mode DEN parameters makes it ineffective to use traditional control algorithms based on PI/PID controllers. The article is devoted to improving the efficiency of *D-STATCOM* by increasing the response rate to dynamic changes in the parameters of DEN with RES using artificial intelligence. An approach to managing *D-STATCOM* based on type 2 fuzzy logic is proposed, which differs from type 1 fuzzy logic in greater flexibility and the ability to better cope with uncertainty. Four scenarios of the reaction of PV and wind power plants to external disturbances are modeled: without regulation and with control of the *D-STATCOM* network parameters based on a PI controller, type 1 fuzzy logic, and type 2 fuzzy logic. The results of the scenario comparison showed the advantage of an algorithm based on type 2 fuzzy logic, which makes it possible to improve voltage regulation in the DEN with external interference.

Keywords: renewable energy sources, *D-STATCOM*, artificial intelligence, power quality, fuzzy logic, distributed generation.

For citation: A.F. Akkad and E.N. Sosnina, “Application of type 2 fuzzy logic for D-STATCOM control in distributed energy networks with renewable energy sources”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 4-22, 2025. EDN ZVQRSJ

I. Введение

Известно, что возобновляемые источники энергии (ВИЭ) имеют стохастический характер, и подключение к распределительной электрической сети (РЭС) распределенной генерации (РГ) на ВИЭ вызывает в РЭС колебания мощности, а следовательно, тока и напряжения. Инверторы, с помощью которых энергоустановки (ЭУ) на ВИЭ интегрируются в системы электроснабжения (СЭС) потребителей, являются источниками гармонических составляющих [1-3], генерируемых при широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Проблему высших гармоник и колебаний напряжения позволяет решить распределенный статический синхронный компенсатор (*Distribution Static Compensator – D-STATCOM*) – регулятор напряжения на полупроводниковых элементах, относящийся к устройствам *FACTS* второго поколения и используемый в РЭС среднего или низкого напряжения вблизи потребителя [4]. Эффективность применения *D-STATCOM* в значительной степени определяется алгоритмом управления [5].

Для управления *D-STATCOM* широко используются ПИ/ПИД регуляторы, благодаря простоте реализации, ясности функционирования и низкой стоимости. Однако они медленно работают в сложных нелинейных системах с ЭУ на ВИЭ [6, 7]. Известно [8, 9], что традиционные ПИ-регуляторы характеризуются медленным откликом в нелинейных системах (при внезапных изменениях параметров сети). Для повышения быстродействия *D-STATCOM* необходимы мощные контроллеры, совместимые с нелинейными динамическими изменениями.

Повысить эффективность *D-STATCOM* в РЭС с ВИЭ можно с помощью регуляторов на основе искусственного интеллекта (нечеткой логики), не требующих решения сложных дифференциальных уравнений n -порядка, описывающих нелинейные системы. Регулятор на нечеткой логике, в отличие от традиционного ПИ-регулятора, не требует математической модели, а, следовательно, имеет лучшую реакцию и быстрое время отклика при работе в системах с нелинейными внешними воздействиями [10, 11]. Известные системы нечеткой логики для управления *D-STATCOM*, как правило, основаны на концепции нечетких множеств 1-го типа (*Fuzzy-1*) [12], что часто не обеспечивает достоверные решения из-за недостаточно обоснованного выбора входных данных моделирования и не позволяет адекватно описать имеющуюся неопределенность. Системы нечеткой логики 2-го типа (*Fuzzy-2*) позволяют работать с большей неопределенностью [13, 14].

На рис. 1 показана структурная схема алгоритма управления *D-STATCOM* с помощью метода мгновенной мощности (p - q теория), использующего преобразование Кларк для перехода от однофазной системы токов и напряжений к двухфазной системе (α , β) [15].

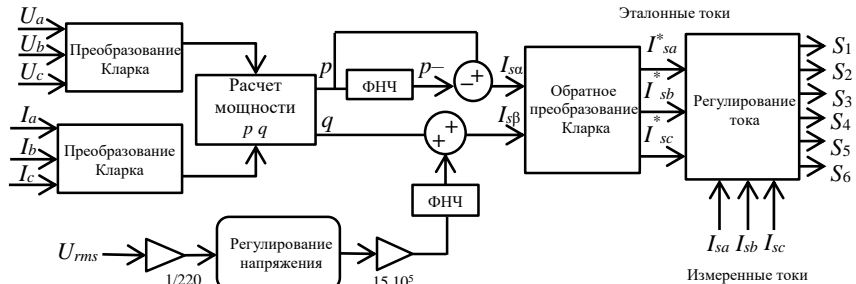


Рис. 1. Структурная схема алгоритма управления *D-STATCOM*:
ФНЧ – фильтр низких частот

Fig. 1. Structural diagram of the *D-STATCOM* control algorithm:
ФНЧ – Low Pass Filter

Обратное преобразование Кларк используется для получения трехфазных эталонных (опорных) токов, которые с помощью контроллера сравниваются с измеренными значениями для получения импульсов управления транзисторами *D-STATCOM*.

Цель исследования – разработка алгоритма управления *D-STATCOM* на основе нечеткой логики 2-го типа (*Fuzzy-2*) и анализ его эффективности при подключении *D-STATCOM* к РЭС с источниками распределенной генерации (фотоэлектрической (ФЭУ) и ветроэнергетической (ВЭУ) установок). Исследование направлено на повышение качества электроэнергии, поставляемой потребителю, за счет снижения колебаний напряжения и суммарного коэффициента гармонических составляющих тока $THDi$ %.

II. Применение нечеткой логики

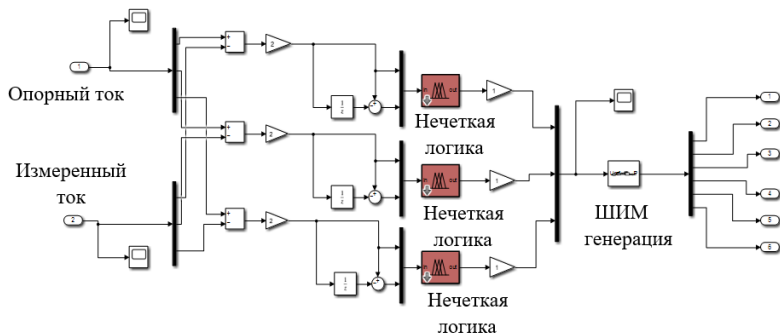
Алгоритм управления *D-STATCOM* моделировался на основе нечеткой логики с использованием регуляторов напряжения (на основе метода Мамдани) и тока (на основе метода Сугено). На рис. 2 а показана модель алгоритма управления напряжением *D-STATCOM* с регулятором на основе нечеткой логики (метод Мамдани). Напряжение измеряется, преобразуется и поступает на вход регулятора, выход которого представляет собой реактивную мощность (РМ). Фильтр низких частот обеспечивает получение необходимого значения РМ.

The diagram illustrates the architecture of a fuzzy logic expert system for fault diagnosis. It is divided into several functional blocks:

- Измeрeннe нaпpяжeннaя (Voltage Measurement):** Input 1 (V_{abc}) is processed by a Clarke transform block.
- Измeрeннe тoкa (Current Measurement):** Input 2 (I_{abc}) is processed by a Clarke transform block.
- Рaсчeт p q (pq Calculation):** Receives transformed voltage and current signals to calculate the p and q components.
- ФНЧ (Bandpass Filter):** Filters the p and q signals.
- Рaсчeт тoкoв $\alpha \beta$ (Calculation of $\alpha \beta$ currents):** Uses the filtered signals to calculate the α and β current components.
- Измeрeннe нaпpяжeннaя (Measured Voltages):** A separate path for VL1, VL2, and VL3 signals.
- Экспeртнaя нeчeткaя лoгикa (Fuzzy Logic Expert System):** Processes the measured voltage signals through RMS, gain, and delay blocks, followed by a fuzzy inference block.
- Рaсчeт этaлoннoв тoкoв (Calculation of Standard Currents):** Receives signals from the fuzzy logic system to calculate standard current components (I_{c1}, I_{c2}, I_{c3}).

Регулирование напряжения (расчет q)

(a)



(6)

Рис. 2. Модели управления *D-STATCOM* с контроллерами на основе алгоритмов:

a – Мамдани (для регулирования напряжения);

б – Сугено (для регулирования тока)

Fig. 2. D-STATCOM controls with controllers based on algorithms:
a – Mamdani (for voltage regulation); δ – Sugeno (for current regulation)

Регулятор напряжения на основе нечеткой логики (Мамдани) состоит из входа («напряжение») и выхода («реактивная мощность»). В соответствии с лингвистическими переменными, для регулирования напряжения необходимо разработать пять нечетких логических правил. Для обозначения лингвистической переменной «напряжение» примем пять терм: БП – большое пониженное; НП – небольшое пониженное; Н – нормальное; НВ – небольшое повышенное; БВ – большое повышенное. Для обозначения лингвистической переменной «реактивная мощность» примем также пять терм: БГ – большая генерация РМ; НГ – небольшая генерация РМ; Н – РМ не генерируется и не поглощается; НПО – небольшое потребление РМ; БПО – большое потребление РМ.

Нечеткие подмножества 1-го типа лингвистической переменной «напряжение» E_{1i} :

$E_{11} = \text{БП}$	(большое падение напряжения)	$\Delta(v, \mu_{11}(v));$
$E_{12} = \text{НП}$	(небольшое падение напряжения)	$\Delta(v, \mu_{12}(v));$
$E_{13} = \text{Н}$	(нормальное напряжение)	$\Delta(v, \mu_{13}(v));$
$E_{14} = \text{НВ}$	(небольшое высокое напряжение)	$\Delta(v, \mu_{14}(v));$
$E_{15} = \text{БВ}$	(большое высокое напряжение)	$\Delta(v, \mu_{15}(v));$

где $E_{11}, E_{12}, \dots, E_{15}$ – подмножества; Δ – вид функции принадлежности; v – переменная напряжения; $\mu_{1i}(v)$ – функция принадлежности, определяющая степень принадлежности значения напряжения v к лингвистическому терму i .

Функция принадлежности принимает значения в интервале от 0 до 1, указывая на степень соответствия данного значения определенному лингвистическому описанию.

Нечеткие подмножества 1-го типа лингвистической переменной «реактивная мощность» E_{2j} :

$E_{21} = \text{БГ}$	(большая генерация РМ)	$\Delta(q, \mu_{21}(q));$
$E_{22} = \text{НГ}$	(небольшая генерация РМ)	$\Delta(q, \mu_{22}(q));$
$E_{23} = \text{Н}$	(РМ не генерируется и не поглощается)	$\Delta(q, \mu_{23}(q));$
$E_{24} = \text{НПО}$	(небольшое поглощение РМ)	$\Delta(q, \mu_{24}(q));$
$E_{25} = \text{БПО}$	(большое поглощение РМ)	$\Delta(q, \mu_{25}(q));$

где q – реактивная мощность; $\mu_{2j}(q)$ – функция принадлежности, отображающая степень принадлежности значения РМ q к каждому из лингвистических термов.

На рис. 3 показаны нечеткие подмножества 1-го типа лингвистических переменных «напряжение» (вход) и «реактивная мощность» (выход).

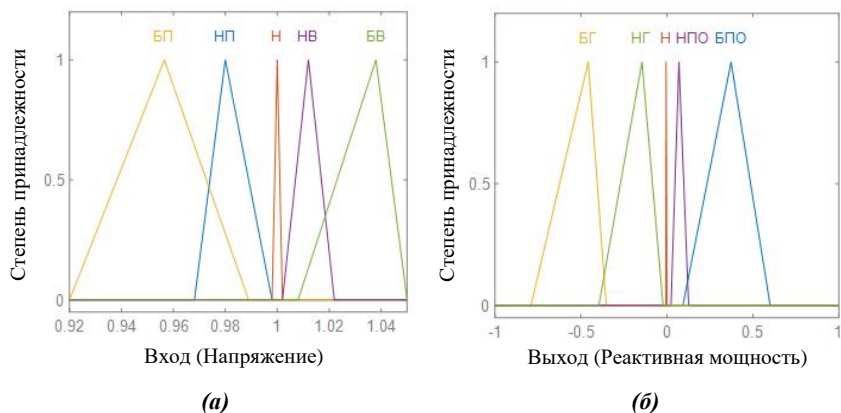


Рис 3. Функция принадлежности (тип 1) для регулирования напряжения:
a – вход (напряжение); б – выход (реактивная мощность)

Fig. 3. Membership function (type 1) for voltage regulation:
a – input (voltage); б – output (reactive power)

Регулятор тока на основе нечеткой логики (Сугено) состоит из двух входов («ошибка» и «изменение ошибки») и одного выхода («постоянные значения»). В соответствии с лингвистическими переменными, для регулирования тока необходимо составить 49 нечетких логических правил.

Так, для лингвистических переменных «Ошибка», «Изменение Ошибки» и «постоянные значения» семь терм: БО – большое отрицательное; СО – среднее отрицательное; НО – небольшое отрицательное; Н – нулевое; НП – небольшое положительное; СП – среднее положительное; БП – большое положительное.

Нечеткие подмножества 1-го типа лингвистической переменной «Ошибка» E_{1i} :

$E_{11} = \text{БО}$	(большая отрицательная)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{11}(\varepsilon(I)))$
$E_{12} = \text{СО}$	(средняя отрицательная)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{12}(\varepsilon(I)))$
$E_{13} = \text{НО}$	(небольшая отрицательная)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{13}(\varepsilon(I)))$
$E_{14} = \text{Н}$	(нулевая)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{14}(\varepsilon(I)))$
$E_{15} = \text{НП}$	(небольшая положительная)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{15}(\varepsilon(I)))$
$E_{16} = \text{СП}$	(средняя положительная)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{16}(\varepsilon(I)))$
$E_{17} = \text{БП}$	(большая положительная)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{17}(\varepsilon(I)))$

где $\Omega(\varepsilon, \mu_{1i}(\varepsilon(I)))$ – функция принадлежности; ε – ошибка тока; $\mu_{1i}(\varepsilon(I))$ – функция принадлежности, определяющая степень принадлежности ошибки тока к соответствующему лингвистическому терму.

Нечеткие подмножества 1-го типа лингвистической переменной «Изменение ошибки» E_2 :

$E_{21} = \text{БО}$	(большое отрицательное)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{21}(\varepsilon(I)))$
$E_{22} = \text{СО}$	(среднее отрицательное)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{22}(\varepsilon(I)))$
$E_{23} = \text{НО}$	(небольшое отрицательное)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{23}(\varepsilon(I)))$
$E_{24} = \text{Н}$	(нулевое)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{24}(\varepsilon(I)))$
$E_{25} = \text{НП}$	(небольшое положительное)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{25}(\varepsilon(I)))$
$E_{26} = \text{СП}$	(среднее положительное)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{26}(\varepsilon(I)))$
$E_{27} = \text{БП}$	(большое положительное)	$\Omega(\varepsilon, \mu_{27}(\varepsilon(I)))$

где $\Delta\varepsilon$ – изменение ошибки тока I ; $\mu_{2j}(\Delta\varepsilon(I))$ – функция принадлежности, определяющая степень принадлежности изменения ошибки тока к соответствующему лингвистическому терму.

На рис. 4 показаны нечеткие подмножества лингвистических переменных «Ошибка» и «Изменение ошибки».

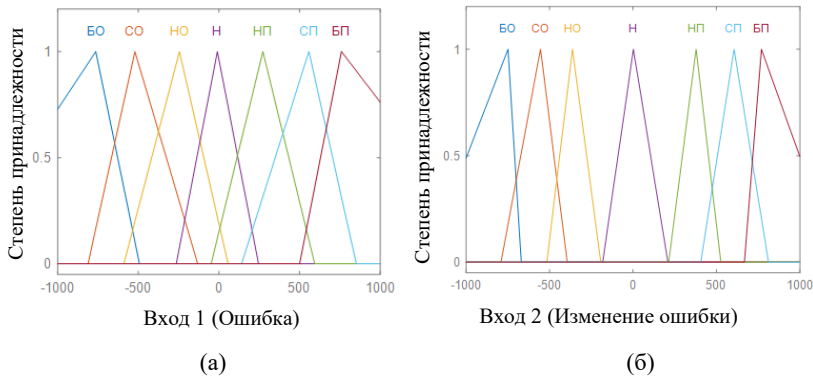


Рис 4. Функция принадлежности (тип 1) для регулирования тока:
а – вход (ошибка); б – выход (изменение ошибки)

Fig. 4. Membership function (type 1) for current regulation:
a – input (error); б – output (change in error)

Выходные постоянные значения параметров для регулятора тока:
 БО: 150; СО: 110; НО: 75; Н: 0; НП: 75; СП: 110; БП: 150.

Нечеткие правила регулирования напряжения при одной входной и одной выходной переменных:

- ЕСЛИ напряжение БП, ТО реактивная мощность БГ;
- ЕСЛИ напряжение НП, ТО реактивная мощность НГ;
- ЕСЛИ напряжение Н, ТО реактивная мощность Н;
- ЕСЛИ напряжение НВ, ТО реактивная мощность НПО;

– ЕСЛИ напряжение БВ, ТО реактивная мощность БПО.

В табл. 1 приведена база нечетких правил регулирования тока.

Таблица 1.

База правил (для тока)

Table 1.

Rule base (for current)

Вход 2	Вход 1						
	БО	СО	НО	Н	НП	СП	БП
БО	БО	БО	СО	СО	СО	НО	Н
СО	БО	БО	НО	СО	НО	Н	НП
НО	БО	СО	НО	НО	Н	НП	СП
Н	СО	СО	НО	Н	НП	СП	БП
НП	НО	НО	Н	НП	НП	СП	БП
СП	НО	Н	НП	СП	СП	БП	БП
БП	Н	НП	СП	БП	БП	БП	БП

Используется пять правил для достижения желаемой производительности системы для регулирования напряжения и 49 правил для регулирования тока. При дефазификации используется метод центра тяжести для регулятора Мамдани и метод взвешенного среднего для Сугено.

Нечеткая логика 2-го типа (*Fuzzy-2*) была введена Заде как развитие *Fuzzy-1* [16]. Функция принадлежности интервального типа 2 определяется верхней и нижней функциями принадлежности. Верхняя функция принадлежности (ВФП) эквивалентна традиционной функции принадлежности *Fuzzy-1*. Нижняя функция принадлежности (НФП) меньше или равна верхней функции принадлежности для всех возможных входных значений. Область между ВФП и НФП является следом неопределенности. *Fuzzy-2* имеет ту же конфигурацию, что и *Fuzzy-1*, но требует дополнительной операции, являющейся редукцией типа. Структурная схема *Fuzzy-2* регулирования включает пять основных этапов: Фаззификация, База правил, Система вывода, Редукция типа, Дефаззификация.

На этапе Фаззификации измеренные входные данные преобразуются в нечеткие лингвистические значения (нечеткое множество 2-го типа). Нечеткие множества 2-го типа обладают двумя функциями принадлежности для каждой лингвистической переменной, поэтому здесь вводится дополнительный уровень неопределенности по сравнению с нечеткими множествами 1-го типа, где фактическое значение связано с интервалом степеней сходства [17].

Две функции принадлежности связаны с каждой лингвистической переменной, которая имеет характерную заштрихованную область, извест-

ную как след неопределенности *FOU* (*Footprint of Uncertainty*). Он описывает неопределенность относительно степеней сходства [18]. Для регулирования напряжения входные и выходные переменные расширяются до треугольных функций принадлежности интервального 2-го типа.

Нечеткие подмножества 2-го типа лингвистической переменной «напряжение» E_{1i} :

E_{11} = БП	(большое пониженное)	$\Delta(v, (\mu_{-11}^-(v), \mu_{-11}(v)))$;
E_{12} = НП	(небольшое пониженное)	$\Delta(v, (\mu_{-12}^-(v), \mu_{-12}(v)))$;
E_{13} = Н	(нормальное)	$\Delta(v, (\mu_{-13}^-(v), \mu_{-13}(v)))$;
E_{14} = НВ	(небольшое повышенное)	$\Delta(v, (\mu_{-14}^-(v), \mu_{-14}(v)))$;
E_{15} = БВ	(большое повышенное)	$\Delta(v, (\mu_{-15}^-(v), \mu_{-15}(v)))$;

где $\mu_{-1i}^-(v), \mu_{-1i}(v)$ – верхняя и нижняя функции принадлежности, определяющие степени принадлежности значения напряжения v к лингвистическому терму i .

Нечеткие подмножества 2-го типа лингвистической переменной «ре-активная мощность»:

E_{21} = БГ	(большая генерация РМ)	$\Delta(q, (\mu_{-21}^-(q), \mu_{-21}(q)))$;
E_{22} = НГ	(небольшая генерация РМ)	$\Delta(q, (\mu_{-22}^-(q), \mu_{-22}(q)))$;
E_{23} = Н	(РМ не генерируется и не поглощается)	$\Delta(q, (\mu_{-23}^-(q), \mu_{-23}(q)))$;
E_{24} = НПО	(небольшое поглощение РМ)	$\Delta(q, (\mu_{-24}^-(q), \mu_{-24}(q)))$;
E_{25} = БПО	(большое поглощение РМ)	$\Delta(q, (\mu_{-25}^-(q), \mu_{-25}(q)))$;

где $\mu_{-2i}^-(q), \mu_{-2i}(q)$ – верхняя и нижняя функции принадлежности, определяющие степени принадлежности значения РМ q каждому из лингвистических термов.

На рис. 5 показаны нечеткие подмножества 2-го типа лингвистических переменных «напряжение» (вход) и «РМ» (выход). Нечеткие подмножества 2-го типа лингвистической переменной «Ошибка»:

E_{11} = БО	(большая отрицательная)	$\Omega(\varepsilon, (\mu_{-11}^-(\varepsilon(I)), \mu_{-11}(\varepsilon(I))))$;
E_{12} = СО	(средняя отрицательная)	$\Omega(\varepsilon, (\mu_{-12}^-(\varepsilon(I)), \mu_{-12}(\varepsilon(I))))$;
E_{13} = НО	(небольшая отрицательная)	$\Omega(\varepsilon, (\mu_{-13}^-(\varepsilon(I)), \mu_{-13}(\varepsilon(I))))$;
E_{14} = Н	(нулевая)	$\Omega(\varepsilon, (\mu_{-14}^-(\varepsilon(I)), \mu_{-14}(\varepsilon(I))))$;
E_{15} = НП	(небольшая положительная)	$\Omega(\varepsilon, (\mu_{-15}^-(\varepsilon(I)), \mu_{-15}(\varepsilon(I))))$;
E_{16} = СП	(средняя положительная)	$\Omega(\varepsilon, (\mu_{-16}^-(\varepsilon(I)), \mu_{-16}(\varepsilon(I))))$;
E_{17} = БП	(большая положительная)	$\Omega(\varepsilon, (\mu_{-16}^-(\varepsilon(I)), \mu_{-16}(\varepsilon(I))))$;

где $\mu_{-11}^-(\varepsilon(I)), \mu_{-11}(\varepsilon(I))$ – верхняя и нижняя функции принадлежности, определяющие степени принадлежности ошибки тока соответствующему лингвистическому терму.

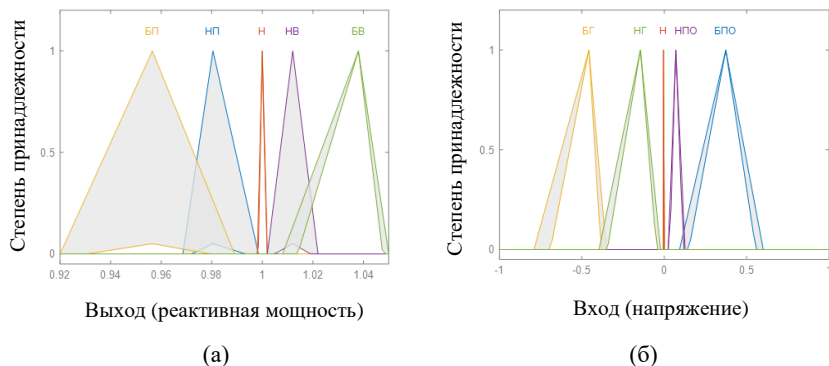


Рис. 5. Функция принадлежности (тип 2):

а – вход (напряжение); б – выход (реактивная мощность)

Fig. 5. Membership function (type 2):

a – input (voltage); б – output (reactive power)

Нечеткие подмножества 2-го типа лингвистической переменной «Изменение ошибки»:

$E_{21} = \text{БО}$	(большое отрицательное)	$\Omega(\Delta\varepsilon, (\mu_{-21}^-(\Delta\varepsilon(I)), \mu_{-21}(\Delta\varepsilon(I))))$;
$E_{22} = \text{СО}$	(среднее отрицательное)	$\Omega(\Delta\varepsilon, (\mu_{-22}^-(\Delta\varepsilon(I)), \mu_{-22}(\Delta\varepsilon(I))))$;
$E_{23} = \text{НО}$	(небольшое отрицательное)	$\Omega(\Delta\varepsilon, (\mu_{-23}^-(\Delta\varepsilon(I)), \mu_{-23}(\Delta\varepsilon(I))))$;
$E_{24} = \text{Н}$	(нулевое)	$\Omega(\Delta\varepsilon, (\mu_{-24}^-(\Delta\varepsilon(I)), \mu_{-24}(\Delta\varepsilon(I))))$;
$E_{25} = \text{НП}$	(небольшое положительное)	$\Omega(\Delta\varepsilon, (\mu_{-25}^-(\Delta\varepsilon(I)), \mu_{-25}(\Delta\varepsilon(I))))$;
$E_{26} = \text{СП}$	(среднее положительное)	$\Omega(\Delta\varepsilon, (\mu_{-26}^-(\Delta\varepsilon(I)), \mu_{-26}(\Delta\varepsilon(I))))$;
$E_{27} = \text{БП}$	(большое положительное)	$\Omega(\Delta\varepsilon, (\mu_{-27}^-(\Delta\varepsilon(I)), \mu_{-27}(\Delta\varepsilon(I))))$;

где $\mu_{-21}^-(\Delta\varepsilon(I))$, $\mu_{-21}(\Delta\varepsilon(I))$ – верхняя и нижняя функции принадлежности, определяющие степени принадлежности изменения ошибки тока соответствующему лингвистическому терму.

На рис. 6 показано нечеткие подмножества лингвистических переменных «Ошибка» (вход 1) и «Изменение ошибки» (вход 2).

База правил. Нечеткие правила *Fuzzy-2* остаются такими же, как и в *Fuzzy-1*, но antecedentes и последствия будут представлены нечеткими множествами интервального 2-го типа.

Общая форма правила в системе *Fuzzy-2* может быть представлена как

$$N_i: \text{Если } X_1 \text{ это } A_1 \text{ И } X_2 \text{ это } A_2, \text{ ТО } Y \text{ это } [B_i^-, B_i^+] \quad (1)$$

где N_i – i -число правила; X_1 , X_2 – входные переменные; A_1 , A_2 – нечеткие множества 2-го типа интервала (каждое определяется верхней и нижней функциями принадлежности); Y – выходная переменная; $[B_i^-, B_i^+]$ – интервал

выходного нечеткого множества, указывающий диапазон возможных значений принадлежности.

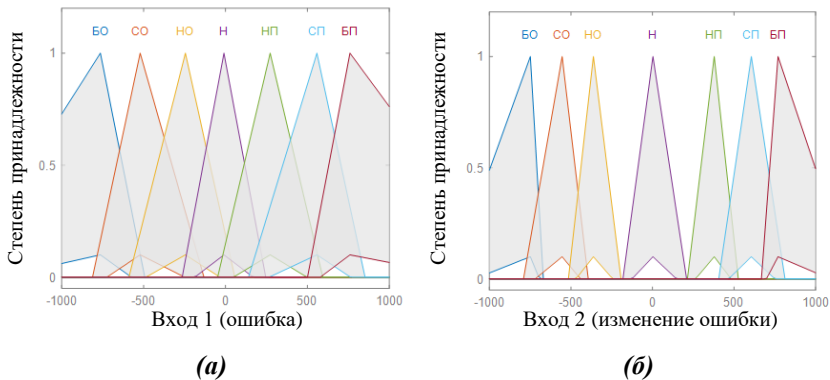


Рис. 6. Функция принадлежности (тип 2):
a – вход 1 (ошибка); б – вход 2 (изменение ошибки)

Fig. 6. Membership function (type 2):
a – input 1 (error); b – input 2 (change in error)

Компоненты нечетких правил интервального 2-го типа следующие.

Входные переменные: каждая входная переменная может принимать значения в определенном диапазоне и описывается ее нечетким множеством.

Нечеткие множества: определяются как нечеткие множества интервального 2-го типа, что означает, что для каждого входа существуют нижние и верхние функции принадлежности, которые описывают, как входное значение принадлежит нечеткому множеству.

Выходной интервал: выходные данные выражаются в виде интервала, обозначающего диапазон значений принадлежности, что позволяет устранить неопределенность.

Система вывода. На этом этапе процесс состоит из объединения нечетких правил и сопоставления четких входов с интервальными нечеткими выходными множествами 2-го типа. Результатом работы механизма вывода является нечеткое множество 2-го типа.

Редукция типа и дефаззификация. Этап редукции типа определяет основное отличие систем *Fuzzy-1* и *Fuzzy-2*. Чтобы найти окончательное четкое выходное значение, агрегированное нечеткое множество 2-го типа сначала сводится к интервальному нечеткому множеству 1-го типа, представляющему диапазон с нижним пределом y_l и верхним пределом y_r . Это

интервальное нечеткое множество типа 1 обычно называют центроидом нечеткого множества 2-го типа. Наиболее широко используется редукция типа «Центр множеств», разработанная Карником и Менделем [19].

На практике невозможно вычислить точные значения y_l и y_r . Для оценки этих значений используются итерационные методы редукции типов. Для данного агрегированного нечеткого множества 2-го типа приближительные значения y_l и y_r представляют собой центроиды соответствующих нечетких множеств 1-го типа. Математически эти центроиды находятся с помощью уравнений:

$$y_l = \frac{\sum_{i=1}^L x_i \mu^-(x_i) + \sum_{i=L+1}^N x_i \mu_-(x_i)}{\sum_{i=1}^L \mu^-(x_i) + \sum_{i=L+1}^N \mu_-(x_i)}; \quad (2)$$

$$y_r = \frac{\sum_{i=1}^R x_i \mu_-(x_i) + \sum_{i=R+1}^N x_i \mu^-(x_i)}{\sum_{i=1}^R \mu_-(x_i) + \sum_{i=R+1}^N \mu^-(x_i)}, \quad (3)$$

где N – количество выборок, взятых по всему диапазону выходной переменной; x_i – выборка i -го выходного значения; μ^- и μ_- – верхняя и нижняя функции принадлежности; L и R – точки переключения, оцениваемые различными методами редукции типа.

Для регуляторов Мамдани и Сугено окончательное дефазифицированное выходное значение y – это среднее значение двух центроидных значений из процесса редукции типа:

$$y = \frac{y_l + y_r}{2}. \quad (4)$$

III. Исследование и результаты

Для проведения исследований в среде программирования *MATLAB* была разработана модель низковольтной РЭС напряжением 0,4 кВ, 50 Гц, содержащей источники РГ на основе ВИЭ (ВЭУ и ФЭУ) и *D-STATCOM* (рис. 7). Моделировались изменение скорости ветра, вызывающего колебания напряжения в сети при работе ВЭУ, и влияние на сеть ФЭУ, искажающей синусоиду тока, характеризующееся суммарным коэффициентом гармонической составляющей по току THD_i , %.

На *MATLAB*-модели проведены исследования четырех сценариев реакции РЭС с РГ на ВИЭ на внешние возмущения, отличающихся подходами к регулированию параметров сети с помощью *D-STATCOM*: без регулирования; ПИ-регулирование; *Fuzzy-1*-регулирование; *Fuzzy-2*-регулирование. Внешними возмущениями были резкое изменение скорости ветра (5-4-5 м/с) и генерация в сеть высших гармоник при работе ФЭУ (рис. 8).

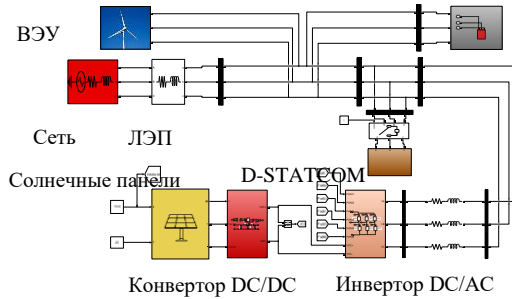


Рис. 7. MATLAB-Модель РЭС с РГ и D-STATCOM

Fig. 7. MATLAB-Model of the DEN with DG and D-STATCOM

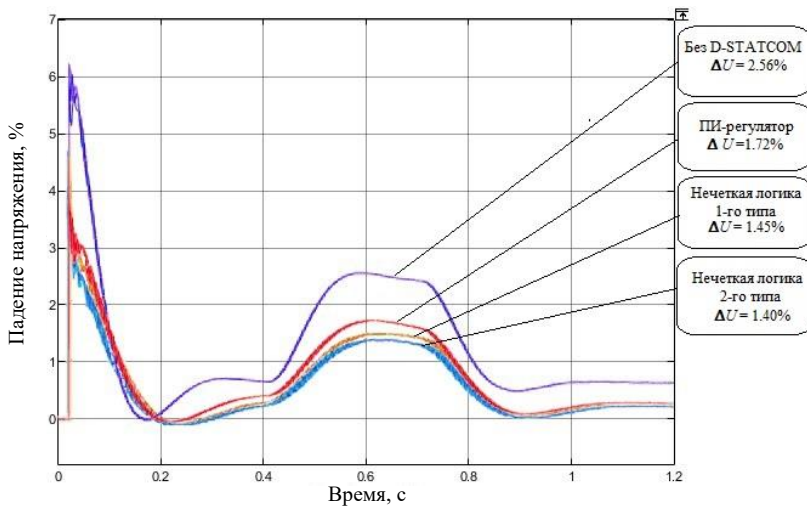


Рис. 8. Колебания напряжения:

(а) без D-STATCOM; (б) ПИ-регулирование;
(в) Fuzzy-1-регулирование; (г) Fuzzy-2-регулирование

Fig. 8. Voltage fluctuation:

(a) without D-STATCOM; (б) PI regulation; (в) Fuzzy-1; (г) Fuzzy-2

На рис. 8 показано, что при уменьшении скорости ветра до 4 м/с размах колебаний напряжения составил 2,56 %. Использование Fuzzy-2-регулирования позволило снизить размах колебаний напряжения с 2,56 до 1,40 %. Из рис. 9 видно, что при работе ФЭУ вносит искажения с $THDi = 9,30$ %. Благодаря Fuzzy-2-регулированию тока D-STATCOM $THDi$ снижен до 3,08 %, в то время как в случае применения Fuzzy-1 $THDi$ составил 3,27 %.

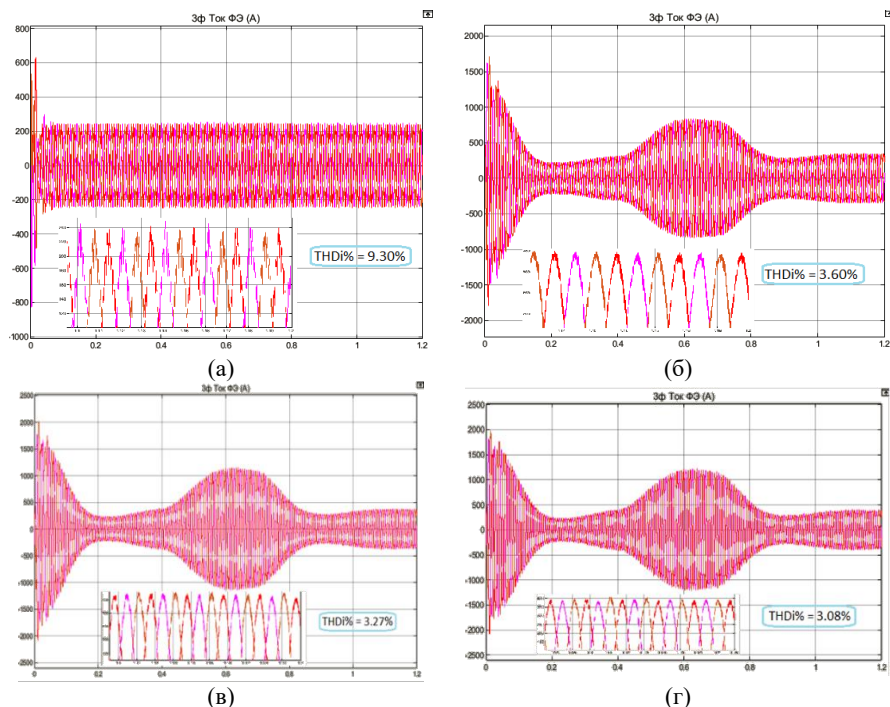


Рис. 9. $THDi$ % при работе ФЭУ:

(а) без D -STATCOM; (б) ПИ-регулирование;
(в) Fuzzy-1-регулирование; (г) Fuzzy-2-регулирование

Fig.9. $THDi$ % of the PV:

(a) without D -STATCOM; (б) PI regulation;
(в) Fuzzy-1 regulation; (г) Fuzzy-2 regulation

В табл. 2 приведены результаты сравнения показателей качества электроэнергии при моделировании нерегулируемой электрической сети, с D -STATCOM на основе ПИ-регулятора, с D -STATCOM на основе Fuzzy-1 и с D -STATCOM на основе Fuzzy-2.

Таблица 2.

Сравнение результатов для разных режимов

Table 2.

Comparison of results for different modes

Показатели качества электроэнергии	Без D -STATCOM	ПИ-регулятор	Нечеткая логика 1-го типа	Нечеткая логика 2-го типа
$THDi$, %	9,30	3,60	3,27	3,08
ΔU , %	2,56	1,72	1,45	1,40

IV. Выводы

Подключение источников РГ на ВИЭ (ФЭУ и ВЭУ) к РЭС приводит к увеличению суммарного коэффициента гармонических составляющих по току $THDi$ %, генерируемых полупроводниковыми элементами инвертора ФЭУ, и колебаний напряжения, вызываемых при работе ВЭУ изменением скорости ветра.

Проблему высших гармоник и колебаний напряжения при подключении ВИЭ к РЭС позволяет решить *D-STATCOM*. *D-STATCOM* на традиционных ПИ-регуляторах в РЭС с ВИЭ работает медленно, поэтому предложено использовать регулятор на основе ИИ (нечеткой логики). Разработан алгоритм управления *D-STATCOM* на основе *Fuzzy-1* (Мамдани для регулирования напряжения и Сугено для регулирования тока). Алгоритм *Fuzzy-1* был доработан до *Fuzzy-2*, где каждая лингвистическая переменная имеет две функции принадлежности (верхнюю и нижнюю).

Результаты исследования различных подходов к регулированию параметров РЭС с помощью *D-STATCOM* показали преимущество алгоритма на основе нечеткой логики 2-го типа, позволяющего повысить эффективность регулирования напряжения и тока в РЭС при внешних возмущениях.

© Аккад А.Ф., 2025

© Соснина Е.Н., 2025

Поступила в редакцию 24.11.2025

Принята к публикации 07.12.2025

Received 24.11.2025

Accepted 07.12.2025

Библиографический список

- [1] Magadam P.K., Sakri S.G. Effects of non linear loading on power quality // 13th International Conference on Advances in Computing Control and Telecommunication Technologies, 2023. P. 1119-1123.
- [2] Matre M. Harmonics in Photovoltaic Inverters & Mitigation Techniques, 2020.
- [3] Karawia H., Mahmoud M., Sami M. Flicker in distribution networks due to photovoltaic systems // 24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), 12-15 June, 2017. P. 647-649. DOI: 10.1049/oap-cired.2017.0492
- [4] Bayu A. Power quality enhancement using DSTATCOM in industry plants // Power Electronics and Drives. 2020. Vol 5 (41). P. 157-175. DOI: 10.2478/pead-2020-0012
- [5] Madhusudan R. Control strategies for D-STATCOM – a comprehensive review // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). 2019. Vol. 8. P. 2278-3075.
- [6] Sreekumar T., Jiji K.S. Comparison of proportional-integral (P-I) and integral-proportional (I-P) controllers for speed control in vector controlled induction motor drive, // 2012 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems, Allahabad, India, 2012. P. 1-6. DOI: 10.1109/ICPCES.2012.6508089.

- [7] Akkad A.F., Erdili N., Sosnina E. Application of a fuzzy logic controller in a D-STATCOM in an electrical network with distributed generation // *2023 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)*, Sochi, Russian Federation, 2023. P. 650-654. DOI: 10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110819
- [8] Akkad A.F., Sosnina E., Gusev D., Erdili N. Development of a D-STATCOM control based on fuzzy logic // *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, Sochi, Russian Federation, 2024. P. 509-514. DOI: 10.1109/RusAutoCon61949.2024.10694552.
- [9] Shi J., Noshadi A., Kalam A., Shi P. Fuzzy logic control of DSTATCOM for improving power quality and dynamic performance // *2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Wollongong, NSW, Australia, 2015. P. 1-6. DOI: 10.1109/AUPEC.2015.7324796
- [10] Pandu S.B., Sundarabalan C.K., Srinath N.S., Krishnan T.S., Priya G.S., Balasundar C. Power quality enhancement in sensitive local distribution grid using interval type-II fuzzy logic controlled DSTATCOM // *IEEE Access*. 2021. Vol 9. P. 59888-59899. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3072865
- [11] Kadri A., Makhlof S. Interval type2 fuzzy logic based statcom controller for stabilizing a mixed electrical network system // *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*. 2022. Vol 66(4). P. 391–405. DOI: 10.3311/PPee.19822
- [12] Srinivas D., Samyuktha P., Himabindu T., Shirisha K., Ashlesha S., Venkatesh E. Fuzzy logic controller-based DSTATCOM to improve power quality in distribution system // *Recent Advances in Power Systems. EPREC 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering*, J. Kumar, S.N. Singh, O.P. Malik. Singapore: Springer. 2024. Vol. 1192. – P. 35-49. DOI: 10.1007/978-981-97-2788-9_3
- [13] Hagras H. Type-2 FLCs: A new generation of fuzzy controllers // *Computational intelligence magazine*. 2007. Vol. 2. No. 1. P. 30-34. DOI: 10.1109/MCI.2007.357192
- [14] Handayani A.S., Husni N.L., Nurmaini S., Yani I. Application of type-1 and type-2 fuzzy logic controller for the real swarm robot // *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*. 2019. Vol. 15(06). P. 83–98. DOI: 10.3991/ijoe.v15i06.10075
- [15] Reddy J.G.P., Reddy K.R. IRP control based LSCPWM-multilevel DSTATCOM for power quality improvement // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 2019. Vol. 8. Is. 9S3. P. 353-358. DOI: 10.35940/ijitee.I3065.0789S319
- [16] Lata S., Ayyub M. Interval type-2 fuzzy logic system // *International Journal of Electronic and Electrical Engineering*, 2014. Vol. 7. No. 3. P. 219-224.
- [17] Aguiar R.A., Franco I.C., Leonardi F. Comparative analysis of type-1 and type-2 fuzzy controllers: Exploiting synergies for improved control system performance // *The Journal of Engineering and Exact Sciences*. 2023. Vol. 9. No. 4. DOI: 10.18540/jcecvl9iss4pp15936-01e
- [18] Mendel J.M. Type-2 fuzzy sets and systems: An overview // *IEEE Computational Intelligence Magazine*. 2007. Vol. 2. No. 2. P. 20-29. DOI: 10.1109/MCI.2007.380672
- [19] Chen Y., Wang D. Studies on centroid type-reduction algorithms for interval type-2 fuzzy logic systems // *2015 IEEE Fifth International Conference on Big Data and*

Cloud Computing, Dalian, China, 2015. P. 344-349. DOI: 10.1109/BDCloud.2015.14.

References

- [1] P.K. Magadam, S.G. Sakri, “Effects of non linear loading on power quality”, in proc. *13th International Conference on Advances in Computing Control and Telecommunication Technologies*, 2023, pp. 1119-1123.
- [2] M. Matre, *Harmonics in Photovoltaic Inverters & Mitigation Techniques*, 2020.
- [3] H. Karawia, M. Mahmoud and M. Sami, “Flicker in distribution networks due to photovoltaic systems”, in proc. *24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)*, 12-15 June, 2017, pp. 647-649. DOI: 10.1049/oap-cired.2017.0492.
- [4] A. Bayu, “Power quality enhancement using dstatcom in industry plants”, *Power Electronics and Drives*, vol. 5(1), pp. 157-175, 2020. DOI: 10.2478/pead-2020-0012.
- [5] R. Madhusudan, “Control strategies for D-STATCOM – a comprehensive review”, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, vol. 8, pp. 2278-3075, 2019.
- [6] T. Sreekumar and K.S. Jiji, “Comparison of proportional-integral (P-I) and integral-proportional (I-P) controllers for speed control in vector controlled induction motor drive, 2012 2nd international conference on power”, in proc. *2012 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems*, Allahabad, India, 2012, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICPES.2012.6508089
- [7] A.F. Akkad, N. Erdili and E. Sosnina, “Application of a fuzzy logic controller in a D-STATCOM in an electrical network with distributed generation”, in proc. *2023 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)*, Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 650-654. DOI: 10.1109/SmartIndustry-Con57312.2023.10110819.
- [8] A.F. Akkad, E. Sosnina, D. Gusev and N. Erdili, “Development of a D-STATCOM control based on fuzzy logic”, in proc. *2024 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 509-514. DOI: 10.1109/RusAutoCon61949.2024.10694552.
- [9] J. Shi, A. Noshadi, A. Kalam and P. Shi, “Fuzzy logic control of DSTATCOM for improving power quality and dynamic performance”, in proc. *2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Wollongong, NSW, Australia, 2015, pp. 1-6. DOI: 10.1109/AUPEC.2015.7324796.
- [10] S.B. Pandu, C.K. Sundarabalan, N.S. Srinath, T.S. Krishnan, G.S. Priya and C. Balasundar, “Power quality enhancement in sensitive local distribution grid using interval type-II fuzzy logic controlled DSTATCOM”, *IEEE Access*, vol 9, pp. 59888-59899, April 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3072865
- [11] A. Kadri and S. Makhlof, “Interval type2 fuzzy logic based statcom controller for stabilizing a mixed electrical network system”, *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 66(4), pp. 391–405, 2022. DOI: 10.3311/PPee.19822
- [12] D. Srinivas, P. Samyuktha, T. Himabindu, K. Shirisha, S. Ashlesha and E. Venkatesh, “Fuzzy logic controller-based DSTATCOM to improve power quality in distribution

- system”, in *Recent Advances in Power Systems. EPREC 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering*, J. Kumar, S.N. Singh, O.P. Malik, Singapore: Springer, 2024, vol. 1192, pp. 35-49. DOI: 10.1007/978-981-97-2788-9_3
- [13] H. Hagrass, “Type-2 FLCs: A new generation of fuzzy controllers”, *Computational intelligence magazine*, vol. 2, no. 1, pp. 30-34, Feb. 2007. DOI: 10.1109/MCI.2007.357192
- [14] A.S. Handayani, N.L. Husni, S. Nurmaini and I. Yani, “Application of type-1 and type-2 fuzzy logic controller for the real swarm robot”, *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*, vol. 15(06), pp. 83–98, 2019. DOI: 10.3991/ijoe.v15i06.10075
- [15] J.G.P. Reddy and K.R. Reddy, “IRP control based LSCPWM-multilevel DSTAT-COM for power quality improvement”, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, vol. 8, is. 9S3, pp. 353-358, July 2019. DOI: 10.35940/ijitee.I3065.0789S319
- [16] S. Lata and M. Ayyub, “Interval type-2 fuzzy logic system”, *International Journal of Electronic and Electrical Engineering*, vol. 7, no. 3. pp. 219-224, 2014.
- [17] R.A. Aguiar, I.C. Franco and F. Leonardi, “Comparative analysis of type-1 and type-2 fuzzy controllers: Exploiting synergies for improved control system performance”, *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, vol. 9, no. 4, July 2023. DOI: 10.18540/jcecvl9iss4pp15936-01e
- [18] J.M. Mendel, “Type-2 fuzzy sets and systems: An overview”, *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 20-29, May 2007. DOI: 10.1109/MCI.2007.380672.
- [19] Y. Chen and D. Wang, “Studies on centroid type-reduction algorithms for interval type-2 fuzzy logic systems”, in proc. *2015 IEEE Fifth International Conference on Big Data and Cloud Computing*, Dalian, China, 2015, pp. 344-349. DOI: 10.1109/BDCloud.2015.14.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Аккад Ахмад Фирас, ассистент Университета Алеппо, г. Алеппо, Сирийская Арабская Республика.

Ahmad Feras Akkad, teaching assistant of the Aleppo University, Aleppo, Syrian Arab Republic.

Соснина Елена Николаевна, доктор технических наук, профессор, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Elena N. Sosnina, Dr. Sci. (Eng), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

УДК 62-521

EDN EKLJGH

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ АВР С АВТОМАТИЧЕСКИМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ, ОСНАЩЕННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

С.В. ПоповORCID: 0009-0004-5274-2783 e-mail: popovsev3@yandex.ru

Волжский государственный университет водного транспорта

Нижний Новгород, Россия

Рассмотрена работа классической схемы автоматического ввода резерва (АВР), показаны ее недостатки при кратковременных отключениях напряжения на вводах или при значительных провалах напряжения вследствие воздействия на сеть нагрузки большой мощности. Приведена последовательность действий при управлении силовыми аппаратами, оснащенными электроприводами и дополнительными расцепителями. Рассмотрен АВР, собранный на базе автоматических выключателей с электроприводами и блоками задержки времени отключения. Выполнен анализ причин возникновения аварийных ситуаций при выходе из строя отдельных элементов управления автоматическими выключателями с дистанционным электроприводом. Предложен вариант АВР с сетью электрического питания собственных нужд, обладающей повышенной надежностью, для исключения аварийных ситуаций. Описаны схемные решения, проверенные в действии и позволяющие исключить ошибки в управлении системой электроснабжения. Показано, что сеть электрического питания системы управления АВР может быть подключена через источник бесперебойного питания (ИБП), который позволяет повысить качество питания системы управления. Исходя из опыта эксплуатации, описан принцип действия такой системы, и даны рекомендации к использованию системы управления с повышенной надежностью и расширенными функциональными возможностями.

Ключевые слова: автоматический ввод резерва, автоматический выключатель с электроприводом, автономная электростанция, дистанционное управление, источник бесперебойного питания, качество электроэнергии, независимый расцепитель, провал напряжения, реле минимального напряжения, система электроснабжения.

Для цитирования: Попов С.В. Особенности реализации АВР с автоматическими выключателями, оснащенными электроприводами // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 4. С. 23-31. EDN EKLJGH

FEATURES OF IMPLEMENTING AVR WITH CIRCUIT BREAKERS EQUIPPED WITH ELECTRIC DRIVES

S.V. Popov

ORCID: 0009-0004-5274-2783 e-mail: popovsev3@yandex.ru

Volga State University of Water Transport

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article examines the operation of the classical automatic reserve input (AVR) circuit and shows its disadvantages in case of short-term voltage outages at the inputs or in case of significant voltage drops due to the impact of a high-power load on the network. The sequence of actions for controlling power devices equipped with electric drives and additional release devices is given. An AVR assembled on the basis of circuit breakers with electric drives and shutdown time delay units is considered. The analysis of the causes of emergency situations in case of failure of individual control elements of circuit breakers with remote electric drive is carried out. An AVR variant with an electric power supply network for its own needs, with increased reliability, is proposed to eliminate emergency situations. Circuit solutions are described that have been tested in action and make it possible to eliminate errors in the management of the power supply system. It is shown that the electrical power supply network of the AVR control system can be connected via an uninterruptible power supply (UPS), which improves the quality of power supply to the control system. The principle of operation of such a system is described and recommendations are given for using a control system with increased reliability and enhanced functionality based on operational experience.

Keywords: automatic reserve input, circuit breaker with electric drive, autonomous power plant, remote control, uninterruptible power supply, power quality, independent release, voltage drop, minimum voltage relay, power supply system.

For citation: S.V. Popov, "Features of implementing AVR with circuit breakers equipped with electric drives", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 23-31, 2025. EDN EKLJGH

I. Введение

В последнее время в системах электроснабжения используются шкафы управления с реализованной схемой АВР (автоматический ввод резерва) одностороннего действия, выполненные не по классической схеме с применением контакторов, а с использованием автоматических выключателей, оснащенных электроприводами. Основными преимуществами АВР такого исполнения являются: более компактная конструкция, влияющая на массогабаритные параметры шкафа, меньшее энергопотребление (требуется только для включения и отключения автоматических выключателей), устойчивость к кратковременным (продолжительностью менее 0,5 с) отключениям напряжения на вводах.

АВР одностороннего действия, как правило, применяют для автоматического перехода с одного фидера электропитания на другой в случае отключения на нем напряжения [1-5]. На рис. 1 показана электрическая однолинейная схема силовой части АВР, реализованная на контакторах. Главным недостатком такого АВР является отключение контактора КМ в случае кратковременного отключения или значительного провала напряжения до 40-30 % от номинального значения. В ряде случаев такой перевод является нежелательным. Основными причинами падения напряжения является совпадение моментов включения нагрузки значительной мощности одного предприятия, либо запуск мощной нагрузки от сети с пониженным напряжением вследствие воздействия на нее нагрузкой другого предприятия, получающего электропитание от общего источника. Кратковременные отключения напряжения, чаще всего, наблюдаются в ночной период времени при переключении линий электроснабжения со стороны высокого напряжения, либо в случае аварий или при плановых ремонтных работах.

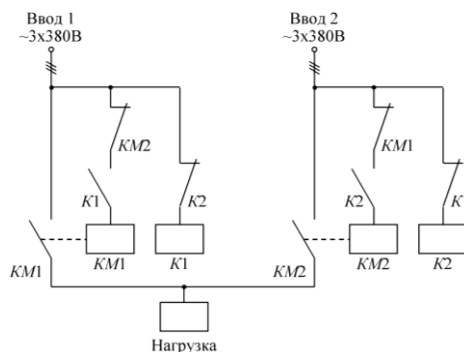


Рис. 1. Электрическая однолинейная схема АВР, реализованная на контакторах

Fig. 1. Single-line AVR electrical circuit implemented on contactors

II. Проблемы и постановка задачи

Исходя из наблюдений за системами электроснабжения предприятий, кратковременные отключения напряжения на питающих фидерах приводят к автоматическим запускам автономных генераторов с последующим переводом нагрузки на генератор, а в случае восстановления напряжения – к выполнению обратной синхронизации с целью перевода нагрузки для питания от сети.

Опыт эксплуатации электрооборудования показывает, что кратковременные провалы напряжения оказывают влияние на работу ряда потре-

бителей электроэнергии, особенно на содержащие в своем составе контакторную аппаратуру и контроллеры, требующие загрузки программы для восстановления работоспособности. Кратковременное отключение гидравлического оборудования приводит к гидроударам в системе гидропроводов, а в некоторых случаях сбой электропитания работающего оборудования может привести их к выходу из строя. Однако потребители, получающие электроэнергию от блоков питания, оснащенных накопителями электроэнергии, остаются в штатном режиме работы при сбое основного питания.

Применение автоматических выключателей с электроприводом в качестве силовых коммутационных аппаратов позволяет реализовать АВР с введенной задержкой времени на отключение (рис. 2) [6, 7, 9, 10]. Отключение автоматического выключателя выполняется посредством срабатывания реле минимального напряжения (РМН) K_U , воздействующего на механизм расцепления. Блок задержки (БЗ) позволяет поддерживать напряжение на катушке РМН при кратковременном отключении напряжения сети в течение времени до 0,5 с. БЗ реализован на базе выпрямителя и конденсатора большой емкости, поэтому питание РМН выполнено на напряжении постоянного тока. Работа автоматического выключателя с моторным электроприводом (МЭП) и блоком задержки БЗ срабатывания РМН исключает «ложные» отключения.

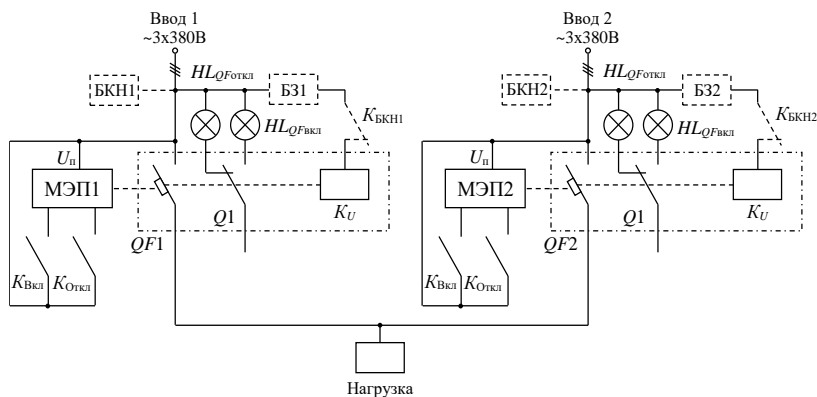


Рис. 2. Электрическая однолинейная схема АВР, реализованная на автоматических выключателях с электроприводами

Fig. 2. Single-line AVR electrical circuit implemented on circuit breakers with electric drives

В случае, когда необходим контроль качества электроэнергии, применяют блок контроля параметров напряжения (БКН) (верхнего и нижнего значения напряжения, обрыв фазы, порядок чередования фаз и др.). При ее

срабатывании нормально-замкнутый контакт блока БКН разрывает цепь питания РМН и автоматический выключатель отключает силовую цепь.

Наблюдение за работой таких автоматических выключателей разных производителей, а также анализ неисправностей показывают, что аварийные ситуации (объединение сетей, имеющих сдвиг фаз) возникают по механическим причинам. Опыт эксплуатации выявил, что возможны случаи, когда РМН при отключении напряжения оставалось во включенном состоянии, а механизм отключения автоматического выключателя не размыкал главные контакты. Такое положение автоматического выключателя не позволяет подключать к нагрузке другой источник электроэнергии для нормальной работы. В случае включения другого автоматического выключателя на эту же сеть возникает бросок тока с последующим отключением автоматических выключателей за счет срабатывания максимально-токовых расцепителей. Для исключения таких ситуаций и получения возможности дистанционного отключения автоматических выключателей они дополнительно оснащаются независимыми расцепителями (НР). НР повышают надежность работы автоматических выключателей в случае выхода из строя РМН либо механизма его срабатывания [8, 11].

Кроме того, при отключении силового питания также без электроэнергии остается автоматика и сигнализация состояния главных контактов автоматического выключателя. Обеспечить надежное питание схемы автоматики и сигнализации позволяет АВР собственных нужд, который в своем составе имеет источник бесперебойного питания (ИБП).

III. Описание варианта построения АВР

Ряд экспериментов показал, что при выводе из строя отдельных элементов автоматики управления приводом автоматического выключателя и создании аварийных ситуаций управления, схема управления остается в рабочем состоянии. Однако, для исключения одновременного включения автоматических выключателей разных фидеров питания возможно использовать информацию от блока измерения параметров электроэнергии БКН (рис. 2). При реализации системы контроля параметров и состояния силовых аппаратов схема системы управления переводится на дистанционное управление. В случае отключения напряжения на рабочем фидере выполняется анализ параметров напряжения и мощности, и, если сигнал положения силовых контактов окажется в состоянии «Включено», система управления сформирует сигнал для включения независимого расцепителя, который переведет автоматический выключатель в выключенное состояние. Одновременно с этим можно выполнить диагностику системы управления и выдать сообщение о неисправности. Такая система управления исключает ошибочное включение двух автоматических выключателей различных систем питания, информирует о фактическом состоянии силовых аппаратов и предупреждает о конфликтующих сигналах обратной связи.

На рис. 3 показана однолинейная схема цепи питания автоматики управления силовыми автоматическими выключателями, выполненная на базе АВР и ИБП. Схема имеет два взаимозаменяемых источника электроэнергии, а, в случае отключения напряжения на обоих фидерах, питание будет поступать от резервного источника – аккумуляторной батареи (АКБ). Аварийное отключение автоматического выключателя QF выполняется независимым расцепителем $K_{НР}$ через промежуточное реле $K_{УНР}$, а штатное включение и отключение – реле $K_{Вкл}$ и $K_{Откл}$, соответственно.

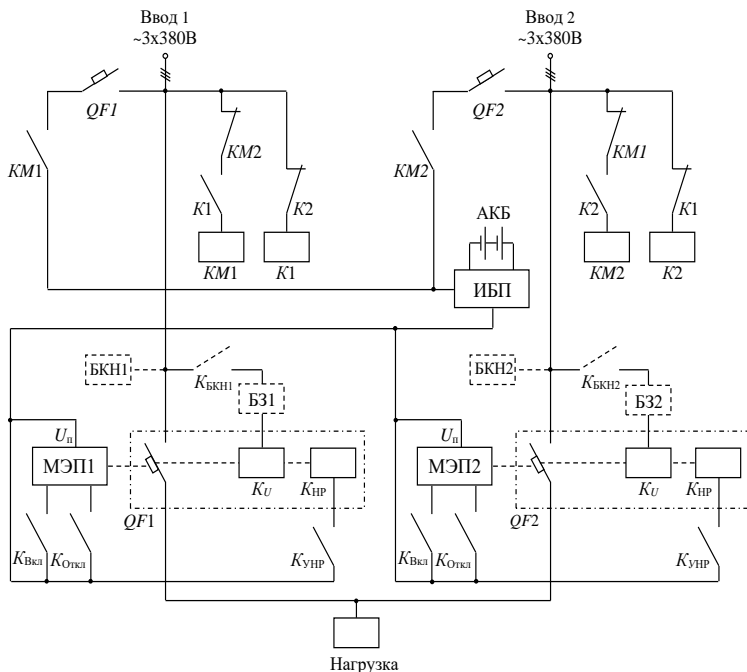


Рис. 3. Схема управления автоматическими выключателями с АВР собственных нужд:

АКБ – аккумуляторная батарея; ИБП – источник бесперебойного питания

Fig. 3. Control circuit for circuit breakers with AVR for own needs:

AKB – rechargeable battery; UPS – uninterruptible power supply

IV. Заключение

ABP одностороннего действия по предложенной структуре был реализован в системе электроснабжения предприятия г. Нижнего Новгорода. В данную систему электроснабжения входят автономный источник электроэнергии (газопоршневая установка) и две линии питания от городских сетей. Введенная в работу система ABP выполняет оперативные переключения между источниками электроэнергии, как в автоматическом, так и в ручном режиме при необходимости. Следует отметить стабильную (без сбоев и отключений) работу системы управления ABP, которая позволяет выполнять анализ качества электроэнергии и безаварийное переключение потребителей к источникам электроэнергии. Кроме того, система выполняет диагностику неисправностей элементов автоматических выключателей, оснащенных электроприводами и выводить сообщения об ошибках на экран оператора.

Надежная система управления с ABP при работе в комплексе с контроллерным управлением распределения электроэнергии между потребителями позволит повысить эффективность загрузки желаемых источников и исключить перебои в системе электроснабжения предприятия.

© Попов С.В., 2025

Поступила в редакцию 28.07.2025

Принята к публикации 19.08.2025

Received 28.07.2025

Accepted 19.08.2025

Библиографический список

- [1] Белов Б.А., Орлов В.С. Электрооборудование и электроснабжение береговых установок речного транспорта. М.: Транспорт, 1991. – 352 с.
- [2] Козлов А.Н. Автоматика управления режимами электроэнергетических систем. Благовещенск: Издательство АмГУ, 2014. – 64 с.
- [3] Полищук В.И. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем. Барнаул: АлтГТУ, 2022. – 91 с.
- [4] Павлов Г.М., Меркурьев Г.В. Автоматика энергосистем. С.-Пб.: Издание Центра подготовки кадров РАО «ЕЭС России», 2001. – 387 с.
- [5] Ершов А.М. Релейная защита и автоматика в системах электроснабжения. Челябинск: ЮУрГУ, 2013. – 76 с.
- [6] Альбом решений по автоматическому вводу резерва // ONI Разумная автоматика. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elec.ru/files/2022/08/24/katalog-reshenii-AVR.pdf> (дата обращения 01.11.2025).
- [7] Каталог решений ABP // EKF. [Электронный ресурс]. URL: <https://ep.ru/products/katalogs/EKF/ekf-avr.pdf> (дата обращения 01.11.2025).
- [8] Техническая коллекция Schneider Electric. Выпуск № 18. Типовые схемы ABP с применением интеллектуально программируемого реле Zelio Logic //

- Schneider Electric [Электронный ресурс]. URL: https://tech-expo.ru/upload/iblock/3ca/tipovye-skhemu-AVR_-v-tom-chisle-i-s-podklyucheniem-DES-_Schneider-Electric_.pdf (дата обращения 01.11.2025).
- [9] Automatic reserve entry (ABP) // Design ideas. [Электронный ресурс]. URL: <https://tricornmedals.com/automatic-reserve-entry-abp.html> (дата обращения 01.11.2025).
- [10] Automatic reserve input (ATS). [Электронный ресурс]. URL: <https://buildday-sis.com/en/issues/1879511> (дата обращения 01.11.2025).
- [11] How does an automatic transfer switch work? // CSQ low-voltage power distribution systems. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.csqelectric.com/how-does-an-automatic-transfer-switch-work> (дата обращения 01.11.2025).

References

- [1] B.A. Belov and V.S. Orlov, *Elektrooborudovanie i elektrosnabzhenie beregovykh ustanovok rechnogo transporta [Electrical equipment and power supply of coastal installations of river transport]*. Moscow: Transport, 1991 (in Russian).
- [2] A.N. Kozlov, *Avtomatika upravleniya rezhimami elektroenergeticheskikh system [Automation of control modes of electric power systems]*. Blagoveshchensk: Amur State University Publishing House, 2014 (in Russian).
- [3] V.I. Polishchuk, *Relejnaya zashchita i avtomatizaciya elektroenergeticheskikh system [Relay protection and automation of electric power systems]*, Barnaul: Altai State Technical University, 2022.
- [4] G.M. Pavlov and G.V. Merkuriev, *Avtomatika energosistem [Automation of power systems]*. St. Petersburg: Publication of the Personnel Training Center of RAO UES of Russia, 2001 (in Russian).
- [5] A.M. Ershov, *Relejnaya zashchita i avtomatika v sistemah elektrosnabzheniya [Relay protection and automation in power supply systems]*. Chelyabinsk: Publishing center of SUSU, 2013 (in Russian).
- [6] Al'bom reshenij po avtomaticheskomu vvodu rezerva [Album of solutions for automatic input of reserve power]. [Online]. Available at: <https://www.elec.ru/files/2022/08/24/katalog-reshenii-AVR.pdf> [Accessed: Nov. 1, 2025] (in Russian).
- [7] Katalog reshenij AVR [Catalogue of AVR solutions]. [Online]. Available at: <https://ep.ru/product/katalogs/EKF/ekf-avr.pdf> [Accessed: Nov. 1, 2025] (in Russian).
- [8] Tekhnicheskaya kolleksiya Schneider Electric [Schneider Electric Technical Collection]. Issue 18. Tipovye skhemy AVR s primeneniem intellektual'no programmiruемого реле Zelio Logic [Typical ATS circuits using the Zelio Logic intelligent programmable relay]. [Online]. Available at: https://tech-expo.ru/upload/iblock/3ca/tipovye-skhemu-AVR_-v-tom-chisle-i-s-podklyucheniem-DES-_Schneider-Electric_.pdf [Accessed: Nov. 1, 2025] (in Russian).
- [9] Automatic reserve entry (ABP). [Online]. Available at: <https://tricornmedals.com/automatic-reserve-entry-abp.html> [Accessed: Nov. 1, 2025].
- [10] Automatic reserve input (ATS). [Online]. Available at: <https://buildday-sis.com/en/issues/1879511> [Accessed: Nov. 1, 2025].

- [11] How does an automatic transfer switch work? [Online]. Available at: <https://www.csqelectric.com/how-does-an-automatic-transfer-switch-work> [Accessed: Nov. 1, 2025].

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Попов Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Sergey V. Popov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ДЛЯ РУДНИЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ 3,3 кВ

А.И. Белошистов

ORCID: 0009-0005-7057-2965 e-mail: beloshalex@yandex.ru

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический
институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования

Донецк, Россия

А.Л. Серов

ORCID: 0009-0007-9931-7559 e-mail: jusstus@yandex.ru

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический
институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования

Донецк, Россия

А.А. Белошистов

ORCID: 0009-0008-6034-168X e-mail: alex1950@ro.ru

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический
институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования

Донецк, Россия

Рассматривается разработка микропроцессорной системы максимальной токовой защиты для рудничного оборудования напряжением 3,3 кВ, включающей высоковольтные датчики тока и блок токовой защиты. Основное внимание уделено решению ключевых проблем защиты шахтных электросетей: обеспечению быстроты срабатывания, точности измерения тока и устойчивости к переходным процессам. Экспериментальные исследования демонстрируют стабильную работу системы при различных режимах нагрузки и переходных процессах, характерных для шахтных условий эксплуатации. Разработка направлена на импортозамещение и повышение взрывобезопасности высокопроизводительных угольных шахт за счет создания современного отечественного оборудования.

Ключевые слова: взрывозащита, датчики тока, контроль изоляции, микропроцессорная защита, рудничное оборудование.

Для цитирования: Белошистов А.И., Серов А.Л., Белошистов А.А. Микропроцессорная максимальная токовая защита для рудничного оборудования напряжением 3,3 кВ // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 4. С. 32-54. EDN IJNNAC

MICROPROCESSOR-BASED OVERCURRENT PROTECTION SYSTEM FOR 3.3 kV MINING ELECTRICAL EQUIPMENT

A.I. Beloshistov

ORCID: 0009-0005-7057-2965 e-mail: beloshalex@yandex.ru

Scientific-research, project-designing and technological institute
of explosion proof and mine electrical equipment
Donetsk, Russia

A.L. Serov

ORCID: 0009-0007-9931-7559 e-mail: jusstus@yandex.ru

Scientific-research, project-designing and technological institute
of explosion proof and mine electrical equipment
Donetsk, Russia

A.A. Beloshistov

ORCID: 0009-0008-6034-168X e-mail: alex1950@ro.ru

Scientific-research, project-designing and technological institute
of explosion proof and mine electrical equipment
Donetsk, Russia

Abstract. The article discusses the development of a microprocessor system of maximum current protection for mine equipment with a voltage of 3.3 kV, including high-voltage current sensors and a current protection unit. The main focus is on solving the key problems of protecting mine power grids: ensuring response speed, current measurement accuracy and resistance to transients. Experimental studies have demonstrated the stable operation of the system under various load conditions and transient characteristic. The development is aimed at import substitution and improving the explosion safety of high-performance coal mines by creating modern domestic equipment.

Keywords: explosion protection, current sensors, insulation control, microprocessor protection, mining equipment.

For citation: A.I. Beloshistov, A.L. Serov and A.A. Beloshistov, “Microprocessor-based overcurrent protection system for 3.3 kV mining electrical equipment”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 32-54, 2025. EDN IJNNAC

I. Введение

Условия работы в угольных шахтах характеризуются рядом особенностей. Небольшие размеры горных выработок, наличие большого количества различного оборудования и протяженность кабельной сети создают аварийные условия. Учитывая особенности эксплуатации электрооборудования в угольных шахтах, большое внимание уделяется мерам защиты.

Наиболее опасными аварийными ситуациями в электрических сетях шахты являются аварии, связанные с короткими замыканиями в электрических цепях, которые являются основной причиной пожаров в подземных электроустановках угольных шахт. На их долю приходится более 80 % всех электрических пожаров. При коротком замыкании выделяется значительное количество тепловой энергии, способное привести к повреждению электрооборудования и вызвать пожар или даже взрыв метановоздушной смеси [1]. Максимальная токовая защита применяется повсеместно и является основным видом защиты в шахте [2, 3].

Максимальная токовая защита является системой, состоящей из датчиков тока и исполнительного блока. Датчики тока являются важнейшим компонентом этой системы [4].

В современной релейной защите все чаще применяются микропроцессорные решения. Это связано с их неоспоримыми достоинствами по сравнению с традиционными электромеханическими и электронными системами. Использование передовой микропроцессорной техники открыло возможность для реализации сложных алгоритмов цифровой обработки данных в реальном времени [5]. В результате возросли и требования к характеристикам датчиков тока, поскольку качество их выходного сигнала критически важно для точного измерения величины тока и эффективной работы устройства максимальной токовой защиты в целом [6].

В ГБУ «НИИВЭ» разработан комплекс защит, включающий в себя специализированные высоковольтные датчики тока и микропроцессорный блок. Данная система защищает от межфазных коротких замыканий за счет алгоритмов максимальной токовой защиты и от токов утечки на землю по средствам предварительного контроля изоляции.

Разработка решает задачу ускорения перехода отечественного горнодобывающего электрооборудования на перспективное напряжение 3,3 кВ. Повышение напряжения является магистральным путем развития электротехнической инфраструктуры шахт, так как напряжение 1140 В исчерпало себя по многим причинам. Однако этот переход невозможен без соответствующих средств защиты, гарантирующих взрывобезопасность. Представленный микропроцессорный комплекс является одним из фундаментальных элементов, который обеспечивает необходимый уровень безопасности и надежности для широкого внедрения систем электроснабжения 3,3 кВ, закладывая основу для нового поколения отечественного горнодобывающего электрооборудования.

II. Цель статьи

Научное обоснование эффективности разработанной микропроцессорной системы максимальной токовой защиты для рудничного оборудова-

ния 3,3 кВ, подтвержденное экспериментальными исследованиями ее быстродействия, точности измерений и устойчивости к переходным процессам в условиях, моделирующих реальную шахтную эксплуатацию.

III. Конструктивно-технологические решения высоковольтных датчиков тока

Датчики тока трансформаторного типа выполнены в виде сердечника, шихтованного из холоднокатанной кремнистой трансформаторной стали, на которую наматываются вторичная изолированная обмотка. Первичная обмотка датчика тока выполнена в виде шины. Наличие размагничивающего кольца обеспечивает необходимую предельную кратности, т.е. наибольший первичный ток, при котором погрешность не превышает заданное значение [7].

Разработана линейка высоковольтных датчиков тока для различных номиналов, однако в рамках данной статьи подробно рассматриваются конструктивные и эксплуатационные особенности модели ДТВ-125, отражающей все ключевые решения серии.

Внешний вид датчиков тока типа ДТВ представлен на рис. 1.

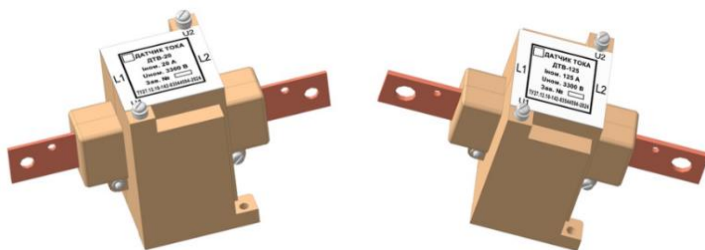


Рис. 1. Внешний вид высоковольтного датчика тока ДТВ-125

Fig. 1. Appearance of DTV-125 current sensors

Габаритные размеры высоковольтного датчика тока ДТВ-125 на рис. 2.

Первичная «обмотка» – это шина контролируемой цепи. Переменный ток в шине наводит во вторичной обмотке пропорционально уменьшенный ток, который преобразуется в падение напряжения на штатном нагрузочном резисторе. Этот сигнал напряжения подается на вход блока защиты. В датчиках предусмотрена гальваническая развязка выходной, слаботочной цепи от входной, силовой цепи, а также нормирование выходного сигнала до значения, удобного для измерения. Вся конструкция размещена в корпусе, предотвращающем повреждение изоляции и самих обмоток. Вторичный контур нагружается строго рассчитанным сопротивлением.

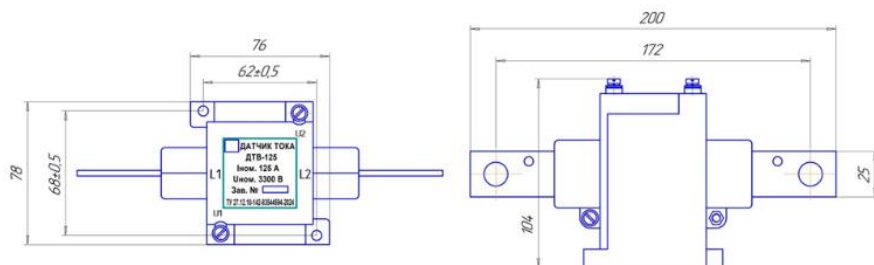


Рис. 2. Габаритные размеры высоковольтного датчика тока ДТВ-125

Fig. 2. Overall dimensions of the DTV-125 high-voltage current sensor

Выбор трансформаторных датчиков тока для шахтной защиты является принципиальным и обоснованным решением, продиктованным спецификой взрывоопасной среды. В отличие от датчиков Холла и катушек Роговского, традиционные трансформаторные датчики предлагают более высокий уровень надежности и безопасности, что является критически важным для шахтных условий. Ключевое преимущество заключается в их полной энергонезависимости – они не требуют внешнего питания или дополнительного интегратора для своей работы, а значит, гарантированно функционируют даже в момент аварии при просадках или полном пропадании оперативного напряжения. Это фундаментальное качество, дополненное простотой конструкции, обеспечивает также и взрывобезопасность, так как выходные цепи являются искробезопасными и не несут риска воспламенения. Кроме того, трансформаторные датчики лишены присущего датчикам Холла дрейфа нуля, который мог бы привести к ложным срабатываниям или, что хуже, к неотключению, и обладают гораздо более высокой помехоустойчивостью к электромагнитным наводкам от мощного шахтного оборудования, чем высокочувствительная, но уязвимая катушка Роговского. Таким образом, хотя современные активные датчики и превосходят трансформаторные по ряду параметров, их недостатки – зависимость от питания, сложность и меньшая устойчивость к суровым внешним условиям – делают их применение в системах безопасности шахт неоправданным риском.

Проведенные исследования и результаты лабораторных испытаний показали, что разработанный датчик тока имеют малые габариты, линейную характеристику в широком диапазоне изменения первичного тока и угловую погрешность менее 1 мс, что позволяет уменьшить общее время срабатывания устройства токовой защиты.

Выходной сигнал датчика тока имеет минимальные искажения, практически не сказывающиеся на точности измерения.

Характерные осциллограммы передачи сигнала для датчика тока

ДТВ-125 в установившемся режиме и при переходных процессах приведены на рис. 3. Данные и последующие осциллограммы получены в результате натуральных замеров в лабораторных условиях.

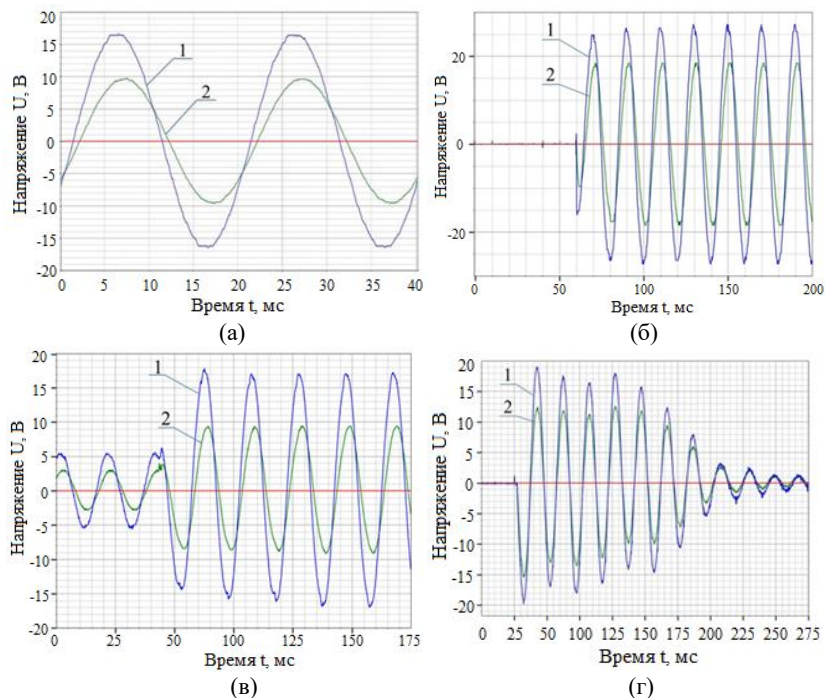


Рис. 3. Осциллограммы передачи сигнала датчиками тока ДТВ-125:
установившийся режим работы датчика тока (а); переходный процесс в режиме короткого замыкания при нулевых значениях начального тока (б); переходный процесс в режиме короткого замыкания при начальных значениях тока (в); переходный процесс в режиме пуска двигателя (г)
1 – напряжение на измерительном шунте, пропорциональное току в силовой цепи;
2 – выходной сигнал датчика тока

Fig. 3. Oscillograms of signal transmission by current sensors DTV-125:
steady-state mode of operation of current sensor (a); transient in short-circuit mode at zero values of initial current (b); transient in short-circuit mode at initial current values (v); transient in engine starting mode (z)
1 – voltage on the measuring shunt proportional to the current in the power circuit;
2 – current sensor output signal

Зависимость выходного напряжения от величины тока в силовой цепи для датчиков тока типа ДТВ-125 приведена на рис. 4.

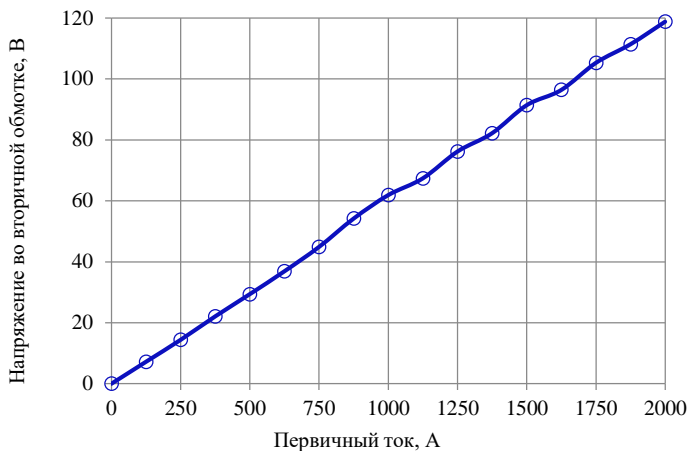


Рис. 4. Зависимость выходного напряжения во вторичной обмотке датчика тока ДТВ-125 от первичного тока

Fig. 4. Dependence of output voltage in DTV-125 current sensor secondary winding on primary current

IV. Принципы построения и методика испытаний блока токовой защиты

Блок токовой защиты представляет собой микропроцессорное устройство на базе современного контроллера, работающее в комплексе с высоковольтными датчиками тока. Микроконтроллер непрерывно обрабатывает сигналы от датчиков, реализуя цифровые алгоритмы защиты с высокой точностью и быстродействием, а также осуществляет постоянный контроль сопротивления изоляции сети, что гарантирует надежную защиту как от токов короткого замыкания, так и от утечек на землю, своевременно отключая оборудование при превышении заданных уставок, даже в условиях сложных переходных процессов и помех, характерных для шахтных электросетей.

Выходной сигнал в виде напряжения с датчиков тока поступает на вход микропроцессорного блока защиты. Для согласования данного сигнала со входом АЦП микроконтроллера используется цепь согласования, включающая резистивный делитель, защитный стабилитрон, ограничивающий перенапряжения на портах микроконтроллера, а также простейший низкочастотный RC -фильтр для подавления высокочастотных помех. После предварительной обработки однополупериодный сигнал поступает на АЦП микроконтроллера.

Процесс аналого-цифрового преобразования организован с использованием прямого доступа к памяти (DMA) и прерываний, что обеспечивает непрерывное накопление данных без загрузки центрального процессора. В течение двух периодов сетевого напряжения (40 мс) оцифрованные значения накапливаются в буфере, после чего вычисляется их среднее арифметическое. Этот усредненный результат сравнивается с установленным порогом срабатывания.

Такая организация преобразования сигнала обеспечивает высокую помехоустойчивость и минимальное время отклика системы, что особенно критично для работы в условиях повышенных электромагнитных помех шахтных электросетей. Сочетание аппаратной фильтрации и эффективного алгоритма усреднения позволяет достичь высокой точности измерений и максимального быстродействия защиты.

Основные параметры микропроцессорного устройства максимальной токовой защиты приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Параметры устройства токовой защиты

Table 1.
Current protection device parameters

Наименование основных параметров	Значение
Номинальное напряжение питания, В	36/69
Частота сети, Гц	50
Диапазон изменения рабочего напряжения, %	85÷115
Потребляемая мощность, Вт, не более	7
Время срабатывания при кратности тока ДТ к току уставки 1,5, мс, не более	100
Величина уставок сопротивления изоляции при номинальном напряжении, кОм: – для силовых цепей 1140 В – для силовых цепей 3300 В	110±10* и 300±80** 240±40* и 600±100**

Примечание: * – уставка «Аварийная»; ** – уставка «Предупредительная»

Программное обеспечение микроконтроллера играет ключевую роль в эффективности системы защиты, поскольку именно алгоритмы обработки сигналов определяют точность и быстродействие защиты. Блок-схема алгоритма работы наглядно демонстрирует структуру программы, что позволяет лучше понять логику ее функционирования: от первичного сбора данных с датчиков тока и до формирования управляющих сигналов. Такой визуализированный подход не только облегчает восприятие сложных алгоритмов, но и помогает оптимизировать программирование микроконтроллера и обеспечить надежную защиту оборудования в различных аварийных режимах, включая короткие замыкания и утечки тока [8, 9].

Блок-схема программного обеспечения микроконтроллера устройства токовой защиты приведена на рис. 5.

Защиты от однофазных замыканий на землю реализована с помощью функции контроля сопротивления изоляции. Для взрывоопасной среды шахты, где любая искра – это потенциальная катастрофа с человеческими жертвами, недопущение возникновения дуги при ОЗЗ является приоритетной задачей. Система контроля изоляции имеет две уставки: «предупредительную», которая при снижении сопротивления изоляции до определенного, не аварийного, уровня выдает световую сигнализацию, но не блокирует включение электрооборудования и «аварийную», которая уже не дает включить нагрузку, предотвращая развитие аварии. Главная цель – не допустить подачи силового напряжения на кабель с уже поврежденной изоляцией, тем самым предотвращая саму возможность возникновения дугового ОЗЗ под полным напряжением.

Классические схемы защиты на основе электромеханических реле, включая трехступенчатую токовую защиту и токовую защиту нулевой последовательности (ТЗНП), в современных условиях эксплуатации горнодобывающих предприятий демонстрируют ряд системных ограничений, обусловленных как принципиальными особенностями их построения, так и возросшими требованиями к безопасности и технологичности. Главный недостаток этих систем заключается в их реактивном характере – они начинают действовать только после возникновения аварийного режима, что в условиях шахты с высокой концентрацией метана и угольной пыли уже представляет собой критический риск. ТЗНП, например, часто оказывается неспособной эффективно обнаруживать высокоомные замыкания на землю, которые хотя и не вызывают значительных токов, но способны создавать устойчивые дуговые разряды, достаточные для воспламенения атмосферы. Кроме того, традиционные защиты обладают недостаточным быстродействием для выполнения жестких нормативных требований по отключению поврежденной линии в течение 100-150 мс, особенно при необходимости фильтрации пусковых токов мощных двигателей, которые могут многократно превышать номинальные значения. Эти проблемы усугубляются отсутствием в таких системах функций диагностики и предварительного контроля состояния оборудования, что не позволяет перейти от стратегии реагирования на аварию к стратегии ее профилактики. Таким образом, хотя традиционные защиты долгое время оставались отраслевым стандартом, архитектурные ограничения делают их малоприменимыми для выполнения современных требований к безопасности и надежности систем электроснабжения опасных производственных объектов.

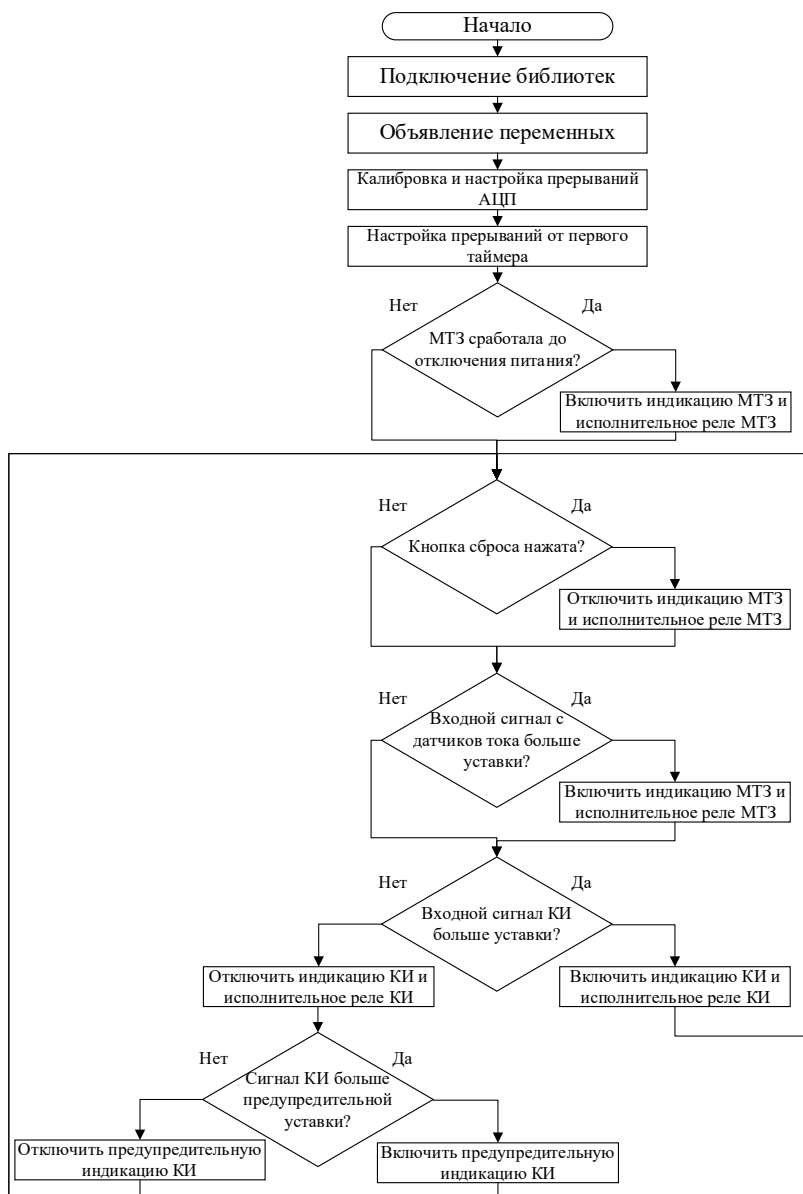


Рис. 5. Блок-схема программного обеспечения устройства токовой защиты

Fig. 5. Current protection device software block diagram

При проектировании блока защиты с функцией предварительного контроля сопротивления изоляции силовой сети учитывалось, что присоединительные цепи данного вида защиты должны быть устойчивы к многократным кратковременным воздействиям обратной ЭДС отключенных вращающихся электродвигателей. Затухание ЭДС происходит по сложному закону, так как имеет место изменение частоты и сопротивления двигателя. Самым неблагоприятным является выбег не нагруженного электродвигателя. Так как этот процесс более длительный во времени по своему воздействию на цепи контроля сопротивления изоляции. Экспериментальным путем определено время действия обратной ЭДС отключенного вращающегося электродвигателя. Осциллограмма обратной ЭДС отключенного вращающегося электродвигателя приведена на рис. 6.

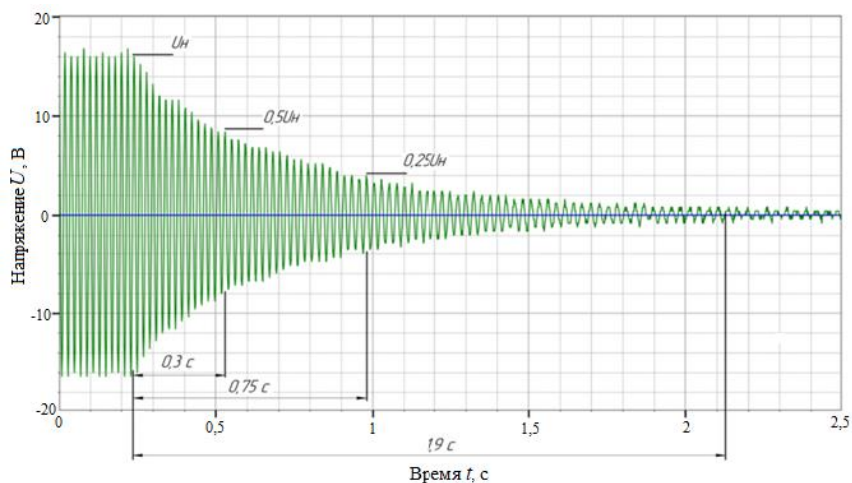


Рис. 6. Осциллограмма обратной ЭДС отключенного вращающегося электродвигателя

Fig. 6. Oscillogram of reverse EMF of disconnected rotating electric motor

Как видно из приведенной осциллограммы, время воздействия обратной ЭДС отключенного вращающегося электродвигателя не превышает 2 с. При этом в течение 0,3 с величина обратной ЭДС спадает до 0,5 начального значения. В течение 0,75 с ЭДС уменьшается до значения 0,25 начального значения. На базе полученных данных были проведены расчеты параметров цепи предварительного контроля изоляции.

Важнейшим условием обеспечения безотказной работы микропроцессорных устройства является принятие мер по защите входов микроконтроллера. Учитывая, что величина напряжения контролируемой сети

намного превышает величину источника оперативного тока, были приняты меры, обеспечивающие защиту входов микроконтроллера при протекании тока в цепи предварительного контроля сопротивления изоляции, обусловленного обратной ЭДС отключенного вращающегося электродвигателя. Проведенные исследования цепи предварительного контроля изоляции показали, что при различных видах воздействия величина сигнала на входе микроконтроллера не превышает допустимых значений. График изменения входного сигнала на микроконтроллере в зависимости от сопротивления контролируемой сети приведен на рис. 7.

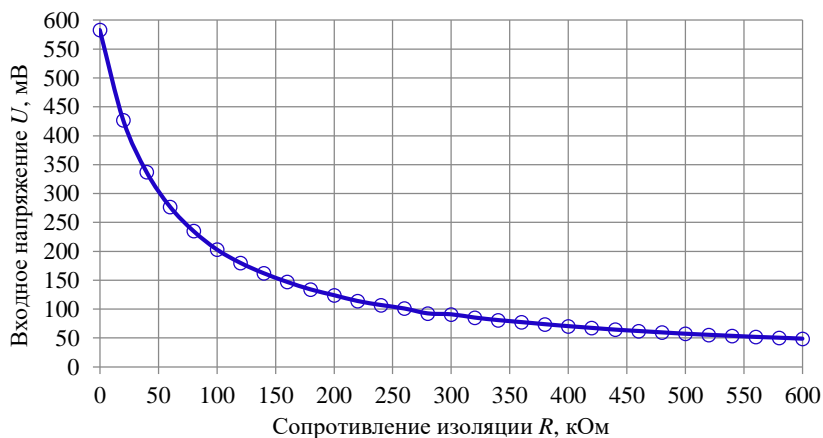


Рис. 7. График зависимости сигнала на входе микроконтроллера от величины сопротивления изоляции

Fig. 7. Dependence of microcontroller input signal on insulation resistance

Одним из показателей работы блока защиты служит невосприимчивость к ложным сигналам. Переходный процесс, сопровождающий коммутацию оборудования, в которое встроен блок защиты, объясняется тем, что на короткое время, на вход канала предварительного контроля изоляции сети поступает сигнал, зависящий от напряжения и параметров сети. Этот сигнал может вызвать кратковременное срабатывание канала предварительного контроля изоляции сети блока. Это связано с тем, что напряжение обратной ЭДС отключенного вращающегося электродвигателя значительно превосходит напряжение источника оперативного тока.

На рис. 8 представлена осциллограмма входного сигнала микроконтроллера, регистрирующая обратную ЭДС отключенного электродвигателя в режиме холостого хода.

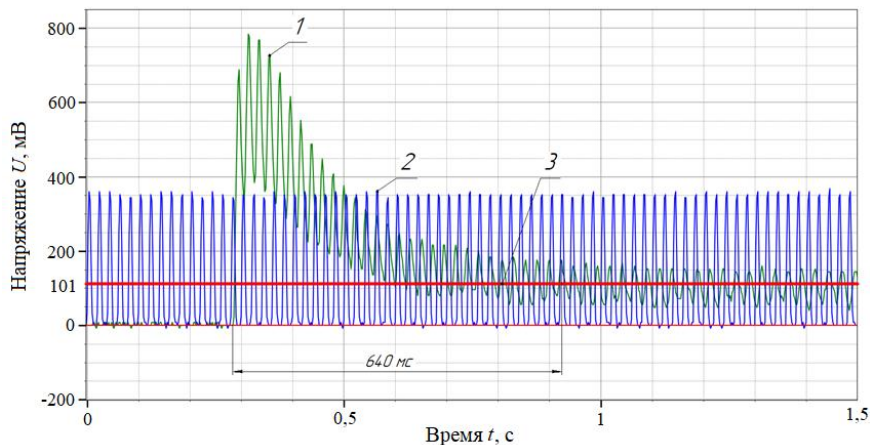


Рис. 8. Оциллограмма сигналов на входе микроконтроллера при регистрации обратной ЭДС отключенного электродвигателя:

*1 – обратная ЭДС двигателя; 2 – сигнал уставки защиты;
3 – среднее значение уставки*

Fig. 8. Oscillogram at microcontroller input at registration of reverse EMF of disconnected electric motor:

1 – motor reverse EMF; 2 – protection setpoint signal; 3 – average setpoint value

Эксперимент проводился при сопротивлении утечки 270 кОм, что близко к аварийной уставке силовой цепи 3,3 кВ, при этом электродвигатель работал в режиме холостого хода. Данные условия наиболее наглядно демонстрируют влияние обратной ЭДС электродвигателя на канал контроля изоляции. Как видно из оциллограммы, при остановке двигателя входной сигнал микроконтроллера превышает среднее значение уставки в течение 640 мс. Во избежание ложных срабатываний в данном режиме алгоритм программы был изменен следующим образом: при первом обнаружении превышения уставки в процессе оцифровки и усреднения сигнала контроля изоляции система выдерживает паузу 600 мс. Управляющий сигнал на реле формируется только в случае, если при повторной итерации входной сигнал по-прежнему превышает уставку. Предложенный алгоритм с задержкой 600 мс между итерациями контроля изоляции эффективно устраняет ложные срабатывания, вызванные обратной ЭДС электродвигателя.

Еще одним не менее важным показателем устройства токовой защиты является время срабатывания. Соблюдение требования к полному времени срабатывания электромагнитных пускателей при токах, превышающих уставку устройства максимальной токовой защиты в 1,5 раза, не бо-

лее 150 мс, является критически важным для обеспечения взрывобезопасности в угольных шахтах. В условиях потенциального скопления метана и угольной пыли даже кратковременное короткое замыкание может привести к образованию искры, способной инициировать взрыв. Быстрое отключение поврежденного участка цепи минимизирует энергию дуги, предотвращая нагрев окружающей среды до опасных температур. Это требование закреплено в ГОСТ 24754-2013 и подтверждено практикой эксплуатации шахтного оборудования, где даже незначительное превышение времени срабатывания защиты увеличивает риск аварий.

Время срабатывания устройства токовой защиты проверялось на нагрузочной установке с использованием высоковольтного датчика тока ДТВ-20 на 1-й, 5-й и 7-й уставках при токах в 1,5 раза выше тока уставки. Было проведено по 10 опытов на каждой уставке, результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2.
Время срабатывания блока при нулевом начальном токе

Table 2.
Unit response time at zero initial current

Уставка	Время срабатывания, мс									
1-я	41	43	50	39	61	70	58	41	65	51
5-я	38	47	42	55	51	56	42	45	50	36
7-я	43	56	66	38	39	64	62	58	57	63

Для примера на рис. 9 приведены осциллограммы, отображающие время срабатывания блока защиты с нулевым начальным током для 5-й уставки при токе в 1,5 раза выше тока уставки, а также время отключения силового контактора пускателя. В дальнейшем, если не указано иное, будут рассматриваться осциллограммы для этой уставки.

Однако применительно к реальным условиям эксплуатации шахтного электрооборудования наиболее вероятным аварийным сценарием является ситуация, когда защищаемый электродвигатель функционирует под номинальной нагрузкой. Для корректной оценки характеристик защиты в лабораторных условиях был воспроизведен именно этот рабочий режим. Измерения времени срабатывания проводились при наличии начального тока нагрузки с последующим мгновенным увеличением его до величины, соответствующей 1,5-кратному значению уставки. Результаты эксперимента приведены в табл. 3.

На рис. 10 приведена осциллограмма, отображающая время срабатывания блока защиты при наличии начального тока нагрузки при мгновенном увеличении тока в 1,5 раза превышающего ток уставки, а также соответствующее время отключения контактора.

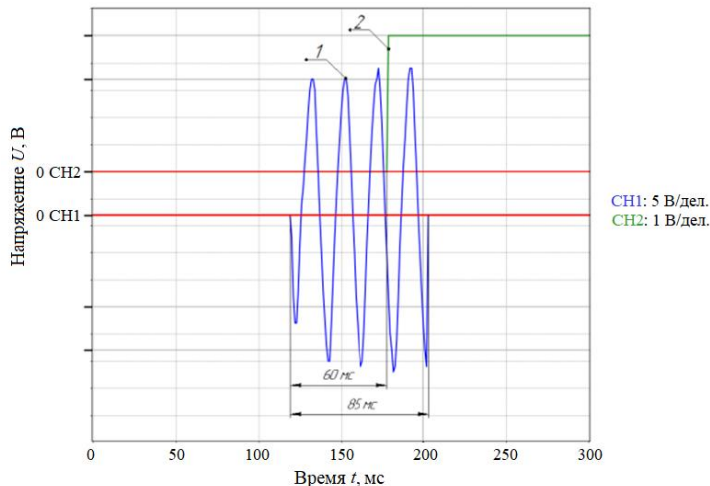


Рис. 9. Время срабатывания блока защиты и контактора с нулевым начальным током на 5-й уставке:
1 – сигнал с датчика тока; 2 – сигнал с исполнительного реле блока защиты

Fig. 9. Response time of the protection unit and contactor with zero initial current at the 5th setpoint:
1 – signal from current sensor; 2 – signal from protection unit actuating relay

Таблица 3.
Время срабатывания блока при ненулевом начальном токе

Table 3.
Unit response time at non-zero initial current

Уставка	Время срабатывания, мс									
1-я	47	48	50	58	52	55	49	40	59	65
5-я	25	31	32	34	35	42	45	45	48	50
7-я	30	35	50	51	52	57	62	63	71	74

Как следует из данных табл. 2 и 3, устройство токовой защиты в среднем срабатывает быстрее при ненулевом начальном токе нагрузки. Это объясняется тем, что, согласно алгоритму работы программы, входной сигнал с датчиков тока оцифровывается и усредняется за два периода синусоидального сигнала, следовательно, чем выше значение тока нагрузки перед возникновением аварийного режима, тем быстрее усредненное значение тока достигнет уставки при возникновении аварийной ситуации.

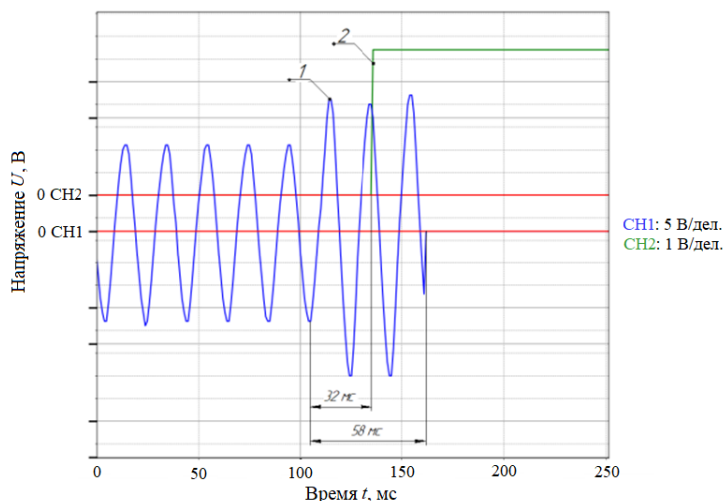


Рис. 10. Время срабатывания блока защиты и контактора с ненулевым начальным током на 5-й уставке:
 1 – сигнал с датчика тока; 2 – сигнал с исполнительного реле блока защиты

Fig. 10. Response time of the protection unit and contactor with non-zero initial current at the 5th setpoint:
 1 – signal from current sensor; 2 – signal from protection unit actuating relay

Таким образом, учитывая, что собственное время отключения контакторов типа КВТ не превышает 60 мс, экспериментальные данные подтверждают, что время срабатывания блока токовой защиты соответствует требованиям ГОСТ 24754-2013 для токов, превышающих уставку в 1,5 раза [10].

С целью углубленного изучения параметров защиты блока, а именно зависимости времени срабатывания от кратности тока нагрузки к уставке, были проведены дополнительные эксперименты, где ток нагрузки превышал уставку на 10, 20, 30 и 40 %. Результаты приведены в табл. 4.

Для визуализации зависимости времени срабатывания от величины перегрузки на рис. 11 представлены осциллограммы процесса срабатывания токовой защиты при различных кратностях тока нагрузки. Данные осциллограммы отображают время срабатывания исполнительного реле блока, а также время отключения контактора.

Таблица 4.
Зависимость времени срабатывания защиты от кратности перегрузки

Table 4.
Dependence of protection response time on overload rate

I_u/I_y	Уставка	Время срабатывания, мс										Среднее, мс
1,1	1-я	45	78	75	62	67	49	51	76	55	71	62,0
	5-я	61	48	61	75	81	59	52	69	76	59	
	7-я	59	68	51	66	49	51	59	49	67	72	
1,2	1-я	40	43	61	70	72	79	56	71	50	52	58,6
	5-я	51	49	66	47	67	43	61	76	53	50	
	7-я	63	58	47	74	58	67	45	46	74	69	
1,3	1-я	55	45	46	43	48	62	81	49	41	59	54,9
	5-я	64	65	58	41	46	56	69	48	61	48	
	7-я	52	74	57	42	70	45	55	55	58	55	
1,4	1-я	66	43	58	50	61	43	52	67	55	71	52,3
	5-я	66	40	48	48	65	45	61	47	44	45	
	7-я	37	31	37	38	55	56	70	59	56	55	

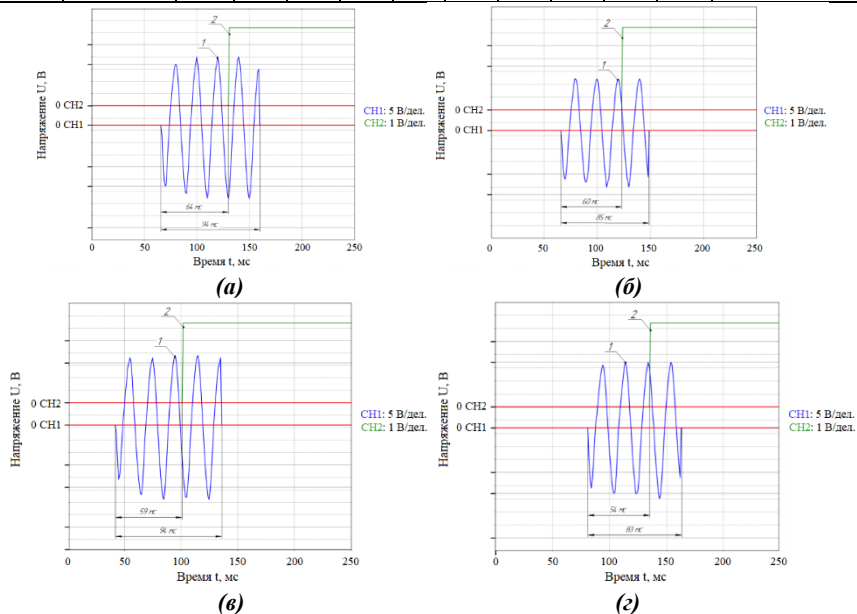


Рис. 11. Время срабатывания на 5-ой уставке при токе нагрузки (% уставки):
110 (а); 120 (б); 130 (в); 140 (г);

1 – сигнал с датчика тока; 2 – сигнал с исполнительного реле блока защиты

Fig. 11. Response time at 5th setpoint at load current (% of setpoint):

110 (a); 120 (б); 130 (в); 140 (г);

1 – signal from current sensor; 2 – signal from protection unit actuating relay

На основании экспериментальных данных построена зависимость времени срабатывания защиты от кратности тока нагрузки (рис. 12).



Рис. 12. Зависимость среднего времени срабатывания от кратности тока нагрузки

Fig. 12. Dependence of the average response time on the load current

Наблюдается обратная зависимость между временем срабатывания защиты и кратностью перегрузки: с ростом отношения $I/I_{уст}$ среднее время отключения уменьшается. Это объясняется ранее описанным алгоритмом обработки сигналов, согласно которому чем выше ток нагрузки, тем быстрее усредненное за два синусоидальных периода значение тока превысит уставку. Наблюдаемая зависимость времени отключения от величины нагрузки соответствует ожидаемым характеристикам алгоритма защиты.

Особое значение при оценке надежности блока токовой защиты имеют температурные испытания, учитывающие специфику шахтной эксплуатации. В условиях угольных шахт оборудование подвергается воздействию экстремальных температур: от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в горных выработках до $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ в подземных подстанциях. Устойчивость к температурным колебаниям исключает ложные срабатывания и гарантирует стабильность работы защиты даже при термических перегрузках. Соответствие этим требованиям подтверждает готовность работы блока к работе в жестких условиях, регламентированных нормами ПБ 05-618-03 для шахтного электрооборудования.

В ходе испытаний блок токовой защиты подвергался температурному воздействию в климатической камере при крайних значениях рабочих температур: $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$. После стабилизации температурного режима

проводилась поверка уставок максимальной токовой защиты и уставок срабатывания канала контроля изоляции. Полученные характеристики сравнивались с эталонными показателями, зафиксированными при нормальных условиях (20 ± 5 °C).

Результаты проверки уставок максимальной токовой защиты представлены в виде диаграммы на рис. 13.

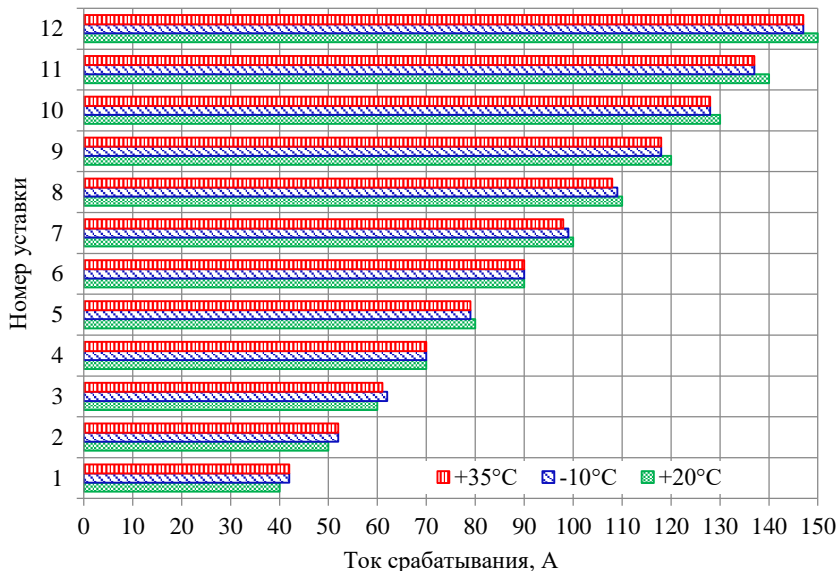


Рис. 13. Зависимость тока срабатывания максимальной токовой защиты от температуры окружающей среды для уставок 1-12

Fig. 13. Dependence of the tripping current of the maximum current protection on the ambient temperature for setpoints 1-12

Результаты испытаний подтверждают стабильность работы максимальной токовой защиты, так как отклонение от эталонной характеристики составило не более 5 %.

Сопротивление срабатывания канала контроля изоляции исследовалось для двух напряжений сети – 1140 В и 3300 В. При этом, помимо номинальных напряжений, испытания проводились при пониженном (85 % от номинального) и повышенном (110 % от номинального) напряжениях.

Результаты исследований приведены в диаграммах на рис. 14.

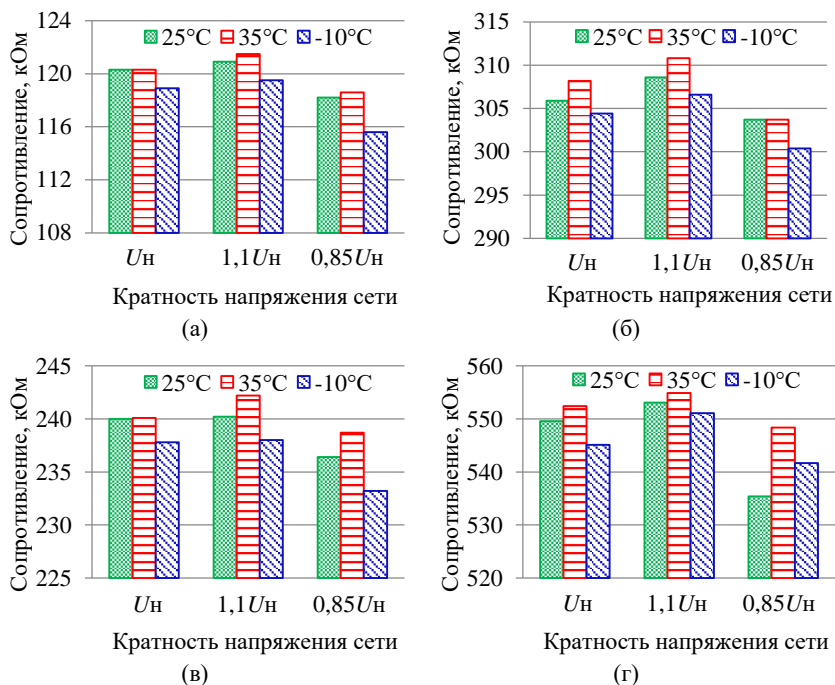


Рис. 14. Сопrotивление срабатывания при номинальном напряжении сети 1140 В (а, б) и 3300 В (в, г) в зависимости от кратности напряжения и температуры окружающей среды:

уставка «Аварийная» (а, в); уставка «Предупредительная» (б, г)

Fig. 14. Actuation resistance at rated mains voltage 1140 V (a, b) and 3300 V (в, г) depending on voltage ratio and ambient temperature:
setpoint "Emergency" (a, в); "Warning" setpoint (б, г)

V. Выводы

Разработан и испытан комплекс микропроцессорной максимальной токовой защиты с контролем изоляции для рудничного оборудования 3,3 кВ, включающий высоковольтные датчики тока ДТВ и блок защиты.

Экспериментально подтверждено, что время срабатывания комплекса не превышает 100 мс при кратности тока 1,5 к уставке, что полностью удовлетворяет требованиям ГОСТ 24754-2013 для обеспечения взрывобезопасности.

Предложен и апробирован алгоритм контроля изоляции, устойчивый к воздействию обратной ЭДС отключенных электродвигателей, что исключает ложные срабатывания в реальных условиях эксплуатации.

Показана высокая температурная стабильность характеристик защиты в диапазоне от -10°C до $+35^{\circ}\text{C}$, что гарантирует надежную работу в жестких условиях шахты.

Разработанный комплекс является перспективной отечественной разработкой, направленной на повышение надежности и безопасности систем подземного электроснабжения при переходе на повышенное напряжение 3,3 кВ.

© Белошистов А.И., 2025

© Серов А.Л., 2025

© Белошистов А.А., 2025

Поступила в редакцию 17.07.2025

Принята к публикации 02.10.2025

Received 17.07.2025

Accepted 02.10.2025

Библиографический список

- [1] ГОСТ Р 58585-2019. Оборудование горно-шахтное. Общие требования безопасности к системам электроснабжения и управления. Введ. 2020-04-01. М.: Стандартинформ, 2019. – 14 с.
- [2] ГОСТ 33968-2016. Защита от сверхтоков и контроль изоляции рудничного электрооборудования. Введ. 2018-03-01. М.: Стандартинформ, 2017. – 11 с.
- [3] Приказ Ростехнадзора от 19.11.2013 г. № 550 (ред. от 25.09.2018) «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» // Официальный интернет-портал правовой информации. [Электронный ресурс]. URL: <https://sudact.ru/law/prikaz-rostekhnadzora-ot-19112013-n-550-ob/prikaz/> (дата обращения 01.01.2025).
- [4] Джанишиев С.И., Костин В.Н. Релейная защита и автоматика распределительной сети угольной шахты // Электроцех. 2015. № 1-2.
- [5] Гуревич В. Новая концепция построения микропроцессорных устройств релейной защиты // Компоненты и технологии. 2010. № 6 (107). С. 93-96.
- [6] Новожилов Т.А., Новожилов А.Н., Ляшков А.А., Волгина Е.М. Измерение переменного тока в проводнике для нужд релейной защиты // Омский научный вестник. 2016. № 3 (147). С. 67-73.
- [7] Данилов А. Современные промышленные датчики тока // Современная электроника. 2004. № 2. С. 26-35.
- [8] Слесарев А.И., Моисейкин Е.В., Устьянцев Ю.Г. Аспекты проектирования электронных схем на основе микроконтроллеров. Екатеринбург: УрФУ, 2018. – 136 с.
- [9] Кёниг А., Кёниг М. Полное руководство по PIC-микроконтроллерам PIC18, PIC10F, rfPIC. Киев: МК-Пресс, 2007. – 256 с.
- [10] ГОСТ 24754-2013. Электрооборудование рудничное нормальное. Общие технические требования и методы испытаний. Введ. 2016-01-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.

References

- [1] Mining equipment. General safety requirements for power supply and control systems, GOST R 58585-2019, Apr. 2020.
- [2] Protection against overcurrent and insulation monitoring mine electrical equipment, GOST 33968-2016, Mar. 2017.
- [3] Order of Rostekhnadzor dated Nov. 19, 2013 no. 550 (as amended on Sep. 25, 2018) “Ob utverzhdenii Federal'nyh norm i pravil v oblasti promyshlennoj bezopasnosti “Pravila bezopasnosti v ugol'nyh shahtah” [On approval of Federal norms and rules in the field of industrial safety “Safety rules in coal mines”]”, *Official Internet portal of legal information*. [Online]. Available at: <https://sudact.ru/law/prikaz-rostekhnadzora-ot-19112013-n-550-ob/prikaz/> [Accessed: Jan. 1, 2025] (in Russian).
- [4] S.I. Dzhaniyev and V.N. Kostin, “Relay protection and automation of a distribution network of coal mines”, *Elektrocekh [Electrical workshop]*, no. 1-2 (in Russian).
- [5] V. Gurevich, “Novaya kontseptsiya postroeniya mikroprotseessornykh ustroystv releynoy zashchity [New concept of microprocessor relay protection devices]”, *Komponenty i tekhnologii [Components and technologies]*, vol. 6, no. 107, pp. 93-96, 2010 (in Russian).
- [6] T.A. Novozhilov, A.N. Novozhilov, A.A. Lyashkov and E.M. Volgina, “The measurement of alternating current in conductor for the needs of relay protection”, *Omsk Scientific Bulletin*, vol. 3, no. 147, pp. 67-73, 2016.
- [7] A. Danilov, “Sovremennye promyshlennye datchiki toka [Modern industrial current sensors]”, *Sovremennaya elektronika [Modern electronics]*, no. 2, pp. 26-35, 2004 (in Russian).
- [8] A.I. Slesarev, E.V. Moiseykin and Yu.G. Ust'yantsev, *Aspekty proektirovaniya elektronnykh skhem na osnove mikrokontrollerov [Aspects of microcontroller-based electronic circuit design]*. Ekaterinburg: UrFU, 2018 (in Russian).
- [9] A. Koenig and M. Koenig, *Polnoe rukovodstvo po PIC-mikrokontrolleram PIC18, PIC10F, rPIC [Complete guide to PIC microcontrollers PIC18, PIC10F, rPIC]*. Kiev: MK-Press, 2007 (in German).
- [10] Mining electrical equipment of normal production. General technical requirements and test methods, GOST 24754-2013, Jan. 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Белошистов Александр Иванович,

заведующий комплексным научно-исследовательским отделом электрических аппаратов ГУ «НИИВЭ», г. Донецк, ДНР, Российская Федерация.

Серов Андрей Леонидович, заведующий лабораторией комплексного научно-исследовательского отдела электрических аппаратов ГУ «НИИВЭ», г. Донецк, ДНР, Российская Федерация.

Белошистов Алексей Александрович, инженер-конструктор комплексного научно-исследовательского отдела электрических аппаратов ГУ «НИИВЭ», г. Донецк, ДНР, Российская Федерация.

Aleksandr I. Beloshistov,

head of the integrated research department of electrical devices of the GU «NIIVE» Donetsk, DPR, Russian Federation.

Andrey L. Serov, head of the laboratory of the integrated research department of electrical devices of the GU «NIIVE», Donetsk, DPR, Russian Federation.

Alexey A. Beloshistov, design engineer of the integrated research department of electrical devices of the GU «NIIVE», Donetsk, DPR, Russian Federation.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

EDN LFDLLZ

МЕТОДЫ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МИКРОЭНЕРГОСИСТЕМ

Е.А. Волошин

ORCID: 0000-0002-1318-3796 e-mail: voloshin.evgeniy@yandex.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия***В.Ф. Лачугин**

e-mail: lachugin_vf@ntc-power.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия***А.А. Волошин**

ORCID: 0009-0005-7554-0524 e-mail: voloshin.aa@yandex.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

Исследуются методы планирования и управления режимами работы микро-энергосистем (микроЭЭС) на основе прогнозов. Рассмотрены современные тенденции развития распределенных энергетических систем, обусловленные широким внедрением возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и увеличением интереса к локальным производителям электроэнергии. Описано влияние факторов, таких как высокие капитальные затраты на расширение инфраструктуры электросетей и необходимость координации производства и потребления энергии в условиях нестабильной генерации от ВИЭ. Изложены два подхода к управлению микроЭЭС: генетические алгоритмы и методы динамического программирования. Первый метод обеспечивает высокую адаптивность к изменению структуры и условий функционирования системы, позволяя учитывать большое число переменных и оперативно реагировать на изменения окружающей среды. Однако этот подход требует значительных вычислительных мощностей и увеличивает время нахождения оптимального решения. Метод динамического программирования отличается большей предсказуемостью и скоростью расчетов, но ограничен числом управляемых параметров и условиями применимости. Проведен сравнительный анализ указанных методик с точки зрения точности, стабильности и универсальности. Показана целесообразность применения генетических алгоритмов в системах с большим количеством переменных

и необходимостью постоянного обновления модели. В то же время динамическое программирование рекомендовано для случаев с ограниченными ресурсами и фиксированным набором контролируемых объектов. Практическое применение предложенных подходов иллюстрируется результатами численных экспериментов и примерами расчета оптимального распределения электрической энергии в реальных ситуациях. Полученные результаты подтверждают перспективность использования методов прогнозирования для улучшения технико-экономической эффективности микроЭЭС, повышая надежность и устойчивость энергоснабжения потребителей.

Ключевые слова: генетические алгоритмы, динамическое программирование, микроэнергосистема, надежность энергосистем, оптимизация режимов, прогнозирование, экономическая эффективность.

Для цитирования: Волошин Е.А., Лачугин В.Ф., Волошин А.А. Методы планирования режимов работы микроэнергосистем // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 4. С. 55-67. EDN LFDLLZ

METHODS OF PLANNING THE OPERATING MODE OF MICROGRID

E.A. Voloshin

ORCID: 0000-0002-1318-3796 e-mail: voloshin.evgeniy@yandex.ru
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Moscow, Russia

V.F. Lachugin

e-mail: lachugin_vf@ntc-power.ru
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Moscow, Russia

A.A. Voloshin

ORCID: 0009-0005-7554-0524 e-mail: voloshin.aa@yandex.ru
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Moscow, Russia

Abstract. This study investigates methods for planning and controlling the operation of microgrids based on predictive analytics. The research focuses on current trends in distributed energy systems, driven by the extensive deployment of renewable energy sources (RES) and the growing significance of local power generation. The analysis examines key factors influencing system performance, including substantial capital investments required for grid infrastructure expansion and the necessity for precise coordination between energy production and consumption under variable RES output conditions. Two primary operation planning approaches are investigated in detail: genetic algorithms and dynamic programming methods. Genetic algorithms demonstrate superior adaptability to

structural changes and operational conditions, effectively handling multiple variables. However, their implementation demands considerable computational resources and extended optimization time. Dynamic programming methods offers enhanced predictability and faster computation speeds but operates within constraints related to controllable parameters and applicability conditions. A comparative evaluation of these methods assesses their accuracy, stability, and versatility. The research demonstrates that genetic algorithms are particularly suitable for complex systems requiring continuous model updates and adaptation. Conversely, dynamic programming proves more effective in resource-constrained environments with predefined control parameters. The theoretical concepts are validated through numerical experiments and practical case studies demonstrating optimal energy distribution scenarios. The study shows the effectiveness of predictive methods in enhancing the technical and economic performance of microgrids while improving overall system reliability and energy supply stability.

Keywords: genetic algorithms, dynamic programming, microgrid, power system reliability, mode optimization, forecasting, economic efficiency.

For citation: E.A. Voloshin, V.F. Lachugin and A.A. Voloshin, “Methods of planning the operating mode of microgrid”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 55-67, 2025. EDN LFDLLZ

I. Введение

Из анализа общемировой тенденции внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) следует, что во многих случаях применение локальных источников энергии (т.е. источников, электроэнергия (ЭЭ) которых предназначена для потребления в непосредственной близости от их установки) является более предпочтительным вариантом электроснабжения потребителей по сравнению с расширением пропускной способности существующих линий электропередачи. Такие решения часто связаны с меньшими сроками ввода в эксплуатацию ВИЭ и высокими капитальными затратами на строительство и модернизацию воздушных и кабельных линий. Относительная доступность ВИЭ, систем накопления электроэнергии (СНЭЭ), а также локальных источников ЭЭ позволит устанавливать их даже субъектам малого и среднего бизнеса. Более крупные предприятия смогут обладать собственной электрозарядной инфраструктурой для электромобилей, которая характеризуется высокой мощностью. Однако корректное прогнозирование такой нагрузки пока является сложной задачей и требует дополнительных исследований. Таким образом, для микроЭЭС предприятий появляется задача скоординированного управления собственными электроэнергетическими активами с целью оптимизации экономических показателей при выполнении технических ограничений.

II. Задачи управления микроЭЭС

Описанная задача управления является многокритериальной, но может быть сведена с помощью метода главного критерия к задаче оптимизации эксплуатационных затрат. При этом технические ограничения представляются в виде штрафных функций. Для поддержания баланса ЭЭ в узлах микроЭЭС в изменяющихся внешних режимных условиях требуется обеспечить управление электрооборудованием с учетом прогноза режима работы как самого узла, так и окружающих узлов микроЭЭС.

Способ управления электрооборудованием в узле микроЭЭС заключается в моделировании режимов узла в течение суток для определения оптимальной последовательности управляющих воздействий. В зависимости от состава оборудования в узле микроЭЭС такими управляющими воздействиями могут быть:

- покупка ЭЭ;
- продажа ЭЭ;
- отключение управляемой нагрузки;
- включение резервного генератора.

Как правило, прямое управление ВИЭ не является задачей системы управления микроЭЭС в связи с тем, что неполное использование вырабатываемой ими электроэнергии приводит к значительному снижению экономических показателей. В связи с этим, работа таких электроустановок осуществляется в базе графика выработки электроэнергии. В то же время ВИЭ являются достаточно маневренными, что позволяет при необходимости быстро изменять выдаваемую ими мощность в пределах диапазона регулирования при наличии соответствующих условий (инсоляция, скорость ветра и т. д.) в достаточном объеме.

Задача выбора последовательности действий системы управления узлом микроЭЭС может быть выражена следующим образом:

$$\int_0^T F(\bar{k}(t)) dt \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $F(\bar{k}(t))$ – целевая функция, характеризующая эффективность работы узла микроЭЭС, $\bar{k}(t)$ – вектор управляющих воздействий на оборудование узла микроЭЭС в момент времени t .

Поскольку команды управления оборудованием являются дискретными, штрафная функция не дифференцируема. В связи с этим задача оптимального управления узлом с обеспечением долгосрочной устойчивой работы приводится к виду:

$$F_{\text{план}}(K) = \sum_{i=0}^N F(\bar{k}_i) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где \bar{k}_i – вектор управляющих воздействий на оборудование узла микроЭЭС в промежутки времени i , N – длительность периода планирования, K – массив управляющих воздействий, определяемый по формуле:

$$K = \begin{bmatrix} \bar{k}_1 \\ \dots \\ \bar{k}_N \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Массив K состоит из векторов \bar{k}_i . Координаты вектора \bar{k}_i представляют собой величины, характеризующие отдельные виды управляющих воздействий в диапазон времени i :

$$\bar{k}_i = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}, \quad (4)$$

где c_k – величина управляющего воздействия k -го типа. Например, для управляющего воздействия типа «покупка или продажа ЭЭ» величина c_k может принимать значения в диапазоне $[-P_{in}\Delta t, P_{out}\Delta t]$, где P_{in}, P_{out} – максимальная мощность узла на прием и отдачу ЭЭ из сети соответственно, Δt – дискретность планирования поведения узла по времени.

Целевая функция $F(\bar{k}_i)$ представлена в виде суммы экономического эффекта работы узла микроЭЭС в результате торгов на локальном рынке ЭЭ и набора штрафных функций. Штрафные функции учитывают негативные последствия, вызванные перезарядом и глубоким разрядом накопителя, наличием небаланса генерируемой и потребляемой электроэнергии в узле микроЭЭС на заданном интервале действия команды, потреблением топлива резервным генератором и снижением ресурса при включении такого генератора, а также штраф за незапланированное отключение управляемой нагрузки, подключенной к узлу микроЭЭС.

$$F(\bar{k}_i) = E_i + f_{\text{АБ}} + f_{\text{БАЛ}} + f_{\text{ДГ}} + f_{\text{УН}}, \quad (5)$$

где E_i – экономический эффект – разность между стоимостью проданной и купленной ЭЭ, $f_{\text{АБ}}$ – штрафная функция использования СНЭЭ, в том числе, штраф за перезаряд или переразряд накопителя (может быть многоступенчатым в зависимости от глубины заряда или разряда); $f_{\text{БАЛ}}$ – штраф за неба-

ланс генерируемой и потребляемой ЭЭ; $f_{\text{дг}}$ – штраф за использование резервного генератора, в том числе учитывающий снижение ресурса оборудования при каждом запуске установки; $f_{\text{ун}}$ – штраф за незапланированное отключение управляемой нагрузки потребителей, такой нагрузкой могут являться например электрозарядные станции для электромобилей; \bar{k}_i – команды управления оборудованием на интервале планирования i . Данное выражение составлено на основе метода главного критерия, в роли которого выступает экономический эффект работы узла микроЭЭС для собственника этого устройства. Остальные критерии переведены в разряд ограничений, нарушение которых приводит к значительному увеличению штрафных функций, показывающих неудовлетворительный результат при сравнении альтернативных вариантов.

В связи с тем, что целевая функция $F(K)$ является недифференцируемой, для определения оптимального значения K требуется применение специальных методов оптимизации. Поэтому для решения задач, относящихся к планированию поведения сложных технических систем, используются нейронные сети [1-3], генетические и эволюционные алгоритмы [4-6], а также марковские процессы принятия решений [7-8].

Рассмотрены два способа определения оптимальной последовательности управляющих воздействий: с применением генетического алгоритма и с применением динамического программирования для решения задачи моделирования марковских цепей.

III. Применение генетического алгоритма

Задача планирования работы микроЭЭС представляет собой нахождение такой последовательности операций купли и продажи ЭЭ, управления подключенным оборудованием (управляемая нагрузка, резервный генератор и др.) в каждый промежуток времени (например, 1 час) в течение следующих 24 часов, которая бы обеспечивала учет следующих критериев оптимальности: бесперебойность электроснабжения, минимизация затрат на закупку ЭЭ, достижение максимальной прибыли от продажи ЭЭ. При этом на решение накладываются дополнительные технические ограничения, вызванные влиянием предельных значений пропускной способности линий электропередачи, максимальной емкости СНЭЭ, скорости заряда и разряда СНЭЭ, деградации характеристик СНЭЭ при работе вне определяемых паспортом устройства режимов.

Для решения подобного класса задач хорошо зарекомендовали себя генетические алгоритмы (ГА) [4-6, 9-10]. Первую часть генома «особи» ГА в решаемой задаче составляют целые числа в диапазоне $s_{\text{лрЭ}} \in [-L; L]$ характеризующие поведение узла микроЭЭС в каждый час в течение следующих 24 часов, где L – мощность, покупаемая или продаваемая на локальном рынке ЭЭ, приведенная к целому числу. Отрицательные значения «гена»

характеризуют работу узла микроЭЭС в режиме покупки ЭЭ на локальном рынке на i -ом шаге планирования. Положительные значения характеризуют работу в режиме продажи накопленной ЭЭ. Вторая часть генома «особи» представлена значениями управляющих воздействий на собственную нагрузку узла (отключение групп нагрузок) $c_{ун}$ и значение управляющего воздействия на резервный генератор $c_{дг}$. Допустимыми значениями $c_{ун}$ являются целые числа в диапазоне $[0...N_{ун}]$ по количеству отключаемых групп нагрузок $N_{ун}$. Допустимыми значениями $c_{дг}$ являются только 0 и 1 соответствующие командам на отключение и включение резервного генератора. «Особью» в терминах ГА является последовательность «генов» $[c_{лрЭ1}, c_{лрЭ2}, \dots, c_{лрЭ24}, c_{дг1}, \dots, c_{дг24}, c_{ун1}, \dots, c_{ун24}]$.

Целевая функция задана указанной выше формулой $F(K)$. Принцип решения задачи планирования с помощью ГА заключается в создании исходной популяции особей путем случайного выбора последовательности генов для каждой из них и выполнении на полученной популяции следующих операций:

- вычисление значения фитнес-функции для каждой особи и сортировка особей в порядке возрастания фитнес-функции;
- разбиение популяции на четыре части: лучшая особь (с минимальным значением фитнес-функции), особи для скрещивания (следующие 25 % особей популяции), особи для мутации (следующие 25 % особей популяции), остальные особи;
- среди особей второй группы проводится операция скрещивания (*crossingover*), заключающаяся в случайной замене части генов на гены лучшей особи;
- среди особей третьей группы проводится случайное изменение части генов (*mutation*);
- особи четвертой группы заменяются вновь созданными особями со случайным набором генов.

Приведенные выше операции повторяются до выполнения одного из двух условий: значение целевой функции лучшей особи не изменялось в течение заданного количества итераций или достигнуто заданное значение количества итераций. Геном лучшей особи, полученный после завершения работы алгоритма, является решением задачи планирования.

IV. Применение метода динамического программирования

Вторым рассмотренным способом управления узлом микроЭЭС является способ планирования управления с использованием динамического программирования (ДП), успешно используемых для решения задач распределения нагрузки между генерирующими установками, оптимизации долгосрочных режимов гидроэлектростанций и эксплуатационных режимов систем электроснабжения.

Перейдя от непрерывной области значений состояний системы и команд к дискретной, можно свести задачу оптимального управления к двумерной задаче поиска оптимального маршрута. В таком случае допустимым пространством состояний системы будет являться ориентированный граф S , включающий уровни заряда накопителя для каждого из интервалов рассматриваемого периода планирования. Граф S ориентирован таким образом, чтобы предотвратить возможность возврата на состояние из предыдущего интервала планирования, а также ограничить возможные переходы между состояниями с учетом допустимых скоростей заряда и разряда накопителя.

Пример графа состояний S представлен на рис. 1.

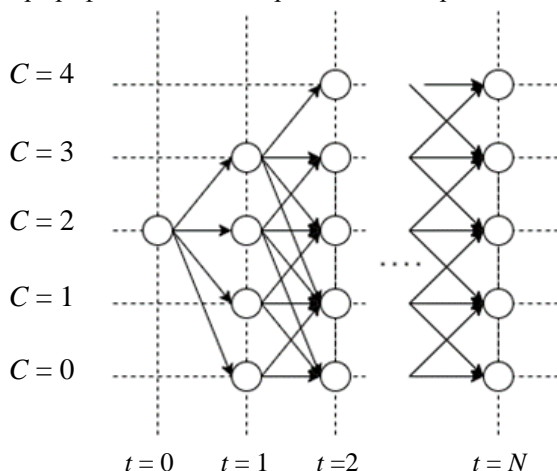


Рис. 1. Ориентированный граф состояний микроЭЭС

Fig. 1. Directed graph of microgrid states

По вертикальной оси представлено пространство уровней заряда СНЭЭ в микроЭЭС, по горизонтальной – интервалы планирования. Окружностями отмечены возможные состояния системы, а стрелками – допустимые направления перехода между этими состояниями.

Задача планирования режима микроЭЭС может быть решена с применением ДП путем разбиения задачи поиска пути на ориентированном графе на подзадачи поиска пути между отдельными частями графа. Таким образом, для каждого состояния на графе S определяется наилучшее предыдущее состояние, обеспечивающие переход в данное с наименьшим значением фитнес-функции. Затем для каждого допустимого конечного состояния S на последнем интервале в диапазоне планирования проводится расчет

оптимального пути через пространство состояний S . Из полученных значений выбирается конечное состояние, характеризующееся наименьшим значением фитнес-функции. Применение ДП для решения подобных задач часто сталкивается со значительным увеличением пространственной сложности алгоритма в связи с резким ростом количества рассматриваемых вариантов. Для решения этой проблемы в алгоритме предусмотрено объединение решений по критерию равенства уровней заряда СНЭЭ и интервала планирования. При этом каждому состоянию системы на графе S присваивается одно (наилучшее) значение целевой функции и соответствующий этому значению вектор перехода из предыдущего состояния.

На рис. 2 представлены граф состояний S микроЭЭС (снизу) и плана работы (сверху), полученного с помощью ДП.

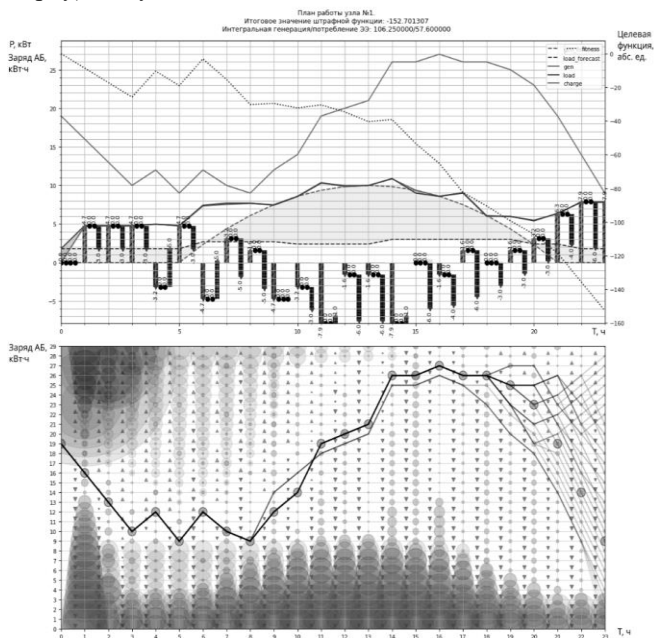


Рис. 2. Планирование работы и граф состояний микроЭЭС, полученный с помощью ДП

Fig. 2. Operation plan and state graph of microgrid using DP method

Сплошной серой линией отмечены возможные траектории изменения состояния микроЭЭС в течение 24 часов, удовлетворяющие всем ограничениям. Серыми точками отмечена оптимальная траектория изменения состояния микроЭЭС. Зеленые и красные круги соответствуют отклонению

баланса энергии в микроЭЭС, которое не может быть скомпенсировано имеющимися источниками ЭЭ и СНЭЭ. Красные и зеленые стрелки отражают использование резервного генератора и управляемой нагрузки соответственно. Синие круги показывают суммарную величину штрафной функции.

Сравнение результатов работы предложенных способов приведено на рис. 3 и 4.

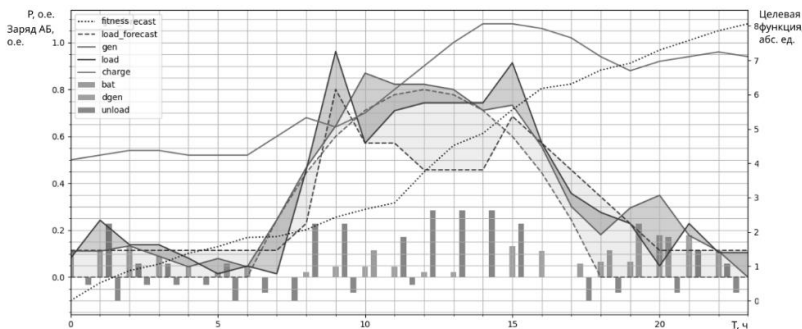


Рис. 3. Планирование режима микроЭЭС с помощью ГА

Fig. 3. Microgrid operation plan using GA method

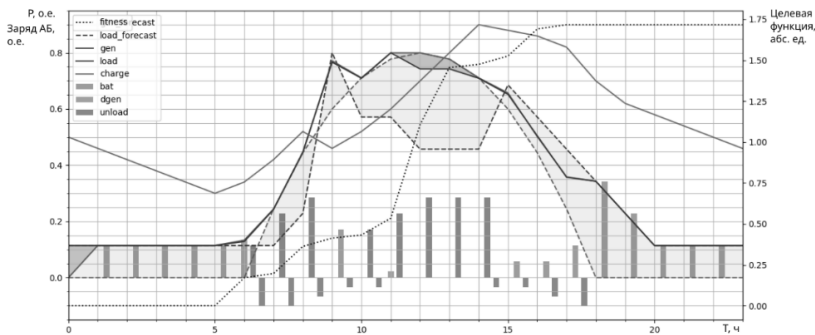


Рис. 4. Планирование режима микроЭЭС с помощью ДП

Fig. 4. Microgrid operation plan using DP method

Сплошными зелеными и красными линиями на графиках представлены планируемые значения генерируемой и потребляемой мощности, голубая область между ними характеризует небаланс мощности в плане работы микроЭЭС. Синяя сплошная линия показывает уровень заряда СНЭЭ микроЭЭС. Штриховые зеленые и красные линии показывают прогнозные

значения вырабатываемой и потребляемой мощности, которые используются в качестве входных данных в алгоритмах планирования. Пунктирная линия показывает значение целевой функции. Синий и коричневый столбцы на графике показывают рассчитанные алгоритмом планирования управляющие воздействия на управляемую нагрузку и резервный генератор соответственно. Зеленые и красные столбцы показывают рассчитанные алгоритмом планирования ожидаемые изменения заряда СНЭЭ (уменьшение и увеличение соответственно).

V. Заключение

Как видно из графиков на рис. 3 и 4, оба алгоритма дают схожие результаты. Отличительными особенностями метода планирования режима с использованием ДП являются его детерминированность и более высокая скорость работы, но качество работы алгоритма будет значительно отличаться в зависимости от конкретной реализации в программе для ЭВМ.

Метод планирования режима на основе ГА показывает значительно более долгое (и непрогнозируемое) время получения результата и не гарантирует повторение результата при повторном запуске расчета, но при этом не требует внесения значительных изменений в алгоритм при изменении количества управляемых параметров микроЭЭС.

Таким образом, управление на основе прогнозов является перспективным методом управления микроЭЭС, позволяющим увеличить их технико-экономическую эффективность за счет рационального использования доступных технических средств.

© Волошин Е.А., 2025

© Лачугин В.Ф., 2025

© Волошин А.А., 2025

Поступила в редакцию 05.11.2025

Принята к публикации 01.12.2025

Received 05.11.2025

Accepted 01.12.2025

Библиографический список

- [1] Salehi M., Tavakkoli-Moghaddam R. Application of genetic algorithm to computer-aided process planning in preliminary and detailed planning // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2009. Vol. 22. No. 8. P. 1179-1187. DOI: 10.1016/j.engappai.2009.04.005
- [2] Duan G., Yu Y. Problem-specific genetic algorithm for power transmission system planning // *Electric Power Systems Research*. 2002. Vol. 61. No 1. P. 41-50. DOI: 10.1016/S0378-7796(01)00191-2
- [3] Leite P., Carneiro A., Carvalho A. Energetic operation planning using genetic algorithms // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2002. Vol. 17. No. 1. P. 173-179. DOI: 10.1109/MPER.2001.4311153

- [4] Yang G.Y., Dong Z.Y., Wong K.P. A modified differential evolution algorithm with fitness sharing for power system planning // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2008. Vol. 23. No. 2. P. 514-522. DOI: 10.1109/TPWRS.2008.919420
- [5] Park Y.B., Kim H.S. Simulation-based evolutionary algorithm approach for deriving the operational planning of global supply chains from the systematic risk management // *Computers in Industry*. 2016. Vol. 83. P. 68-77. DOI: 10.1016/j.com-pind.2016.09.003
- [6] Michalewicz Z. Evolutionary algorithms for constrained engineering problems // *Computers and Industrial Engineering*. 1996. Vol. 30. No. 4. P. 851-870.
- [7] Gopalan N. Planning with abstract Markov decision processes // *International Conference on Automated Planning and Scheduling*, June 18-23, 2017, Pennsylvania, USA. Vol. 27. P. 480-488. DOI: 10.1609/icaps.v27i1.13867
- [8] Wang C., Ping J., Lei S., Wang Z., Hou Y. Markov decision process-based resilience enhancement for distribution systems: an approximate dynamic programming approach // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019. Vol. 11. No. 3. P. 1-8. DOI: 10.1109/TSG.2019.2956740
- [9] Гарколь Н.С., Гунер М.В. Применение генетических алгоритмов в решении задач планирования производства и реализации продукции // *Вестник Томского государственного университета*. 2012. № 2. С. 72-79.
- [10] Архипов И.В. Применение генетического алгоритма для многокритериальной задачи календарного планирования // *Нучно-технический вестник информационных технологи, механики и оптики*. 2015. Т. 15. № 3. С. 525-531. DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-3-525-531

References

- [1] M. Salehi and R. Tavakkoli-Moghaddam, "Application of genetic algorithm to computer-aided process planning in preliminary and detailed planning", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 22, no. 8, pp. 1179-1187, 2009. DOI: 10.1016/j.engappai.2009.04.005
- [2] G. Duan and Y. Yu, "Problem-specific genetic algorithm for power transmission system planning", *Electric Power Systems Research*, vol. 61, no 1, pp. 41-50, 2002. DOI: 10.1016/S0378-7796(01)00191-2
- [3] P. Leite, A. Carneiro and A. Carvalho, "Energetic operation planning using genetic algorithms", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no 1, pp. 173-179, 2002. DOI: 10.1109/MPER.2001.4311153
- [4] G.Y. Yang, Z.Y. Dong and K.P. Wong, "A modified differential evolution algorithm with fitness sharing for power system planning", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 514-522, May 2008. DOI: 10.1109/TPWRS.2008.919420
- [5] Y.B. Park and H.S. Kim, "Simulation-based evolutionary algorithm approach for deriving the operational planning of global supply chains from the systematic risk management", *Computers in Industry*, vol. 83, no. 68-77, 2016. DOI: 10.1016/j.com-pind.2016.09.003
- [6] Z. Michalewicz, "Evolutionary algorithms for constrained engineering problems", *Computers and Industrial Engineering*, vol. 30, no. 4, pp. 851-870, 1996.

- [7] N. Gopalan, "Planning with abstract Markov decision processes", in proc. *International Conf. on Automated Planning and Scheduling*, June 18-23, 2017, Pennsylvania, USA, vol. 27, pp. 480-488. DOI: 10.1609/icaps.v27i1.13867
- [8] C. Wang, J. Ping, S. Lei, Z. Wang and Y. Hou, "Markov decision process-based resilience enhancement for distribution systems: an approximate dynamic programming approach", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 3, pp. 1-8, 2019. DOI:10.1109/TSG.2019.2956740
- [9] N.S. Garkol' and M. Guner, "Application of genetic algorithms to the production and selling problems", *Bulletin of Tomsk State University*, no. 2, pp. 72-79, 2012.
- [10] I.V. Arkhipov, "Genetic algorithm application for multi-criteria scheduling problem", *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, no. 3, pp. 525-531, 2015. DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-3-525-531

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Волошин Евгений Александрович, старший преподаватель Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация.

Evgeniy A. Voloshin, senior lecturer of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation.

Лачугин Владимир Фёдорович, доктор технических наук, профессор Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация.

Vladimir F. Lachugin, D. Sci. (Eng.), professor of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation.

Волошин Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация.

Alexander A. Voloshin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation.

УДК 621.316.925

EDN NNIKQD

ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЧАСТОТОНЕЗАВИСИМЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ С ОДНОЙ ПОДВОДИМОЙ ВЕЛИЧИНОЙ

С.В. Иванов

ORCID: 0000-0002-7461-0141 e-mail: serj3a@mail.ru

ООО «Релематика»

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова
Чебоксары, Россия

Современные нормативные документы предъявляют требования к релейной защите по обеспечению корректной работы в широком диапазоне частот 40-80 Гц. В статье рассматривается методическая погрешность, возникающая при оценке действующего значения электротехнического сигнала неизвестной частоты. Анализируются различные способы определения действующего значения сигнала. С целью минимизации методической погрешности предлагается использовать многоканальный фильтр ортогональных составляющих.

Ключевые слова: многоканальный фильтр, фильтр действующего значения, фильтр ортогональных составляющих, частотонезависимые измерительные органы.

Для цитирования: Иванов С.В. Практические вопросы реализации частотонезависимых измерительных органов релейной защиты с одной подводимой величиной // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 4. С. 68-76. EDN NNIKQD

PRACTICAL ISSUES OF IMPLEMENTATION OF FREQUENCY INDEPENDENT MEASURING ELEMENTS FOR RELAY PROTECTION WITH ONE SUPPLIED QUANTITY

S.V. Ivanov

ORCID: 0000-0002-7461-0141 e-mail: serj3a@mail.ru

LLC «Relematika»

Chuvash State University n.a. I.N. Ulyanov
Cheboksary, Russia

Abstract. Modern standards impose requirements for relay protection to ensure correct operation in a wide frequency range of 40-80 Hz. The article discusses the methodological error that arises when estimating the effective value of an electrical signal of unknown frequency. Various methods for determining the effective value of a signal are considered. It is proposed to use a multi-channel filter of orthogonal components in order to minimize the methodological error.

Keywords: multichannel filter, valid value filter, orthogonal components filter, frequency independent measuring element.

For citation: S.V. Ivanov, "Practical issues of implementation of frequency independent measuring elements for relay protection with one supplied quantity", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 68-76, 2025. EDN NNIKQD

I. Введение

Большинство измерительных органов (ИО) релейной защиты (РЗ) используют в своей работе одну подводимую величину и реагируют на действующее значение некоего электротехнического сигнала. Это максимальные и минимальные ИО, использующие в своей работе, компоненты основной гармоники электротехнического сигнала. Современные нормативные документы предъявляют к РЗ требования корректной работы в широком диапазоне частот $f = 40 - 80$ Гц [1]. Ранее были разработаны специализированные методы выделения спектральных компонент, основанные на преобразовании Прони [2, 3]. В то же время данный подход требует отдельной реализации и больших вычислительных затрат. Также открыт остается вопрос его работ в условиях нелинейных процессов – бросок тока намагничивания, насыщение трансформаторов тока.

II. Синтез фильтров ортогональных составляющих

В РЗ наиболее часто рассматривается сигнал, включающий в себя периодическую $i_{\text{пер}}(k)$ и аperiodическую $i_{\text{ап}}(k)$ составляющие, которые наиболее ярко выражены при коротких замыканиях (КЗ):

$$i(k) = i_{\text{пер}}(k) + i_{\text{ап}}(k) = I_1 \sin(\omega h k + \varphi_1) + I_e e^{-\alpha h k}, \quad |I_e| \leq I_{\text{м1}}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$, f – частота сигнала, φ_1 – начальная фаза, h – период дискретизации, α – параметр затухания аperiodической составляющей.

Чаще других для оценки составляющей гармонической составляющей \hat{I}_1 используется фильтр ортогональных составляющих (ФОС), основанный на дискретном преобразовании Фурье. Его структурная схема (рис. 1) включает в себя умножитель, опорный сигнал $\underline{f}_1(k)$, определяемый номинальной частотой сети $\omega_0 = 2\pi f_0$ ($f_0 = 50$ Гц), и заграждающий фильтр (ЗФ), реализующий операцию усреднения [2].

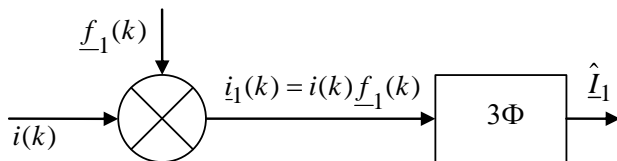


Рис. 1. Одноканальный фильтр ортогональных составляющих

Fig. 1. Single-channel orthogonal component filter

То же самое, но с математической точки зрения:

$$\hat{I}_1 = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i(k) e^{j\omega_0 h k}, \quad (2)$$

где N – количество отсчетов на окне наблюдения.

Вследствие требований о быстродействии РЗ, ФОС ограничен в объеме наблюдаемой информации. Окно наблюдения фильтров, применяемых в задачах РЗ, как правило, не превышает один или два периода промышленной частоты (однопериодный или двухпериодный фильтры).

Необходимо обратить внимание, что (2) есть следствие применения метода наименьших квадратов [4] к аппроксимации исходного сигнала в предположении его следующей модели:

$$i_k = I_0 + \sum_{v=1}^{N/2} I_v \sin(v\omega_0 h k + \varphi_v), \quad (3)$$

где I_0 – постоянная составляющая, I_v – гармоническая составляющая частоты $v\omega_0$, v – номер гармонической составляющей.

В нормальном режиме частота энергосистемы близка к номинальной ($\omega \approx \omega_0$) и результат работы ФОС близок к фактическому значению

$I_1 \approx \text{mod}(\hat{I}_1)$. Но при аномальных режимах, когда частота электротехнического сигнала отлична от номинальной ($\omega \neq \omega_0$), ФОС обладает методической погрешностью. Корректность оценки \hat{I}_1 удобно рассмотреть в базисе

интервальной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) (рис. 2), которая показывает возможный диапазон изменения выходного сигнала ФОС по отношению к фактическому значению $A(f) = [\hat{I}_{1,\min}(f, t); \hat{I}_{1,\max}(f, t)] / I_1$ в зависимости от частоты анализируемого сигнала. Изменение во времени сигнала на выходе ФОС обусловлено тем, что в общем случае $f / f_0 \notin \mathbb{Q}$.

Рис. 2 показывает, что ФОС с постоянной частотой опорного сигнала $\hat{f}_1(k)$

не позволяет обеспечить требования нормативной документации о погрешностях: $\pm 2,5\%$ при номинальной частоте, $\pm 5\%$ при изменении частоты от 45 до 55 Гц [5], $\pm 10\%$ – в диапазоне частот 40-80 Гц [1].

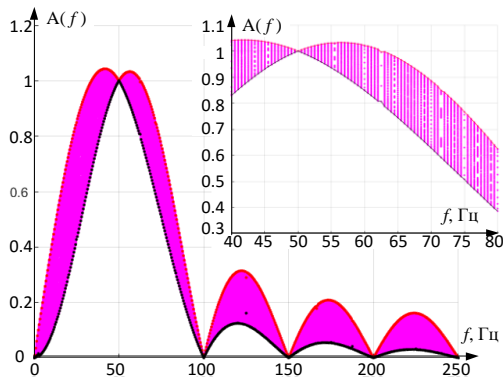


Рис. 2. Интервальная АЧХ однопериодного ФОС

Fig. 2. Interval frequency response of a single-period orthogonal component filter

Известно, что частота электротехнического сигнала определяется частотой работы энергосистемы, которая в свою очередь на практике может быть оценена с использованием каналов напряжения. Таким образом возможно привести в соответствие частоту опорного сигнала $\underline{f}_1(k)$ к частоте работы энергосистемы. Однако оценка частоты занимает несколько периодов исследуемого сигнала, что может привести к затягиванию в получении результатов и как следствие к снижению быстродействия РЗ, что на практике может быть недопустимо. Еще более значимым недостатком является то, что в простых устройствах РЗ появляется зависимость от каналов напряжения, что является крайне нежелательным. Можно рассматривать подход оценки частоты на основе анализа токового сигнала, но в этом случае начинают оказывать влияние нелинейные процессы в измерительных преобразователях (например, насыщение трансформатора тока), которые ставят дополнительную задачу выделения участков правильной трансформации даже для простых ИО, работающих с одной подводимой величиной.

Альтернативным решением может быть использование нелинейного фильтра, выделяющего действующее значение (*RMS*-фильтр) по известному алгоритму:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\sum_{k=0}^N i^2(k) / N} . \quad (4)$$

Его интервальная АЧХ показывает (рис. 3а), что в диапазоне частот 45-55 Гц погрешность измерения однопериодного *RMS* фильтра составляет $\pm 6\%$, а в диапазоне 40-80 Гц – $\pm 10\%$. Также у *RMS*-фильтра отсутствует методическая погрешность при номинальной частоте. Двухпериодный *RMS*-фильтр обеспечивает погрешность $\pm 5\%$ во всем диапазоне частот 40-80 Гц (рис. 3 б).

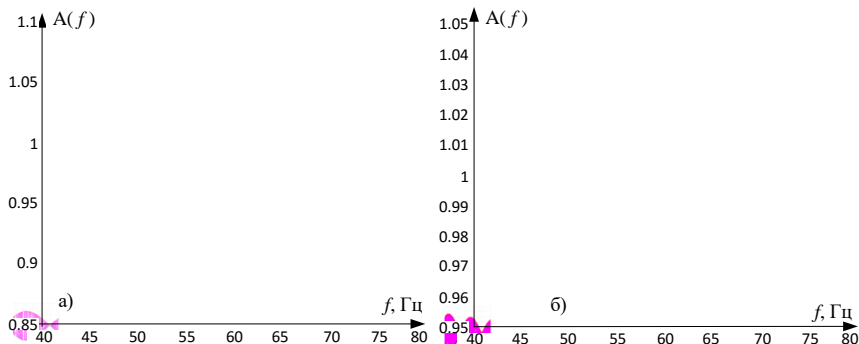


Рис. 3. Интервальная АЧХ *RMS*-фильтров в диапазоне частот [40...80] Гц:
а) однопериодный, б) двухпериодный

Fig. 3. Interval frequency response of *RMS* filters
in the frequency range [40...80] Hz:
а) single-period, б) two-period

В то же время интервальная АЧХ однопериодного *RMS*-фильтра показывает (рис. 4), существенное влияние (до $+40\%$) на результат измерения низкочастотных компонентов, которые на практике обусловлены апериодически затухающими переходными процессами. Также *RMS*-фильтр пропускает высокочастотные составляющие, которые генерируются нелинейной нагрузкой (тяговые подстанции железнодорожного транспорта, предприятия металлургии и т.д.). Высокочастотные составляющие также могут возникать в первый момент времени КЗ. По этой причине в РЗ используют фильтры, которые пропускают токи и напряжения с частотой, близкой к основной частоте, и подавляют низкочастотные и высокочастотные составляющие [6]. В свою очередь, *RMS*-фильтры используются для работы медленнodelействующих ступеней защиты электрооборудования от перегрузки, поскольку высокочастотные составляющие также участвуют в его нагреве.

Можно рассмотреть иной подход оценки действующего значения [7], который состоит в использовании многоканального ФОС (МФОС). Он состоит из ряда элементарных фильтров (рис. 5), использующих преобразование Фурье (на рис. 5 $\underline{f}_1(k)$, $\underline{f}_2(k)$, $\underline{f}_n(k)$ – опорные сигналы произвольных

частот). Получив оценки ($\hat{\underline{I}}_1, \hat{\underline{I}}_2, \dots, \hat{\underline{I}}_n$) на выходе элементарных ФОС, необходимо выполнить их совместный анализ.

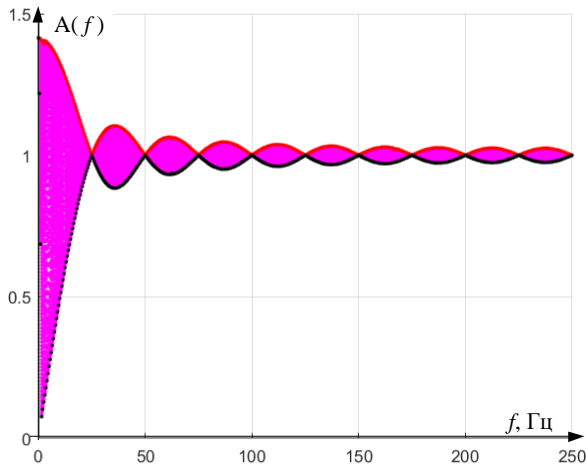


Рис. 4. Интервальная АЧХ однопериодного RMS-фильтра:
частоты $[0 \dots 250]$ Гц

Fig. 4. Interval frequency response of a single-period RMS filter:
frequencies $[0 \dots 250]$ Hz

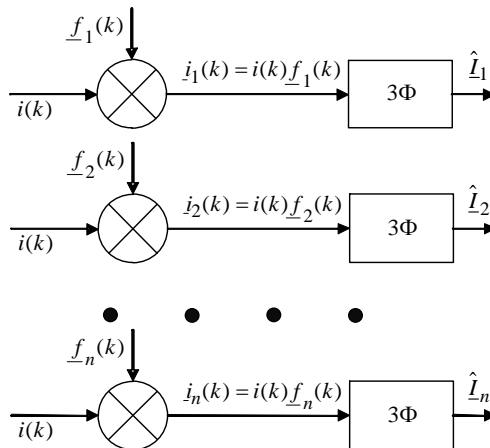


Рис. 5. Структура МФОС

Fig. 5. Structure of the multichannel orthogonal component filter

Очевидно, что для оценки уровня сигнала в диапазоне 40-80 Гц частоты опорных сигналов также должны находиться в этом диапазоне. Для микропроцессорных устройств РЗ (с постоянной частотой дискретизации f_s), частоты опорных сигналов удобно подбирать так, чтобы количество отсчетов на периоде наблюдения было целым ($N \in \mathbb{Z}$): $f_n = f_s / N$. Если рассматривать частоту дискретизации 2 кГц, то это частоты: $f_1 = 40$ Гц, $f_2 = 40,816$ Гц, $f_3 = 41,666$, ..., $f_n = 80$ Гц. В [8] предложен подход оценки действующего значения сигнала на основе метода максимального правдоподобия: $\hat{I} = \max_{\text{mod}} [\hat{I}_1, \hat{I}_2, \dots, \hat{I}_n]$. Интервальная АЧХ такого МФОС представлена на рис. 6 а.

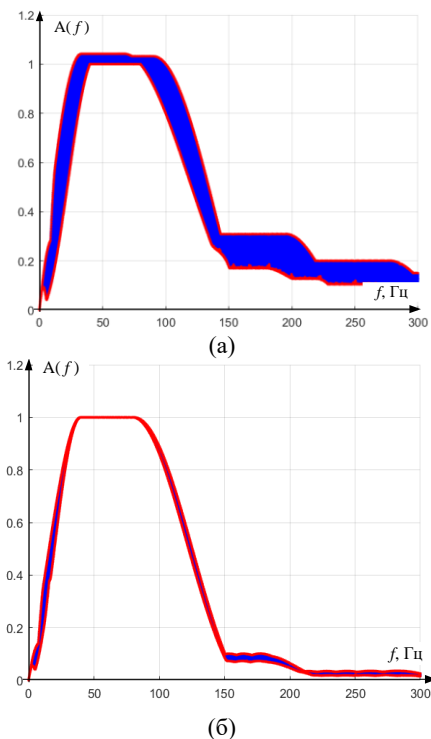


Рис. 6. Интервальная АЧХ МФОС (а),
интервальная АЧХ МФОС с дополнительным усреднением (б)

Fig. 6. Interval frequency response of the multichannel orthogonal component filter (a), interval frequency response of the multichannel orthogonal component filter with additional averaging (b)

Во всем диапазоне частот МФОС, использующий метод максимального правдоподобия, обладает методической погрешностью, которая, хоть и не превышает 4 %, но не соответствует требованию по обеспечению погрешности $\pm 2,5$ % при частоте 50 Гц. Если изменить алгоритм работы ЗФ каждого канала, реализовав в нем усреднение на окне наблюдения 30 мс, то методическая погрешность определения действующего значения при соответствии частот энергосистемы и опорного сигнала отсутствует, а погрешность во всем диапазоне частот 40-80 Гц не превышает 0,1 %. Интервальная АЧХ такого фильтра приведена на рис. 6б.

III. Выводы

Введено понятие интервальной амплитудно-частотной характеристики, с помощью которой удобно оценивать методическую погрешность определения действующего значения сигнала в условиях вариации частоты полезного сигнала. Выполнено исследование методических погрешностей оценки действующего значения электротехнического сигнала, которые дают различные фильтры в базисе интервальной амплитудно-частотной характеристики. Предложены способ определения действующего значения сигнала с использованием многоканального фильтра ортогонального составляющего, обеспечивающий точность оценки не более 0,1 % в диапазоне частот 40-80 Гц.

© Иванов С.В., 2025

Поступила в редакцию 19.08.2025

Принята к публикации 10.11.2025

Received 19.08.2025

Accepted 10.11.2025

Библиографический список

- [1] Типовые проектные решения при создании (модернизации) РЗА присоединений главных схем всех классов напряжения ГЭС. Типовые проектные решения ПАО «РусГидро». Раздел 1. Пояснительная записка. Часть 1. Технические требования к шкафам и микропроцессорным устройствам защиты и автоматики. 87-07-2015–РЗА.ТПР1.1, ПАО «РусГидро», 2024. – 60 с. [Электронный ресурс]. URL: storage.yandexcloud.net/storage.rushydro.ru/ (дата обращения 01.01.2025).
- [2] Лямец Ю.Я., Ильин В.А. Фильтры информационных составляющих тока и напряжения электрической сети // Известия Российской Академии Наук. Энергетика. 1995. № 3. С. 174-189.
- [3] Марпл-мл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: МИР, 1990. – 584 с.
- [4] Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. М.: Советское радио, 1980. – 112 с.
- [5] СТО 56947007-29.120.70.241-2017. Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА. Введ. 2017-02-28. ПАО «ФСК», 2017. – 179 с.
- [6] Чернобровов Н.В., Семенов В.А. Релейная защит энергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.

- [7] Иванов С.В. Информационный анализ фильтров ортогональных составляющих для задач релейной защиты. // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. № 5. С. 95-101.
- [8] Илюшин П.В., Куликов А.Л. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией. Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. – 364 с.

References

- [1] *Tipovye projektnye resheniya pri sozdanii (modernizacii) RZA prisoedinenij glavnykh skhem vseh klassov napryazheniya GES. Tipovye projektnye resheniya PAO "RusGidro". Razdel 1. Poyasnitel'naya zapiska. Chast' 1. Tekhnicheskie trebovaniya k shkafam i mikroprocessornym ustroystvam zashchity i avtomatiki. 87-07-2015–RZA.TPPI.1* [Standard design solutions for the creation (modernization) of relay protection and automation systems for connections of the main circuits of hydroelectric power plants of all voltage classes. Standard design solutions of PJSC RusHydro. Section 1. Explanatory note. Part 1. Technical requirements for cabinets and microprocessor-based protection and automation devices. 87-07-2015–P3A.TPPI.1], PJSC RusHydro, 2024. [Online]. Available at: storage.yandexcloud.net/storage.rushydro.ru/ [Accessed: Jan. 1, 2025] (in Russian).
- [2] Y.Y. Liams and V.A. Ilyin, "Fil'try informacionnykh sostavlyayushchih toka i napryazheniya elektricheskoy seti [Filters of information components of current and voltage of an electric network]", *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, no. 3, pp. 174-189, 1995 (in Russian).
- [3] S.L. Marple, Jr., *Digital spectral analysis with applications*. Baltimore, Maryland: Prentice-Hall, Inc., Engelwood Cliffs, New Jersey, 1987.
- [4] R.W. Hamming, *Digital filters*. Prentice-Hall, Inc., Engelwood Cliffs, New Jersey, 1977.
- [5] Technical requirements for microprocessor-based relay protection and automation devices, STO 56947007-29.120.70.241-2017, Feb. 2017.
- [6] N.V. Chernobrovov and V.A. Semenov, *Relejnaya zashchit energeticheskikh sistem [Relay protection of power systems]*. Moscow: Energoatomizdat, 1998 (in Russian).
- [7] S.V. Ivanov, "Information analysis of orthogonal components filter for relay protection tasks", *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power engineering*, no. 5, pp. 95-101, 2017.
- [8] P.V. Ilyshin and A.L. Kylikov, *Avtomatika upravleniya normal'nymi i avarijnymi rezhimami energorajonov s raspredelyonnoy generaciej [Control automation of normal and emergency mode of power systems with distributed generation]*. N. Novgorod: NIU RANHiGS [RANEPa], 2019 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Иванов Сергей Владимирович, кандидат технических наук, ведущий эксперт ООО «Релематика», г. Чебоксары, Российская Федерация.

Sergey V. I. Ivanov, Cand. Sci. (Eng.), lead Expert at the LLC «Relematika», Cheboksary, Russian Federation.

УДК 621.313.13+004.94

EDN ORLАНН

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АНСАМБЛЕВЫХ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ РЕЖИМА ЗАПУСКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

С.С. АверьяновORCID: 0009-0001-8468-1098 e-mail: sergey.s.averianov@gmail.comНовосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия**А.С. Трофимов**ORCID: 0000-0002-1557-9380 e-mail: a.trofimov@corp.nstu.ruНовосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия

Исследуется применение ансамблевых алгоритмов машинного обучения для классификации переходных процессов в системах релейной защиты с целью повышения их эффективности. Рассматриваются методы «*bagging*», «*boosting*» и «*stacking*» для решения задачи классификации данных, полученных из SCADA-систем и терминалов РЗ. Оценка точности классификации осуществляется с использованием метрик *Precision*, *Recall* и *F1-score*. Результаты экспериментов демонстрируют высокую точность работы ансамблевых алгоритмов при классификации переходных процессов, таких как пуск и самозапуск электродвигателей, на основе данных, полученных из моделей *Power Factory* и *Matlab Simulink*. Для дальнейших исследований предполагается анализ более сложных режимов пуска электродвигателей с целью улучшения точности классификации.

Ключевые слова: ансамблевые алгоритмы, классификация, машинное обучение, переходные процессы, релейная защита.

Для цитирования: Аверьянов С.С., Трофимов А.С. Сравнительный анализ ансамблевых алгоритмов машинного обучения для обнаружения режима запуска электродвигателя // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 4. С. 77-90. EDN ORLАНН

COMPARATIVE ANALYSIS OF ENSEMBLE MACHINE LEARNING ALGORITHMS FOR DETECTING THE STARTING MODE OF ELECTRIC MOTOR

S.S. Averyanov

ORCID: 0009-0001-8468-1098 e-mail: sergey.s.averyanov@gmail.com

Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russia

A.S. Trofimov

ORCID: 0000-0002-1557-9380 e-mail: a.trofimov@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russia

Abstract. The article explores the application of ensemble machine learning algorithms for classifying transients in relay protection systems in order to increase their efficiency. The methods of bagging, boosting and stacking for solving the problem of classifying data obtained from SCADA systems and RS terminals are considered. Classification accuracy is assessed using the Precision, Recall, and F1-score metrics. The experimental results demonstrate the high accuracy of the ensemble algorithms in classifying transient processes, such as starting and self-starting electric motors, based on data obtained from the Power Factory and Matlab Simulink models. For further research, it is planned to analyze more complex starting modes of electric motors in order to improve the classification accuracy.

Keywords: ensemble algorithms, classification, machine learning, transients, relay protection.

For citation: S.S Averyanov and A.S. Trofimov, “Comparative analysis of ensemble machine learning algorithms for detecting the starting mode of electric motor”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 77-90, 2025. EDN ORLAHH

I. Введение

В настоящее время прослеживается тенденция на развитие и применение технологий обработки больших данных и машинного обучения (МО) в различных отраслях науки и техники. Благодаря возможности анализа и обобщения больших объемов информации, появляется возможность усовершенствовать процесс принятия решений в различных отраслях на основе имеющихся статистических данных. Большие объемы статистических данных обрабатываются, в том числе в энергетических комплексах и системах, в частности в системах *Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)* в связке с терминалами релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автома-

тики (ПА). Современные SCADA серверы обладают достаточной производительностью для реализации на их основе новых подходов с использованием алгоритмов МО для организации логических органов РЗ. В качестве инновационного подхода может рассматриваться алгоритм классификации переходных процессов на основе МО, который позволит распознавать режим пуска двигателя, для снижения значения коэффициента отстройки от пуска (самозапуска) электродвигателей для максимальной токовой защиты за счет логического блокирующего органа, работающего в этом режиме.

Анализ современных отечественных и зарубежных исследований позволил выявить значительный научный интерес к применению методов МО в задачах релейной защиты. Проведенный обзор свидетельствует о перспективности данного направления.

В [1] демонстрируется эффективность ансамблевых алгоритмов МО для решения задачи селективного выявления коротких замыканий за трансформатором. Исследование [2] посвящено вопросам классификации режимов энергосистемы с применением алгоритма «случайный лес», где решалась задача определения оптимальных управляющих воздействий для предотвращения развития аварийных ситуаций. В [3] представлены результаты успешного применения ансамблевых методов для раннего обнаружения аварийных режимов на оборудовании электростанций. Особого внимания заслуживает исследование [4], в котором раздел посвящен классификации повреждений с использованием ансамблевых алгоритмов на модели, реализованной в *Matlab Simulink*, показавшей высокую точность классификации.

Вместе с тем, практическая реализация алгоритмов МО в контексте релейной защиты порождает комплекс актуальных вопросов, требующих дополнительного изучения. Среди них:

- 1) методология сбора и подготовки эксплуатационных данных для работы моделей после обучения;
- 2) организация информационного обмена между вычислительной системой и устройствами релейной защиты;
- 3) определение минимально достаточной частоты дискретизации измерительных устройств, обеспечивающей требуемое качество работы алгоритмов МО;
- 4) исследование возможности и разработка требований к алгоритмам для классификации переходных процессов в режиме реального времени.

Решение указанных задач представляется необходимым условием для успешной интеграции перспективных методов МО в практику релейной защиты.

Настоящая работа представляет собой развитие исследования алгоритмов МО для реализации логического органа классификации переходных

процессов с целью выявления процессов пуска и самозапуска электродвигателей для улучшения характеристик срабатывания максимальной токовой защиты. По результатам предыдущих исследований [5, 6] было установлено, что простейшие алгоритмы МО, представленные «деревом решений», « k -ближайших соседей» и «логистической регрессией» не обеспечивают требуемого уровня точности классификации. В этой связи актуальность представленной работы определяется необходимостью анализа и применения более совершенных алгоритмов МО для решения задачи классификации переходных процессов в электрических сетях. Целями данного исследования являются: разработка и реализация ансамблевых алгоритмов МО для классификации переходных процессов, оценка их точностных характеристик, а также выявление факторов, оказывающих влияние на качество классификации. Для достижения поставленных целей требуется решение следующего комплекса задач:

- подготовить математические модели участков электрической сети, включающих электродвигатели переменного тока, защита линии питания которых осуществляется благодаря максимальной токовой защите;
- сформировать выборки данных признаков для обучения алгоритмов МО;
- реализовать различные типы ансамблевых алгоритмов МО для решения задачи классификации переходных процессов и оценить их точность;
- изменив место и тип замыкания, оценить эффективность классификации в различных вариация аварийных режимов.

II. Структурная схема обмена информацией

Согласно современным стандартам, современные устройства релейной защиты и автоматики должны иметь интерфейсы связи. Одним из распространенных интерфейсов является МЭК 61850, который обеспечивает мгновенный обмен данными с сервером. Для реализации логического органа релейной защиты в основе которого лежат алгоритмы МО возможно рассмотреть использование существующей связи терминалов РЗ и SCADA систем для реализации вычислений на их базе (рис. 1). При проектировании цифровых подстанций для передачи сигналов мгновенных значений токов и напряжений применяется протокол МЭК 61850-9-2 (*Sampled Values, SV*). В соответствии с требованиями стандарта МЭК 61869-9 [7], частота дискретизации *SV*-потока может принимать следующие значения:

- 4800 Гц с числом выборок в кадре 2, номинальной частотой сообщений цифрового выхода 2400 кадр/секунд;
- 12800 Гц в формате «*Format 2 (FT2)*», используемом в дифференциальной защите трансформаторов и при оценке качества электроэнергии.

В случае наличия в составе ячейки электромеханических устройств релейной защиты для сбора данных требуется установка блока слияния

(*Merging Unit, MU*). Данное устройство подключается к вторичным цепям трансформаторов тока и напряжения, а также синхронизируется от источника точного времени (*GPS/GLONASS*). Функциональным назначением *MU* является формирование и *multicast*-ретрансляция *SV*-потока в соответствии со стандартом МЭК 61850-9-2 с частотами дискретизации, регламентированными стандартом МЭК 61869-9.

Ансамблевые алгоритмы МО представляют собой класс статистических методов. В процессе своего функционирования они оперируют статистическими метриками, такими как среднее значение, стандартное отклонение, экстремумы и медиана, а также частотными характеристиками, получаемыми посредством быстрого преобразования Фурье (БПФ).

В рамках данной исследовательской методологии рассматривается поток данных с частотой дискретизации 4800 Гц. Данные передаются структурированными кадрами, каждый из которых содержит по два последовательных отсчета измеряемого сигнала. Таким образом, частота обновления информационных кадров составляет 2400 Гц.

Такая схема передачи и упаковки данных обеспечивает репрезентативность выборки и сохранение необходимых частотных характеристик сигнала вплоть до 2400 Гц (в соответствии с теоремой Котельникова [8]), что является достаточным для последующего эффективного обучения моделей МО и решения задач классификации, регрессии или обнаружения аномалий в электроэнергетических системах.

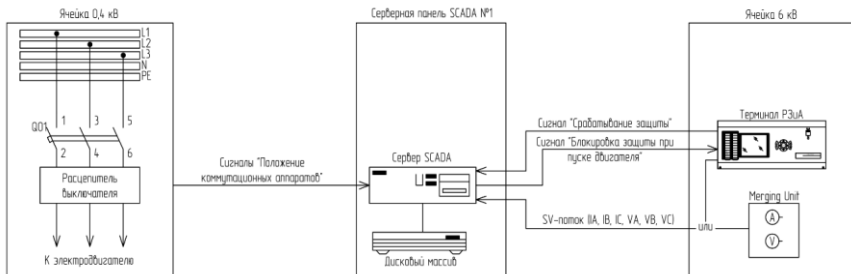


Рис. 1. Структурная схема обмена информацией между SCADA сервером и терминалом РЗ

Fig. 1. Structural diagram of information exchange between the SCADA server and the protection terminal

Алгоритмы МО, решающие задачу классификации переходных процессов, являются расчетными, т.е. для их реализации не требуется использование графического процессора. Сравнительный анализ системных требований производителей SCADA систем [9, 10] показал, что мощностные характеристики современных SCADA серверов полностью удовлетворяют системным требованиям для реализации алгоритмов обработки больших данных и МО.

Дообучение алгоритмов классификации в процессе работы требует корректной идентификации режимов эксплуатации электрооборудования, при формировании размеченных датасетов необходима интеграции объективных источников телеметрии, верифицирующих классифицируемые события. К числу таких источников относятся:

- сигналы состояния коммутационных аппаратов (включено/отключено) с временными метками;
- триггеры срабатывания защитных устройств с фиксацией времени и типа повреждения.

Указанные данные позволяют установить однозначное соответствие между наблюдаемыми переходными процессами и эксплуатационными режимами, что является критически важным для построения репрезентативных моделей МО.

III. Методология ансамблевых алгоритмов машинного обучения

Ансамблевые алгоритмы (*bagging*, *boosting*, *stacking* и др.) представляют собой методологию построения метамоделей, основанную на агрегировании решений множества базовых классификаторов. Их ключевое преимущество заключается в том, что они позволяют компенсировать слабые стороны отдельных алгоритмов, таких как деревья решений, логистическая регрессия и метод k -ближайших соседей (k -NN). Преимуществами ансамблевых алгоритмов являются:

1. Снижение обобщающей ошибки.

Метод «*Bagging*» (например, «Случайный лес») уменьшает дисперсию модели за счет усреднения прогнозов множества независимых классификаторов, обученных на бутстрапированных выборках. Это повышает устойчивость алгоритма к переобучению, которое характерно для отдельных деревьев решений.

Метод *Boosting* (например, *Gradient Boosting*, *XGBoost*, *LightGBM*) снижает смещение путем итеративного построения последовательности слабых моделей, каждая из которых обучается на ошибках предшествующих. Такой подход особенно эффективен в задачах, где логистическая регрессия оказывается слишком «жесткой» в предположениях о линейности границы раздела.

2. Робастность к шуму и выбросам.

В отличие от метода k -NN, который чувствителен к локальным шумам в данных, ансамблевые методы (особенно «Boosting») способны смещать внимание модели в сторону более сложных областей пространства признаков, тем самым обеспечивая большую устойчивость.

3. Использование гетерогенных моделей.

Стратегия «Stacking» позволяет комбинировать алгоритмы разной природы (например, деревья решений, логистическую регрессию и k -NN), что повышает аппроксимирующую способность системы и позволяет моделировать более сложные закономерности, чем отдельные классификаторы.

4. Улучшение баланса между смещением и дисперсией.

Отдельные модели, как правило, обладают либо высоким смещением (логистическая регрессия), либо высокой дисперсией (деревья решений). Ансамбли позволяют более эффективно находить компромисс между этими характеристиками, что обеспечивает лучшие результаты классификации на разнообразных наборах данных.

Ансамблевые алгоритмы МО в сравнении с технологией искусственных нейронных сетей обладают более простой интерпретируемостью, что снижает требования к наладчику программного обеспечения. Исходя из вышесказанного, ансамблевые алгоритмы требуют рассмотрения для решения задачи классификации переходных процессов с целью выделения режима пуска двигателя из выборки данных мгновенных значений токов и напряжений.

Описанные выше методы ансамблевых алгоритмов МО реализовываются на базе языка программирования *Python* с использованием специализированной библиотеки «*Scikit learn*». Ознакомится с математическим аппаратом и функциями, реализованными в библиотеке каждого из методов можно в [11, 12]. Структурные схемы алгоритмов подробно описаны в [13].

Оценка точности результатов классификации полученных в результате работы ансамблевых алгоритмов реализуется с помощью метрик «*Accuracy*», «*Precision*», «*Recall*». Дополнительно следует рассмотреть метрику «*f1-score*»:

$$f1-score = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}. \quad (1)$$

Метрика *Precision* необходима для оценки вероятности ошибки второго рода «излишнее срабатывание». Метрика *Recall* служит для выявления ошибок первого рода «отказ в срабатывании». С точки зрения РЗ обе ошибки являются критическими, влияющими на надежность системы. С этой целью рассматривается дополнительная метрика «*f1-score*», которая показывает степень баланса по двум вышеописанным метрикам.

В. Исходные данные

Для получения выборки данных мгновенных значений токов и напряжений использовались две модели сформированных с помощью программного комплекса математического моделирования: *Matlab Simulink* и *Power Factory* согласно однолинейной схеме (рис. 2).

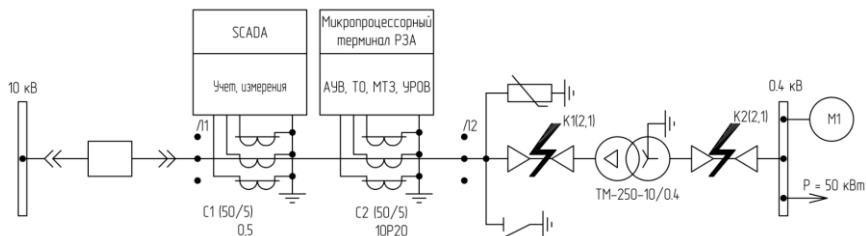


Рис. 2. Однолинейная схема ячейки 10 кВ ввода на секцию 0,4 кВ

Fig. 2. Single-line diagram of a 10 kV input cell for a 0.4 kV section

Разработана математическая модель системы электроснабжения, включающая ячейку ввода 10 кВ и присоединенную секцию 0,4 кВ. Структура нагрузки секции комбинированная: постоянная активная составляющая дополнена двигательной нагрузкой в виде асинхронного электродвигателя номинальной мощностью 40 кВт.

Локализация двигательной нагрузки на стороне 0,4 кВ обусловлена необходимостью корректного моделирования трансформации токовых характеристик через силовой трансформатор. Такой подход служит методологической основой для дальнейшего экстраполирования алгоритмов классификации переходных процессов на электроустановки более высоких классов напряжений.

Номинальная мощность двигательной нагрузки была выбрана таким образом, чтобы минимизировать амплитуду пускового тока. Токи короткого замыкания (в том числе замыкания на землю) были снижены на два порядка для минимизации разницы амплитудных значений с процессом пуска двигателя. Мощность электродвигателя выбрана с учетом минимизации разницы амплитудных значений с постоянной нагрузкой.

Для регистрации мгновенных значений токов и напряжений переходных процессов в моделировании используется измерительный орган, интегрированный в цепь трансформаторов тока ячейки 10 кВ.

Моделирование предусматривает последовательную коммутацию двигательной нагрузки и создание точки короткого замыкания с целью возбуждения переходных процессов. Параметры сбора данных установлены

следующим образом: частота дискретизации – 2,4 кГц, длительность реализации – 2,4 с. Ограничение указанных параметров введено для оптимизации вычислительных затрат на этапе постобработки данных. Выбор объема выборки обоснован в работе [4].

Формирование выборки данных осуществляется в последовательности, заданной в табл. 1. Полученная выборка соответствует осциллограмме (рис. 3). Сама выборка представляет собой массив мгновенных значений токов и напряжений по трем фазам. Для использования набора данных в задачах обучения с учителем ему присвоены метки классов. В отдельном столбце «*Target*» осуществляется категоризация типа переходного процесса для каждого временного отсчета, согласно следующей кодировке: 1 – Нормальный режим (НР); 2 – Пуск двигательной нагрузки (П); 3 – Короткое замыкание (на землю) (КЗ).

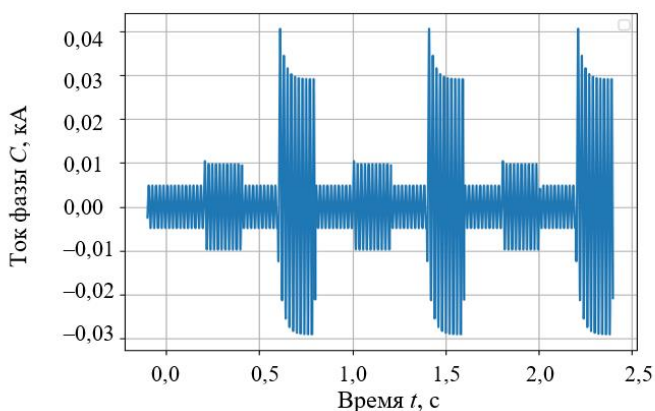


Рис. 3. Осциллограмма порядка коммутаций при рассмотрении двухфазного КЗ в точке 2

Fig. 3. An oscillogram of the switching order when considering a two-phase short circuit at point 2

Таблица 1.
Таблица порядка коммутаций

Table 1.
Switching order table

Время, с	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1	1-1,2	1,2-1,4
Процесс	НР	П	НР	КЗ	НР	П	НР
Время, с	1,4-1,6	1,6-1,8	1,8-2	2-2,2	2,2-2,4		
Процесс	КЗ	НР	П	НР	КЗ		

V. Результаты

При реализации описанных методов возникла проблема низкого качества классификации без учета структуры данных выборки. Оно обособлено методами деления данных для обучения. Зачастую алгоритмы используют процессы кросс-валидации, где происходит перемешивание выборки для исключения ложных закономерностей. Однако «сырые» мгновенные значения (I_A , I_B , I_C , U_A , U_B , U_C) малоинформативны. На один момент времени приходится всего 6 чисел – этого недостаточно, чтобы точно определить режим («нормальный», «запуск», «аварийный»). В то же время классы отличаются по динамике сигналов. В «нормальном режиме» токи и напряжения стабильные. В «запуске двигателя» появляются характерные всплески токов. В «аварии» могут быть сильные выбросы, перекосы фаз и т.д. Эти особенности проявляются только на отрезке времени, а не в одной точке. Для решения задачи классификации временных рядов следует применить метод «Скользящего окна» [14]. Метод позволяет использовать в качестве признаков последовательности, выбранные из временного ряда. Для данного метода необходимо задать два параметра: число точек и шаг. Число точек связано с частотой дискретизации и особенностью входных данных, а шаг «окна» равен половине от количества точек. Таким образом, рассматриваемое окно должно охватить один период промышленной частоты, т.е. при частоте дискретизации равной 2,4 кГц число точек составит 48, а шаг окна составит 24 точки. Результаты классификации с использованием метода «Скользящего окна» над выборкой, полученной при двухфазном коротком замыкании в точке К2 представлены в табл. 2, где указаны безразмерные величины метрик оценки точности модели для искомых классов. Целевым классом для выявления является класс 1 – пуск двигателя.

Согласно результатам моделирования, наибольшую точность классификации показывают ансамблевые алгоритмы с использованием данных, полученных в *Power Factory*. Все алгоритмы ансамблевой классификации обучались и опробовались на выборке полученных в точках К3 указанных на рис. 2. Причиной высокой точности алгоритма могла стать переобученность модели, так как рассматривался один тип К3 в одной выборке данных. Для подтверждения или опровержения точности работы ансамблевых алгоритмов классификации необходимо объединить выборки с К3 К2⁽²⁾, К2⁽¹⁾ и К1⁽²⁾, К1⁽¹⁾. Результаты моделирования представлены в табл. 3.

Таблица 2.

Результаты классификации с использованием метода «Скользящего окна»

Table 2.

Classification results using the Sliding Window method

K2⁽²⁾	Matlab Simulink			Power Factory		
	Bagging	Boosting	Stacking	Bagging	Boosting	Stacking
<i>Precision</i> (класс 0)	0,832	0,893	0,830	0,994	0,975	0,991
Precision (класс 1)	0,823	0,878	0,830	0,991	0,947	0,991
<i>Precision</i> (класс 2)	0,887	0,806	0,991	0,997	0,994	0,988
<i>Recall</i> (класс 0)	0,901	0,806	0,900	0,989	0,975	0,985
Recall (класс 1)	0,695	0,837	0,873	0,984	0,947	0,992
<i>Recall</i> (класс 2)	0,884	0,923	0,885	0,992	0,994	0,995
<i>F1-score</i> (класс 0)	0,865	0,847	0,865	0,991	0,975	0,986
F1-score (класс 1)	0,853	0,857	0,903	0,986	0,947	0,990
<i>F1-score</i> (класс 2)	0,882	0,800	0,932	0,993	0,994	0,991
K2⁽¹⁾						
F1-score (класс 1)	0,833	0,842	0,873	0,995	0,947	0,993
<i>F1-score</i> (класс 2)	0,892	0,828	0,997	0,996	0,998	0,999
K1⁽²⁾						
F1-score (класс 1)	0,801	0,927	0,855	0,992	0,975	0,991
<i>F1-score</i> (класс 2)	0,842	0,867	0,995	0,985	0,989	0,983
K1⁽¹⁾						
F1-score (класс 1)	0,812	0,924	0,899	0,987	0,954	0,982
<i>F1-score</i> (класс 2)	0,878	0,786	0,872	0,992	0,989	0,988

Таблица 3.

Результаты классификации для объединенных выборок

Table 3.

Classification results for combined samples

K2⁽²⁾ и K2⁽¹⁾	Matlab Simulink			Power Factory		
	Bagging	Boosting	Stacking	Bagging	Boosting	Stacking
F1-score (класс 1)	0,853	0,857	0,908	0,994	0,973	0,992
<i>F1-score</i> (класс 2)	0,892	0,901	0,932	0,984	0,960	0,981
K1⁽²⁾ и K1⁽¹⁾						
F1-score (класс 1)	0,851	0,962	0,874	0,989	0,969	0,994
<i>F1-score</i> (класс 2)	0,881	0,875	0,992	0,995	0,986	0,991

VI. Заключение

Ансамблевые алгоритмы для решения задачи классификации с последующим выделением режима пуска двигателя показали достаточно высокую точность. При этом время, затраченное на алгоритм классификации,

составляет не более 0,004 секунды в расчете использования вычислительной мощности сравнимой со SCADA сервером. Ансамблевые алгоритмы демонстрируют высокую эффективность при условии, что модель не предполагается дообучать в процессе эксплуатации. Однако расширение ансамблевых методов механизмами инкрементального обучения сопровождается рядом существенных рисков. В частности, при длительном поступлении данных, относящихся преимущественно к одному классу, возникает эффект дрейфа: модель адаптируется к текущему распределению и утрачивает способность корректно распознавать ранее встречавшиеся сценарии. Дополнительной проблемой является повышенная чувствительность к шумовым компонентам входных сигналов, особенно при отсутствии предварительной фильтрации, что требует применения инкрементальных методов нормализации и стабилизации параметров. Совокупность указанных мер приводит к увеличению вычислительных затрат и времени обработки данных. В связи с этим, дальнейшие исследования методов классификации переходных процессов целесообразно ориентировать на изучение нейросетевых архитектур с механизмами долговременной памяти.

© Аверьянов С.С., 2025

© Трофимов А.С., 2025

Поступила в редакцию 22.10.2025

Принята к публикации 24.11.2025

Received 22.10.2025

Accepted 24.11.2025

Библиографический список

- [1] Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Бездушный Д.И. Повышение распознаваемости аварийных режимов релейной защитой методами деревьев решений // *Электричество*. 2023. № 7. С. 20-34. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-7-20-34
- [2] Осак А.Б., Ефимов Д.Н., Жуков А.В., Панасецкий Д.А., Курбацкий В.Г., Сидоров Д.Н., Томин Н.В., Воропай Н.И. Комплекс интеллектуальных средств раннего выявления и предотвращения возникновения системных аварий в энергообъединениях // *Автоматика и телемеханика*. 2018. № 10. С. 6-25. DOI: 10.31857/S000523100001845-3
- [3] Коршикова А.А, Трофимов А.Г. Модель раннего обнаружения аварийных ситуаций на оборудовании электростанций на основе методов машинного обучения // *Теплоэнергетика*. 2019. № 3. С. 49-56. DOI: 10.1134/S0040363619030044
- [4] Najafzadeh M., Pouladi J., Daghigh A, Beiza J., Abedinzade T. Fault detection, classification and localization along the power grid line using optimized machine learning algorithms // *International Journal of Computational Intelligence Systems*. 2024. Vol. 17. Art. no. 49. DOI: 10.1007/s44196-024-00434-7

- [5] Averyanov S., Trofimov A. Analysing non-ensemble machine learning methods for solving the transient classification problem // 2025 IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai, Russian Federation, 2025. Pp. 1100-1105. DOI: 10.1109/EDM65517.2025.11096849.
- [6] Аверьянов С.С., Трофимов А.С. Анализ факторов, влияющих на интеллектуальный алгоритм классификации переходных процессов и надежность устройств релейной защиты // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы конференции. Иркутск. 2025. №. 76. С. 794-803.
- [7] ГОСТ Р МЭК 61869-9-2025. Трансформаторы измерительные. Часть 9. Цифровой интерфейс для измерительных трансформаторов (преобразователей). Введ. 2025-12-01. М.: Российский институт стандартизации, 2025.
- [8] Котельников В.А. О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 7. С. 762-770.
- [9] ОИК «Систел». Сервер «SCADA». Программа для ЭВМ «ОИК «СИСТЕЛ». Сервер «SCADA». Руководство администратора. 2024. – 11 с.
- [10] Выбор сервера для искусственного интеллекта: основные критерии и рекомендации // Serverflow. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.serverflow.ru> (дата обращения: 18.09.2025).
- [11] Елистратова Е., Губко П. Ансамбли в машинном обучении // Yandex Education. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.education.yandex.ru> (дата обращения: 23.09.2025).
- [12] Ensemble-based methods for classification, regression and anomaly detection // scikit-learn. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.scikit-learn.org> (дата обращения: 23.09.2025).
- [13] Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction. New York: Springer, 2009. – p. 745.
- [14] McKinney W. Python for data analysis. Sebastopol: O'Reilly Media, 2013. – p. 450.

References

- [1] A.L. Kulikov, A.A. Loskutov and D.I. Bezduzhnyj, “Improving the recognizability of emergency modes by relay protection using decision tree methods”, *Elektrichestvo*, pp. 20-34, np. 7, 2023. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-7-20-34
- [2] A.B. Osak, D.N. Efimov, A.V. Zhukov, D.A. Panasetiskij, V.G. Kurbatskij, D.N. Sidorov, N.V. Tomin and N.I. Voropai, “A suite of intelligent tools for early detection and prevention of blackouts in power interconnections”, *Avtomatika i telemekhanika*, no. 8, pp. 6-25, 2018. DOI: 10.31857/S000523100001845-3
- [3] A.A. Korshikova and A.G. Trofimov, “Model for early detection of emergency conditions in power plant equipment based on machine learning methods”, *Teploenergetika*, no. 3, pp. 49-56, 2019. DOI: 10.1134/S0040363619030044).
- [4] M. Najafzadeh, J. Pouladi, A. Daghigh, J. Beiza and T. Abedinzade, “Fault detection, classification and localization along the power grid line using optimized machine learning algorithms”, *International Journal of Computational Intelligence Systems*, vol. 17, art. no. 49, 2024. DOI: 10.1007/s44196-024-00434-7.

- [5] S. Averyanov and A. Trofimov, “Analysing non-ensemble machine learning methods for solving the transient classification problem”, in *proc. 2025 IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, Altai, Russia, 2025, pp. 1100-1105. DOI: 10.1109/EDM65517.2025.11096849
- [6] S.S. Averyanov and A.S. Trofimov, “Analiz faktorov, vliyayushchikh na intellektual'nyj algoritm klassifikatsii perekhodnykh processov i nadezhnost' ustroystv relejnoj zashchity [Analysis of factors affecting the intelligent algorithm for transient classification and reliability of relay protection devices]”, in *proc. Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki*, Irkutsk, no. 76, pp. 794-803, 2025 (in Russian).
- [7] Instrument transformers. Part 9. Digital interface for instrument transformers, GOST R IEC 61869-9—2025, Jan. 2025.
- [8] V.A. Kotel'nikov, “O propuskoy sposobе efira i provoloki v elektrosvyazi [On the transmission capacity of "ether" and wire in telecommunications]”, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, vol. 176, no. 7, pp. 762-770, 2006 (in Russian).
- [9] OIK "Sistel". Server "SCADA". Programma dlya EVM "OIK "SISTEL". Server "SCADA". Rukovodstvo administratora [OIC "Sistel". SCADA Server. Computer program "OIC "SISTEL". SCADA Server. Administrator's guide], 2024 (in Russian).
- [10] Vybor servera dlya iskusstvennogo intellekta: osnovnye kriterii i rekomendatsii [Choosing a server for artificial intelligence: main criteria and recommendations], Serverflow. [Online]. Available at: <https://www.serverflow.ru> [Accessed: Sept. 18, 2025] (in Russian).
- [11] E. Elistratova and P. Gubko, “Ansambli v mashinnom obuchenii [Ensembles in machine learning]”, Yandex Education. [Online]. Available at: <https://www.education.yandex.ru> [Accessed: Sept. 23, 2025] (in Russian).
- [12] Ensemble-based methods for classification, regression and anomaly detection scikit-learn. [Online]. Available at: <https://www.scikit-learn.org> [Accessed: Sept. 23, 2025]
- [13] T. Hastie, R. Tibshirani and J. Friedman, *New The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction*. New York: Springer, 2009.
- [14] W. McKinney, *Python for data analysis*. Sebastopol: O'Reilly Media, 2013.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Аверьянов Сергей Сергеевич, аспирант Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Российская Федерация.

Sergey S. Averyanov, postgraduate student of the Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation.

Трофимов Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Российская Федерация.

Andrey S. Trofimov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation.

УДК 621.311

EDN SOEBPU

КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПРИ НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ПИТАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

А.В. Крюков

ORCID: 0000-0001-6543-1790 e-mail: and_kryukov@mail.ru

Иркутский государственный университет путей сообщения

*Иркутск, Россия***К.В. Суслов**

ORCID: 0000-0003-0484-2857 e-mail: dr.souslov@yandex.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия***И.С. Овечкин**

ORCID: 0009-0006-4639-1504 e-mail: iliaov2015@mail.ru

Иркутский государственный университет путей сообщения

Иркутск, Россия

Определена эффективность использования неполнофазных режимов работы питающей сети для повышения надежности электроснабжения нетяговых потребителей магистральных железных дорог, для чего были разработаны компьютерные модели в фазных координатах. На основе результатов моделирования выполнен анализ показателей качества электроэнергии (ПКЭ) на шинах 0,4 кВ подстанций, к которым были подключены электроприемники объектов сигнализации, централизации и автоблокировки (СЦБ).

Для формирования моделей применялись методы и алгоритмы мультифазного моделирования электроэнергетических систем в фазных координатах, реализованные в программном комплексе *Fazonord AC-DC*. Разработанные модели обеспечивают корректный учет факторов, определяющих ПКЭ, включая трехфазно-однофазную структуру рассматриваемой системы электроснабжения и повышенные электромагнитные влияния тяговой сети (ТС). В отличие от известных подходов, осуществлялось моделирование динамики изменений ПКЭ, вызванных вариациями тяговых нагрузок при движении поездов.

Приведены результаты расчета ПКЭ на шинах 0,4 кВ, к которым подключаются электроприемники СЦБ, при обрывах фаз в питающей ЛЭП 110 кВ и в режиме «две фазы – земля». Показана эффективность использования пофазно управляемых источников реактивной мощности и активных фильтров гармоник для повышения качества электроэнергии по отклонениям напряжения, несимметрии и несинусои-

дальности Разработанные модели могут применяться на практике для выбора рациональных мероприятий по улучшению ПКЭ на зажимах ответственных электроприемников СЦБ, относящихся к особой группе по бесперебойности электроснабжения. Предложенный подход является универсальным и может применяться для типовых систем тягового электроснабжения, а также перспективных ТС повышенного напряжения.

Ключевые слова: качество электроэнергии, моделирование, неполнофазные режимы, нетяговые потребители.

Для цитирования: Крюков А.В., Суслов К.В., Овечкин И.С. Комплексное моделирование систем электроснабжения нетяговых потребителей при неполнофазных режимах работы питающей электрической сети // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 4. С. 91-105. EDN SOEBPU

COMPREHENSIVE MODELING OF ELECTRICITY SUPPLY SYSTEMS FOR NON-TRACTION CONSUMERS IN OUT-OF-PHASE ELECTRIC NETWORK OPERATION MODES

A.V. Kryukov

ORCID: 0000-0001-6543-1790 e-mail: and_kryukov@mail.ru

Irkutsk State Transport University

Irkutsk, Russia

K.V. Suslov

ORCID: 0000-0003-0484-2857 e-mail: dr.souslov@yandex.ru

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

Moscow, Russia

I.S. Ovechkin

ORCID: 0009-0006-4639-1504 e-mail: iliaov2015@mail.ru

Irkutsk State Transport University

Irkutsk, Russia

Abstract. This article presents the development of computer models for identifying open-phase conditions in high-voltage traction networks. The models, created using multiphase modeling algorithms in the Fazonord AC-DC environment, facilitated an analysis of power quality (PQ) on 0.4 kV of substations buses supplying critical signaling and automation systems. A key advantage of the proposed models is their accurate incorporation of system-specific factors, including its mixed three-phase/single-phase configuration and the pronounced electromagnetic impact of the traction network. Furthermore, the models uniquely capture the dynamic variation of PQ indicators driven by fluctuating traction loads. Simulation results for scenarios involving 110 kV phase failures and the mode of

using the earth as a return wire are presented. The study demonstrates the effectiveness of controlled reactive power sources and active filters in improving PQ parameters related to voltage deviation, unbalance, and harmonics. These models are intended for practical application in devising strategies to ensure PQ for specially categorized loads requiring uninterrupted power. The approach is universal, applicable to both conventional and prospective traction power systems.

Keywords: power quality, modeling, open-phase modes, non-traction consumers.

For citation: A.V. Kryukov, K.V. Suslov and I.S. Ovechkin, “Comprehensive modeling of electricity supply systems for non-traction consumers in out-of-phase electric network operation modes”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 91-105, 2025. EDN SOEBPU

I. Введение

Для эффективного функционирования железнодорожного транспорта необходимо надежное электроснабжение тяги поездов и объектов инфраструктуры, обеспечивающее нормативные показатели качества электроэнергии [1]. Особенно это важно для объектов сигнализации, централизации и автоблокировки (СЦБ), от которых зависит безопасность движения. В целях ускоренного восстановления питания тяговых подстанций (ТП) в послеаварийных ситуациях можно применять неполнофазные схемы работы ЛЭП или режимы «две фазы – земля» (ДФЗ) [2].

В условиях масштабного использования средств цифровизации транспортной электроэнергетики для практической реализации данного подхода должны использоваться результаты компьютерного моделирования, что требует разработки адекватных методов и моделей. Ниже представлены результаты исследований, направленных на решение этой задачи.

II. Анализ публикаций по теме исследования

Решению задач повышения надежности систем электроснабжения (СЭС) и улучшения качества электроэнергии посвящено большое число работ. Так, например, система аварийного управления СЭС с принятием решений в режиме реального времени описана в [3]. Широкий спектр устройств мониторинга ЛЭП, которые могут быть использованы при нормальном функционировании или во время аварийного состояния электроэнергетической системы (ЭЭС), рассмотрен в [4].

Вопросы влияния перегрузок ЛЭП на надежность электрической сети и износ проводов рассмотрены в [5]. Методы оценки надежности ЭЭС с использованием алгоритмов Монте-Карло предложены в [6]. Вероятностный подход к моделированию, в котором применяется двухцелевая функция оптимизации для минимизации износа сети и максимизации ее надежности за счет использования доступной реакции на спрос, описан в [7].

Задача минимизации нежелательного взаимодействия устройств

FACTS решена в [8]. Система идентификации повреждений ЛЭП распределительных электрических сетей описана в [9]. Авторами показано, что для повышения эффективности ликвидации аварий могут применяться средства их выявления, позволяющие сократить время поиска причины и места возникновения повреждения до минимума.

Анализ ремонтных и послеаварийных режимов работы распределительных сетей напряжением 110-220 кВ с учетом действия противоаварийной автоматики выполнен в [10]. Инновационная система диагностики неисправностей и самовосстановления распределительной сети, в основе которой лежит ансамблевое обучение, предложена в [11]. Его основная цель заключается в значительном повышении точности идентификации неисправностей и способности системы немедленно реагировать на чрезвычайные ситуации.

Новая система автоматики, исключая аварийное отключение активных потребителей при аварийном переводе ЭЭС на изолированный режим работы, рассмотрена в [12]. Модель быстрого прогнозирования стратегий управления аварийными ситуациями на основе глубокого обучения с подкреплением разработана в [13]. Стратегия, которая позволяет восстановить все критические нагрузки при масштабном отключении электроэнергии после стихийного бедствия или аварии, представлена в [14].

Алгоритм построения всех возможных деревьев, содержащихся в графе электрической сети, предложен в [15]. Он позволяет определить оптимальную конфигурацию, которая может быть использована для решения целого ряда практических задач. Структура системы электроснабжения для бесперебойной работы потребителей описана в [16]. В ней применяются инверторы, которые позволяют регулировать показатели качества электроэнергии (ПКЭ).

Вопросы применения суперконденсаторных систем накопления энергии для резервирования мощности в аварийных режимах работы рассмотрены в [17]. Метод принятия решений на основе искусственного интеллекта для интеграции магистральных и распределительных электросетей представлен в [18]. Он позволяет проводить анализ безопасности, составлять план реагирования на чрезвычайные ситуации, устранять или уменьшать перегрузки оборудования. Задача учета результатов анализа переходных процессов в вероятностных расчетах надежности электроснабжения промышленных потребителей решена в [19].

Способы повышения надежности электроснабжения потребителей собственных нужд (СН) ТП рассмотрены в [20]. Предложены схемы резервирования СН от трансформатора и дизель генераторного агрегата. Вопросы применения технологий активно-адаптивных сетей для управления режимами ЭЭС с тяговой нагрузкой рассмотрены в [21]. Для улучшения

ПКЭ предлагается использовать аккумулирование энергии, распределенную генерацию, а также FACTS-технологии.

Задача обеспечения электромагнитной совместимости тяговых и не-тяговых потребителей решена в [22]. Оценена энергетическая эффективность и качество электроэнергии в питающей электрической сети. Синергетические преимущества комбинированной системы учета ПКЭ, которая охватывает обширную географическую территорию, выявлены в [23].

Глобальные экономические потери из-за низкого качества электроэнергии рассмотрены в [24]. Показано, что бизнес-риски, связанные с проблемами качества электроэнергии, могут вызывать серьезные финансовые потери. Распределенная система мониторинга ПКЭ, позволяющая анализировать процессы в установившихся и нестационарных состояниях, представлена в [25]. Приведены результаты статистического анализа, демонстрирующие характеристики системы при различной частоте возникновения нарушений.

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных проблеме повышения надежности СЭС и улучшения качества электроэнергии, задача использования в системах электроснабжения железных дорог неполнофазных схем работы (НФСР) питающих ЛЭП и режимов «две фазы – земля» осталась не решенной. Для практического использования таких режимов особенно важна оценка их влияния на качество электроэнергии в узлах подключения электроприемников СЦБ, от надежного и правильного функционирования которых зависит безопасность движения поездов.

На современном этапе развития электроэнергетики транспорта решения об использовании НФСР и ДФЗ должны приниматься на основе компьютерного моделирования. Оптимальные модели для определения таких режимов целесообразно разрабатывать посредством реализации методологии многофазного моделирования энергетических систем, представленной в [26, 27], с использованием специализированного программного обеспечения *Fazonord AC-DC*.

III. Методика и результаты моделирования

Ниже представлены результаты определения сложно несимметричных и несинусоидальных режимов СЭС, схема которой показана на рис. 1. В программном комплексе *Fazonord AC-DC* [26, 27] осуществлялось моделирование следующих режимов: полнофазного исходного, НФСР и ДФЗ. Геометрия сечений ЛЭП 110 кВ и тяговой сети (ТС) 25 кВ представлена на рис. 2.

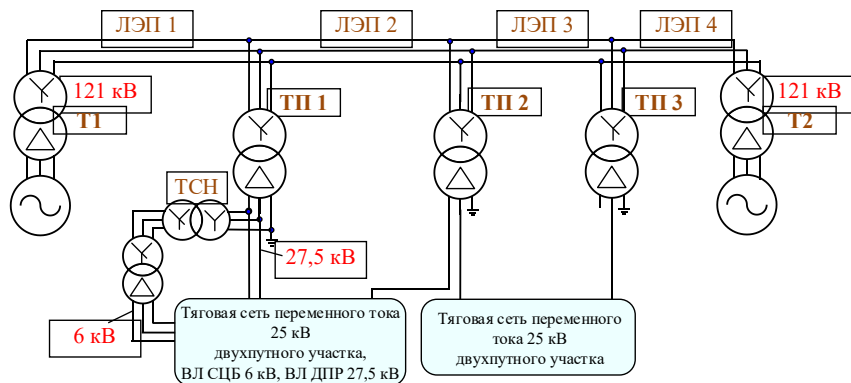
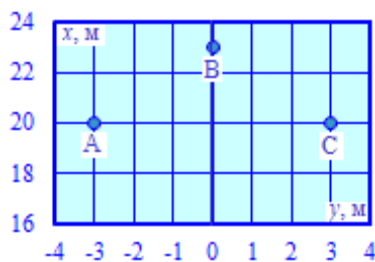
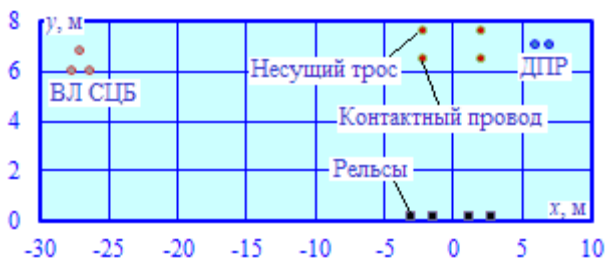


Рис. 1. Схема системы электроснабжения

Fig. 1. Electrical power supply system diagram



а)



б)

Рис. 2. Расположение токоведущих частей:

а – ЛЭП 110 кВ; б – контактной сети

Fig. 2. Location of current-carrying parts:

а – 110 kV power transmission lines; б – contact network

Кроме того, определялись параметры режимов при использовании средств улучшения ПКЭ: пофазно управляемых источников реактивной мощности (ИРМ) и активных фильтров высших гармоник (АФГ). Указанные устройства подключались на шинах 0,4 кВ комплектных трансформаторных подстанций (КТП), присоединенных к воздушной линии (ВЛ) СЦБ 6 кВ и ЛЭП 25 кВ, реализованной по схеме «два провода – рельс» (ДПР).

Моделируемая энергетическая инфраструктура железнодорожного комплекса содержала следующую совокупность оборудования: трансформаторы 125 МВ·А; ЛЭП 110 кВ со сталеалюминевыми проводами АС-185; три ТП с трансформаторами 40 МВ·А; два участка ТС протяженностью в 50 км. В моделях ТС левой межподстанционной зоны были учтены восемь комплектных трансформаторных подстанций (КТП), предназначенных для электроснабжения нетяговых потребителей. Четыре КТП с трансформаторами мощностью в 1000 кВ·А подключались к воздушной линии (ВЛ) СЦБ, остальные КТП присоединялись к ЛЭП 25 кВ, выполненной по схеме «два провода – рельс» (ДПР).

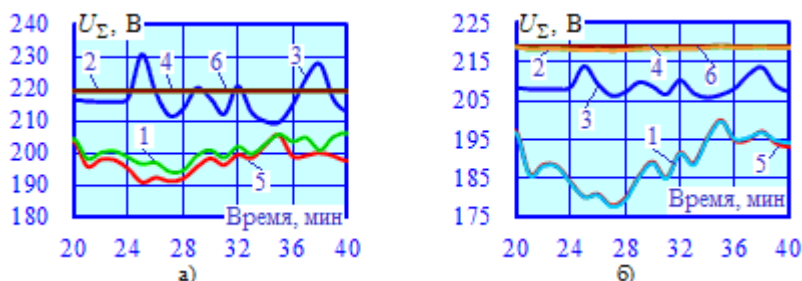


Рис. 3. Сравнение эффективного напряжения фазы А на стороне 0,4 кВ КТП СЦБ (а) и КТП ДПР (б):

1 – исходный; 2 –исходный с учетом ИРМ;
3 – обрыв фазы; 4 – обрыв фазы с учетом ИРМ; 5 – ДФЗ;
6 – ДФЗ с учетом ИРМ

Fig. 3. Comparison of the effective voltage of phase A on the 0.4 kV side of the complete transformer substations for signaling, centralization and automatic blocking (a) and the complete transformer substations “two wires-rail” (b):

1 – initial; 2 – initial taking into account the IRM;
3 – phase break; 4 – phase break taking into account the IRM; 5 – phase loss;
6 – phase loss taking into account the IRM

Результаты моделирования сложнonesимметричных и несинусоидальных режимов работы СЭС представлены на рис. 3-5. На рис. 3 показаны

зависимости $U_{\Sigma} = U_{\Sigma}(t)$ на стороне 0,4 кВ КТП, подключенных к ВЛ СЦБ и ДПР на 20 км. Параметр U_{Σ} :

$$U_{\Sigma} = U_1 \sqrt{1 + (k_U / 100)^2}, \quad (1)$$

где k_U – суммарный коэффициент гармоник; U_1 – напряжение с частотой 50 Гц.

Проведенный анализ результатов моделирования позволил сделать вывод о том, что для всех рассмотренных режимных ситуаций ПКЭ по отклонениям напряжений, несимметрии и несинусоидальности выходят за допустимые пределы. Поэтому были реализованы компьютерные модели, учитывающие применение устройств улучшения методики, таких как пофазно управляемые источники реактивной мощности и АФГ. Для моделирования ИРМ и АФГ в фазных координатах применялась методика, подробно описанная в [28]. Источники реактивной мощности, подключенные к ВЛ СЦБ, имели диапазон регулирования реактивной мощности $-5 \dots 40$ квар, а ИРМ, присоединенные к ЛЭП ДПР $-75 \dots 100$ квар. Активные фильтры были рассчитаны на среднеквадратичный ток в 150 А.

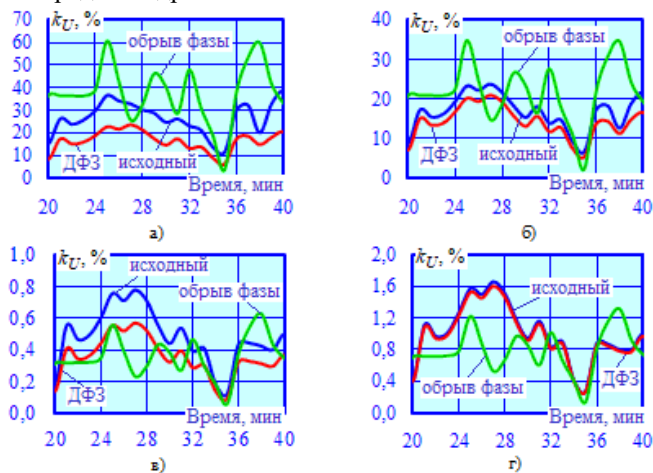


Рис. 4. Коэффициент гармоник напряжения фазы А на стороне 0,4 кВ КТП СЦБ (а, в) и ДПР (б, г):

а, б – без учета АФГ; в, г – с учетом АФГ

Fig. 4. Voltage harmonic coefficient of phase A on the 0.4 kV side of the complete transformer substations for signaling, centralization and automatic blocking (a, v) and the “two wires-rail” (b, g):

a, b – without taking into account the harmonic distortion factor;
v, g – with taking into account the harmonic distortion factor

Из рис. 3 видно, что резкопеременная тяговая нагрузка вызывает колебания напряжения на шинах 0,4 кВ КТП с размахом, превышающим 10 В. На основе использования ИРМ удается стабилизировать эти параметры. Выпрямительные электровозы создают значительные гармонические искажения: суммарный коэффициент гармоник k_U на шинах 0,4 кВ КТП СЦБ достигает в максимуме 60 % для ситуации НФСР, 37 % в исходном режиме и 22 % для схемы ДФЗ (рис. 4 а). Аналогичные показатели для КТП ДПР равны: 35, 22 и 20 % (рис. 4 б). С помощью АФГ значения k_U можно ввести в нормативные пределы (рис. 4 в, г). На рис. 5 приведены зависимости коэффициентов несимметрии по обратной последовательности $k_{2U} = k_{2U}(t)$. Из него видно, что во всех рассмотренных режимах величины k_{2U} на некоторых временных интервалах превышают предельно допустимые значения (рис. 5 а, б). На основе применения ИРМ показатели несимметрии на шинах 0,4 кВ КТП можно снизить практически до нуля (рис. 5 в, г).

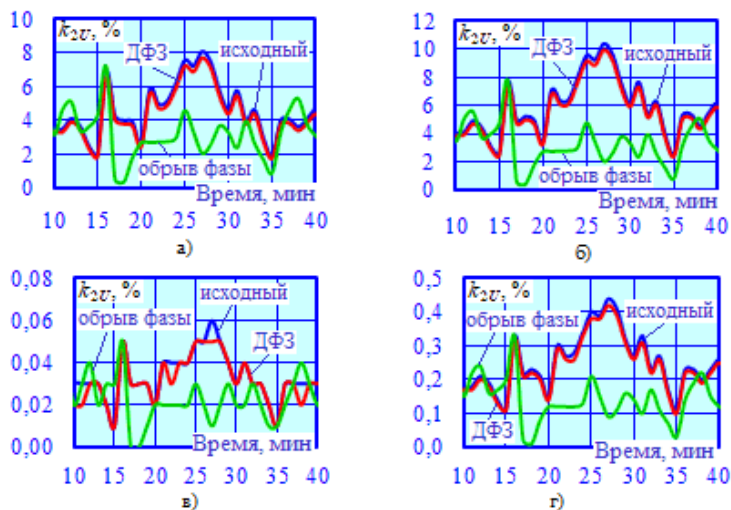


Рис. 5. Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности на стороне 0,4 кВ КТП СЦБ (а, в) и КТП ДПР (б, г): а, б – без учета ИРМ; в, г – с учетом ИРМ

Fig. 5. Voltage unbalance coefficient for negative sequence on the 0.4 kV side of the complete transformer substations for signaling, centralization and automatic blocking (а, в) and the complete transformer substations “two wires-rail” (б, г): а, б – without taking into account the IRM; в, г – taking into account the IRM

На основе результатов моделирования можно сделать вывод о том,

что применение пофазно управляемых источников реактивной мощности и активных фильтров гармоник позволяет обеспечить нормативное качество электроэнергии во всех рассмотренных режимах, включая НФСР и ДФЗ. Кроме того, на подстанциях, питающих устройства СЦБ, могут использоваться источники бесперебойного питания с двойным преобразованием энергии [29], позволяющие решать проблемы с качеством электроэнергии при любых ситуациях в питающей сети, в том числе и при НФСР и ДФЗ.

IV. Заключение

На основе компьютерного моделирования, выполненного с помощью промышленного программного комплекса *Fazonord AC-DC*, показано, что для повышения надежности электроснабжения тяги поездов и электроприемников, обеспечивающих функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта, можно использовать неполнофазные схемы работы сетей, питающих ТП, а также режимов «две фазы – земля». С точки зрения практической реализации первый способ является более приемлемым, так как требует меньшего числа переключений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-29-00937).

© Крюков А.В., 2025

© Суслов К.В., 2025

© Овечкин И.С., 2025

Поступила в редакцию 17.11.2025

Принята к публикации 25.11.2025

Received 17.11.2025

Accepted 25.11.2025

Библиографический список

- [1] Serdiuk T. Electromagnetic compatibility and power quality of traction and non-traction consumers // 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC EUROPE, Sept. 23-25, 2020, Rome, Italy. P. 1-6. DOI: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245735
- [2] Вантеев А.И. Вопросы электробезопасности при эксплуатации воздушных линий электропередачи. М.: Инфа-Инженерия, 2020. – 172 с.
- [3] Xiao T., Zou Y., Xia Y., Tong W., Gao Y., Wang J. Design and tests of a super real-time simulation-based power system real-time decision-making emergency control system // IET Gener. Transm. Distrib. 2020. Vol. 14. P. 1714-1725.
- [4] Douglass D., Chisholm W., Davidson G., Grant I., Lindsey K., Lancaster M. Real-time overhead transmission-line monitoring for dynamic rating // IEEE Transactions on Power Delivery. 2016. Vol. 31. No. 3. P. 921-927. DOI:10.1109/TPWRD.2014.2383915
- [5] Liu S., Cruzat C., Kopsidas K. Impact of transmission line overloads on network reliability and conductor ageing // 2017 IEEE Manchester PowerTech, June, 2017,

- Manchester, UK. P. 1-6. DOI:10.1109/PTC.2017.7980857
- [6] Billinton R., Li W. Reliability assessment of electrical power systems using monte carlo methods. New York: Springer New York. 1994. No. 1. P. 352. DOI: 10.1007/978-1-4899-1346-3
- [7] Kopsidas K., Abogaleela M. Utilizing demand response to improve network reliability and ageing resilience // IEEE Transactions on Power Systems. 2019. Vol. 34. No. 3. P. 2216-2227.
- [8] Misrikhanov M.Sh., Sitnikov V.F., Sharov Yu.V. Operation coordination of FACTS devices in backbone networks based on fuzzy logic methods // Russian Electrical Engineering. 2008. Vol. 79. P. 51-55. DOI: 10.1007/s11979-008-1009-y
- [9] Zaitsev I.O., Blinov I.V., Bereznychenko V.O., Zakusilo S.A. Electrical transmission line damage identification system for distribution electrical networks // 16th IC Measurement and Control in Complex Systems, Dec. 2022. DOI: 10.31649/mccs2022.21
- [10] Mantrov V.A. An analysis of the repair and post-shut-down modes of operation of 110-220 kV supply networks taking into account the action of counter-emergency automatic equipment // Power Technology and Engineering. 2012. Vol. 46. P. 81-86.
- [11] Xingru G., Yao W. Research on fault diagnosis and self-healing control model in power supply and distribution network // 2024 IEEE 6th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT), 2024. P. 991-995.
- [12] Voropai N.I., Chulyukova M.V., Petrov A.A. Automatic emergency load control of electric power systems: trends, new solutions, problems // IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55. No. 9. P. 12-17. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.07.003
- [13] Fu X., Lin T., Li Q., Du H., Xu X. Research on frequency stability emergency control strategy based on deep reinforcement learning // 2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2022, Chengdu, China. P. 1190-1195. DOI: 10.1109/EI256261.2022.10116102
- [14] Shi P., Zhang L., Lin T., Ni S. Distribution Network Post-disaster Power Supply Recovery Strategy Based on Path Description // 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2019, Changsha, China. P. 2703-2707. DOI: 10.1109/EI247390.2019.9061760.
- [15] Vukolov V., Trapeznikov I., Zyrin D., Loskutov A. Development of the algorithm for determining locations breaking the electrical network // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), May 19-20, 2016, Chelyabinsk, Russia. P. 1-6. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910996.
- [16] Chakraborty S., Park J., Saraswat G., Meyers T., Wang J., Tiwari S. Emergency power supply system for critical infrastructures: design and large scale hardware demonstration // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 114509-114526. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3325198
- [17] Lysenko O.A., Bubnov A.V. Application of supercapacitor energy storage systems for power reserve in emergency operation modes // 2022 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Nov. 15-17, 2022, Omsk, Russia. P. 1-5. DOI: 10.1109/Dynamics56256.2022.10014801
- [18] Li J., Liu H., Zhang Y., Su G., Wang Z. Artificial intelligence assistant decision-making method for main & distribution power grid integration based on deep deterministic network // 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy

- Conference (CIEEC), 2021, Wuhan, China. P. 1-5. DOI: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510594
- [19] Ilyushin P., Filippov S., Boyko E. Considering transient analysis results in probabilistic calculations of industrial consumers power supply reliability // 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Sept. 29 – Oct. 1, 2023, Magnitogorsk, Russia. P. 402-407. DOI: 10.1109/UralCon59258.2023.10291061
- [20] Вуколов В.Ю. Повышение надежности электроснабжения ответственных потребителей собственных нужд тяговых подстанций // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Материалы 95-го заседания межд. науч. семинара. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2023. Том 74. С. 441-450.
- [21] Савина Н.В., Лисогурский И.А., Лисогурская Л.Н. Применение технологий активно-адаптивных сетей для управления качеством электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой // Вестник Амурского государственного университета. 2021. № 93. С. 56-61. DOI: 10.22250/jasu.93.12
- [22] T. Serdiuk. Electromagnetic compatibility and power quality of traction and non-traction consumers // 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC EUROPE, Sep. 23-25, 2020, Rome, Italy. P. 1-6. DOI: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245735
- [23] Byman B., Yarborough T., Schnorr Von Carolsfeld R., Van Gorp J. Using distributed power quality monitoring for better electrical system management // IEEE Transactions on Industry Application. 2000. Vol. 36. No. 5. P. 1481-1485. DOI:10.1109/28.871298
- [24] Mohibullah S., Laskar S.H. Power quality issues and need of intelligent PQ monitoring in the smart grid environment // 47th Int. Conf. in Smart Measurements for Future grids, Sep., 2012. P. 1-6. DOI: 10.1109/UPEC.2012.6398437
- [25] Castaldo D., Gallo D., Landi C., Langella R., Testa A. Power quality analysis: a distributed measurement system // 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, July, 2003. Vol. 3. P. 487-492. DOI:10.1109/PTC.2003.1304437
- [26] Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: ИрГУПС, 2005. – 273 с.
- [27] Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. М.: Директ-Медиа, 2023. – 156 с.
- [28] Арсентьев Г.О. Управление режимами систем электроснабжения железных дорог на основе технологий интеллектуальных сетей (smart grid). Иркутск: ИрГУПС, 2019. – 412 с.
- [29] Воробьев А.Ю. Электроснабжение компьютерных и телекоммуникационных систем. М.: ЭкоТрендз, 2002. – 280 с.

References

- [1] T. Serdiuk, “Electromagnetic Compatibility and Power Quality of Traction and Non-Traction Consumers”, in *proc. 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC EUROPE*, September 23-25, 2020, Rome, Italy, pp. 1-6. DOI: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245735

-
- [2] A.I. Vanteev, *Voprosy elektrobezopasnosti pri ekspluatatsii vozdukhnykh liniy elektroperedachi* [Electrical safety issues during operation of overhead power lines]. Moscow: Infpa-Engineering, 2020, pp.172 (in Russian).
 - [3] T. Xiao, Y. Zou, Y. Xia, W. Tong, Y. Gao and J. Wang, "Design and tests of a super real-time simulation-based power system real-time decision-making emergency control system", *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 14, pp. 1714-1725, 2020.
 - [4] D. Douglass, W. Chisholm, G. Davidson, I. Grant, K. Lindsey and M. Lancaster, "Real-time overhead transmission-line monitoring for dynamic rating", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 3, pp. 921-927, June 2016.
 - [5] S. Liu, C. Cruzat and K. Kopsidas. "Impact of transmission line overloads on network reliability and conductor ageing", in proc. *2017 IEEE Manchester PowerTech*, June, 2017, Manchester, UK, pp. 1-6. DOI:10.1109/PTC.2017.7980857
 - [6] R. Billinton and W. Li, *Reliability assessment of electrical power systems using monte carlo methods*. New York: Springer New York, 1994, no. 1. pp. 352. DOI: 10.1007/978-1-4899-1346-3
 - [7] K. Kopsidas and M. Abogaleela. "Utilizing demand response to improve network reliability and ageing resilience", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 3, pp. 2216-2227, May 2019.
 - [8] M.Sh. Misrikhanov, V.F. Sitnikov and Yu.V. Sharov, "Operation coordination of FACTS devices in backbone networks based on fuzzy logic methods", *Russian Electrical Engineering*, vol. 79, pp. 51-55, 2008. DOI: 10.1007/s11979-008-1009-y
 - [9] I.O. Zaitsev, I.V. Blinov, V.O. Berezhnychenko and S.A. Zakusilo, "Electrical transmission line damage identification system for distribution electrical networks", in proc. *16th IC Measurement and Control in Complex Systems*, Dec., 2022. DOI: 10.31649/mccs2022.21
 - [10] V.A. Mantrov, "An analysis of the repair and post-shut-down modes of operation of 110 – 220 kV supply networks taking into account the action of counter-emergency automatic equipment", *Power Technology and Engineering*, vol. 46, pp. 81-86, 2012.
 - [11] G. Xingru and W. Yao, "Research on fault diagnosis and self-healing control model in power supply and distribution network", in proc. *2024 IEEE 6th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT)*, pp. 991-995, 2024.
 - [12] N.I. Voropai, M.V. Chulyukova and A.A. Petrov, "Automatic emergency load control of electric power systems: trends, new solutions, problems", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 9, pp. 12-17, 2022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.07.003
 - [13] X. Fu, T. Lin, Q. Li, H. Du and X. Xu, "Research on frequency stability emergency control strategy based on deep reinforcement learning", in proc. *2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2022, Chengdu, China, pp. 1190-1195. DOI: 10.1109/EI256261.2022.10116102
 - [14] P. Shi, L. Zhang, T. Lin and S. Ni, "Distribution network post-disaster power supply recovery strategy based on path description", in proc. *2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2019, Changsha, China, pp. 2703-2707. DOI: 10.1109/EI247390.2019.9061760.
 - [15] V. Vukolov, I. Trapeznikov, D. Zyryn and A. Loskutov, "Development of the algorithm for determining locations breaking the electrical network", in proc. *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and*

- Manufacturing (ICIEAM)*, May 19-20, 2016, Chelyabinsk, Russia, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910996.
- [16] S. Chakraborty, J. Park, G. Saraswat, T. Meyers, J. Wang and S. Tiwari, "Emergency power supply system for critical infrastructures: design and large scale hardware demonstration", *IEEE Access*, vol. 11, pp. 114509-114526, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3325198
- [17] O.A. Lysenko and A.V. Bubnov, "Application of supercapacitor energy storage systems for power reserve in emergency operation modes", in *proc. 2022 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, Nov. 15-17, 2022, Omsk, Russia, pp. 1-5. DOI: 10.1109/Dynamics56256.2022.10014801
- [18] J. Li, H. Liu, Y. Zhang, G. Su and Z. Wang, "Artificial intelligence assistant decision-making method for main & distribution power grid integration based on deep deterministic network", *2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*, 2021, Wuhan, China, pp. 1-5. DOI: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510594
- [19] P. Ilyushin, S. Filippov and E. Boyko, "Considering transient analysis results in probabilistic calculations of industrial consumers power supply reliability", *2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Sept. 29 – Oct. 1, 2023, Magnitogorsk, Russia, pp. 402-407. DOI: 10.1109/UralCon59258.2023.10291061
- [20] V.Yu. Vukolov, "Improving the reliability of power supply to responsible consumers of traction substations' own needs", *Methodological issues of studying the reliability of large energy systems: proc. 95th meeting of the International Scientific Seminar*. Irkutsk: ISEM SB RAS, vol. 74, pp. 441-450. 2023.
- [21] N.V. Savina, I.A. Lisogursky, L.N. Lisogurskaya, "Application of active-adaptive network technologies for managing the quality of electric power in electric networks with traction load", *Bulletin of Amur State University*, no. 93, pp. 56-61, 2021. DOI: 10.22250/jasu.93.12
- [22] T. Serdiuk, "Electromagnetic compatibility and power quality of traction and non-traction consumers", *2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC EUROPE*, Sept. 23-25, 2020, Rome, Italy, pp. 1-6. DOI: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245735
- [23] B. Byman, T. Yarbrough, R. Schnorr Von Carolsfeld and J. Van Gorp, "Using distributed power quality monitoring for better electrical system management", *IEEE Transactions on Industry Application*, vol. 36, no. 5, pp. 1481-1485, 2000. DOI:10.1109/28.871298
- [24] S. Mohibullah and S.H. Laskar, "Power quality issues and need of intelligent PQ monitoring in the smart grid environment", in *proc. 47th Int. Conf. in Smart Measurements for Future grids*, September, 2012, pp. 1-6. DOI: 10.1109/UPEC.2012.6398437
- [25] D. Castaldo, D. Gallo, C. Landi, R. Langella and A. Testa. "Power quality analysis: a distributed measurement system", in *proc. 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, July, 2003, vol. 3, pp. 487-492. DOI:10.1109/PTC.2003.1304437

- [26] V.P. Zakaryukin and A.V. Kryukov, *Slozhnonесimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complex asymmetric modes of electrical systems]*. Irkutsk: IrGUPS, 2005 (in Russian).
- [27] V.P. Zakaryukin and A.V. Kryukov, *Modelirovaniye sistem tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka na osnove faznykh koordinat [Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates]*. Moscow: Direct-Media, 2023 (in Russian).
- [28] G.O. Arsenyev, *Upravleniye rezhimami sistem elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog na osnove tekhnologiy intellektual'nykh setey (smart grid) [Control of railway power supply system modes based on smart grid technologies]*. Irkutsk: IrGUPS, 2019 (in Russian).
- [29] A.Yu. Vorobyov, *Elektrosnabzheniye komp'yuternykh i telekommunikatsionnykh sistem [Power supply of computer and telecommunication systems]*. Moscow: EcoTrends, 2002. (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Крюков Андрей Васильевич, д-р техн. наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация.

Andrey V. Kryukov, professor of the Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation.

Суслов Константин Витальевич, д-р техн. наук, профессор Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация

Konstantin V. Suslov, professor of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation

Овечкин Илья Сергеевич, аспирант Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация.

Ilya S. Ovechkin, postgraduate student of Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation.

УДК 621.316.722

EDN SOFFMT

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ТЯГОВОЙ СЕТИ С ТЯЖЕЛОВЕСНЫМИ ПОЕЗДАМИ И СТАТИЧЕСКИМ ГЕНЕРАТОРОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ПОСТУ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ

Л.А. Герман

ORCID: 0000-0003-4988-2107 e-mail: lagerman@mail.ru

Нижегородский институт путей сообщения –
филиал Приволжского государственного университета путей сообщения
Нижний Новгород, Россия

И.А. Саликов

e-mail: ilya_leonov_00_00@mail.ru

Трансэнерго – филиал ОАО «РЖД». Горьковская дирекция по энергообеспечению
Нижний Новгород, Россия

Анализируется проблема повышения пропускной способности электрифицированных участков железной дороги за счет применения статических генераторов реактивной мощности (СГРМ). Представлены методы расчета потерь мощности в тяговой сети с тяжеловесным поездом и СГРМ на постах секционирования. На примере двухпутного участка системы 25 кВ с СГРМ мощностью 15 Мвар выполнены исследования влияния выбора уровня стабилизации напряжения СГРМ на потери мощности в тяговой сети. Для расчета двухпутного участка контактной сети использована схема замещения «треугольника», позволившая получить относительно простые схемы расчета потерь напряжения и мощности сложного участка железной дороги. Результаты расчета потерь мощности при различных уровнях стабилизации напряжения СГРМ показали возможности более точной оценки уровня напряжения СГРМ.

Ключевые слова: потери мощности, статический генератор реактивной мощности, стабилизация напряжения, тяговая сеть.

Для цитирования: Герман Л.А., Саликов И.А. Расчет потерь мощности в тяговой сети с тяжеловесными поездами и статическим генератором реактивной мощности на посту секционирования // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 4. С. 106-116. EDN SOFFMT

CALCULATION OF POWER LOSSES IN TRACTION NETWORK WITH HEAVY-DUTY TRAINS AND STATIC REACTIVE POWER GENERATOR AT SECTIONING STATION

L.A. German

ORCID: 0000-0003-4988-2107 e-mail: lagerman@mail.ru

Nizhny Novgorod Institute of Railways branch of the Volga State Transport University
Nizhny Novgorod, Russia

I.A. Salikov

e-mail: ilya_leonov_00_00@mail.ru

Transenergo – Branch of JSC «Russian Railways». Gorky Directorate for Energy Supply
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This article examines the problem of increasing the capacity of electrified railway sections through the use of static reactive power generators (SRPGs). The paper presents methods for calculating power losses in a traction network with a heavy-haul train and SRPGs at sectioning stations. Using a double-track section of a 25 kV system with a 15 Mvar SRPG, the effect of selecting the SRPG voltage stabilization level on power losses in the traction network was studied. A delta equivalent circuit was used to calculate the double-track section of the overhead line, allowing for relatively simple calculation schemes for voltage and power losses on a complex railway section. The results of power loss calculations for various SRPG voltage stabilization levels demonstrated the potential for more accurate SRPG voltage stabilization assessments.

Keywords: power losses, static reactive power generator, voltage stabilization, traction network.

For citation: L.A. German and I.A. Salikov, “Calculation of power losses in traction network with heavy-duty trains and static reactive power generator at sectioning station”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 106-116, 2025. EDN SOFFMT

I. Введение

Статические генераторы реактивной мощности (СГРМ) начали устанавливаться в тяговой сети у постов секционирования (ПС) с 2015 г. с целью повышения пропускной способности путем пропуска тяжеловесных и соединенных поездов. При этом принят режим работы СГРМ – «стабилизация напряжения» [1]. Сегодня на сети отечественных железных дорогах СГРМ уже более 30 и число их растет. Они применяются также при специфической работе тяговой сети, например, при тяжелых профилях пути, при консольном питании зоны, при длинных туннелях и т.д. Положительный эффект

СГРМ объясняется установленным повышенным напряжением на ПС, что положительно сказывается на повышение пропускной способности электрифицированных участков железной дороги. Однако официальные данные по нормативам на уровни стабилизированного напряжения отсутствуют и применяются в эксплуатации интуитивно, обычно 27 или 28 кВ. По всей видимости, должна быть разработана методика расчета напряжения СГРМ на ПС для участков различной грузонапряженности и интенсивности тяжеловесного движения. Опыт работы с СГРМ [2] подтвердил их эффективность при повышенной нагрузке тяговой сети и повышении пропускной способности, но, к сожалению, показал повышенные потери электроэнергии при этом. Причины повышенных потерь вызваны установленным повышенным уровнем напряжения на посту секционирования и определяются следующим:

- перекompенсаций реактивной мощности в тяговой сети и соответствующим увеличением токов тяговой сети;
- повышенным потреблением реактивной мощности электроподвижным составом (ЭПС) до 25 % в связи с повышенным напряжением на токоприемнике;
- уравнительными токами между ПС и тяговыми подстанциями;
- повышенными потерями мощности в СГРМ.

Первые данные по работе СГРМ и данные по их эксплуатации на Запдно-Сибирской железной дороге появились в [3], расчеты потерь мощности в СГРМ – в [4], опыт работы СГРМ на отечественных железных дорогах представлен в работах [3, 5].

На Горьковской железной дороге движение грузовых поездов повышенной массы стало обязательной. На Южном ходу тяжеловесные поезда массой до 9 тыс. тонн с трехсекционными электровозами формируются 7-8 раз в сутки, соединенные поезда массой до 12 тыс. тонн с трехсекционными локомотивами в голове и середине состава – 2-3 раза в сутки. На Северном ходу движение тяжеловесных поездов еще более интенсивное. В настоящее время акцентируется стремление включать СГРМ на железных дорогах Восточного направления. Поэтому установить рациональный режим электроснабжения с пониженным расходом электроэнергии является для электрифицированных железных дорог актуальнейшей задачей.

Цель статьи: сформировать методы расчета потерь мощности в тяговой сети с тяжеловесным поездом и СГРМ на ПС и показать на конкретном примере увеличение потерь мощности в тяговой сети при повышенном уровне стабилизации напряжения СГРМ. Кроме того, важно показать, что выбор уровня стабилизации напряжения СГРМ влияет на потери мощности в тяговой сети.

Расчеты тяговой сети с СГРМ, в частности, потерь напряжения и потерь мощности, выполнены в настоящей работе на конкретном примере по схеме электроснабжения с заданными исходными данными.

II. Выбор расчетной схемы электроснабжения и исходных данных

Рассматривается двухпутный участок системы 25 кВ (рис. 1) с постом секционирования, на котором установлена СГРМ мощностью 15 Мвар, из которых 5 Мвар предназначены для компенсации 3 и 5 гармоник тока, а 10 Мвар – для компенсации реактивной мощности тяговой сети (ток компенсации $I_{сгрм}$). Контактная сеть КС1 и КС2 длиной 30 км и КС3, и КС4 длиной 25 км с погонным сопротивлением $Z_{21}=0,17+j0,4$ Ом/км.

Обычно тяжеловесные поезда курсируют по одному пути, хотя могут идти и по обоим путям. В расчетной схеме средний часовой ток эквивалентного тяжеловесного поезда $I_{13}=300$ А, который расположен в середине участка КС1. Остальная суммарная тяговая нагрузка участка с током 200 А эквивалентирована между узлами шин 27,5 кВ тяговых подстанций (с токами 54 А и 46 А) и постом секционирования (с током $I_{23}=100$ А).

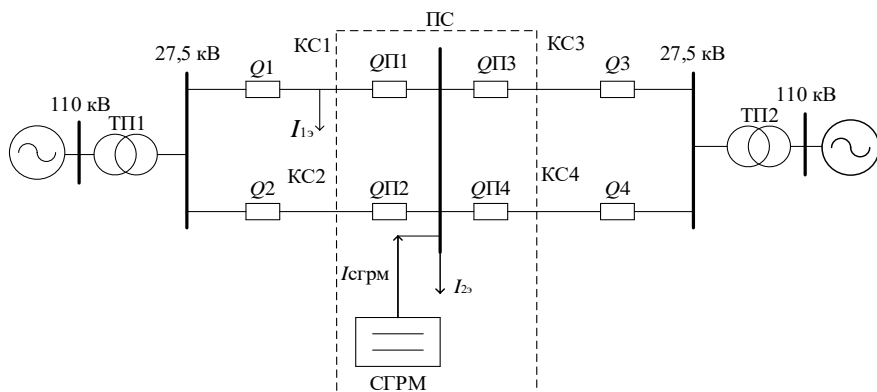


Рис. 1. Двухпутный участок системы 25кВ с постом секционирования с установленным СГРМ мощностью 15 Мвар

Fig. 1. A two-track section of a 25 kV system with a sectioning station with an installed SRPG with a capacity of 15 Mvar

III. Схема замещения СГРМ в тяговой сети

В расчете в основном интересует взаимодействие тяжеловесного поезда и генератора СГРМ, поэтому схему замещения сформируем относительно их нагрузочных узлов. Схема замещения (рис. 2) позволяет производить расчеты параметров режима тяговой сети со статическим генератором реактивной мощности (СГРМ) в его различных режимах с оценкой потерь мощности.

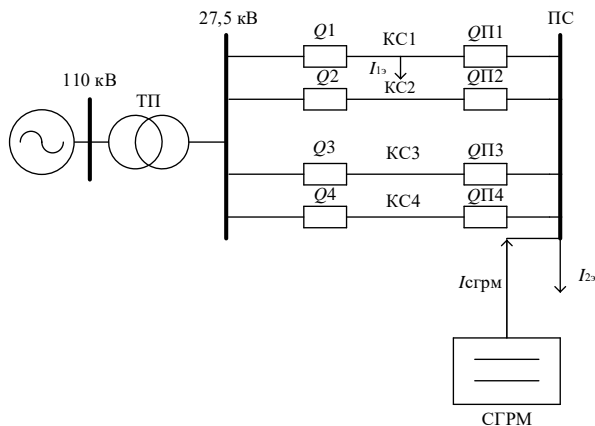


Рис. 2. Схема замещения

Fig. 2. Equivalent circuit

Принимаем одинаковыми напряжения холостого хода шин 27,5 кВ на ТП1 и ТП2, тогда объединяем системы электроснабжения ТП1 и ТП2 в единую систему электроснабжения с суммарной мощностью трансформатора ТП. Далее объединяем КС2, КС3, КС4 в одну ветвь с сопротивлением $Z1$, а ветви КС1 от шин 27,5 кВ ТП1 и от ПС до тока I_{13} обозначим соответственно $Z2$ и $Z3$. Тогда получим схему замещения (рис. 3). Напряжение в узле 2 – напряжение шин 27,5кВ (U_{27}).

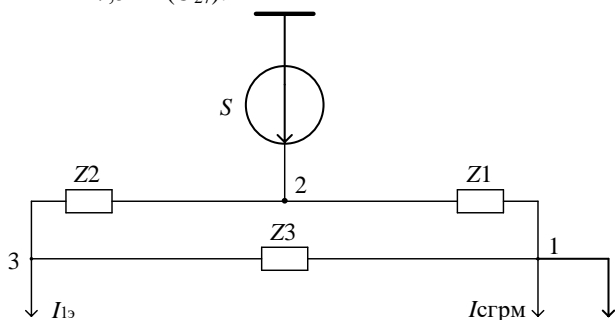


Рис. 3. Схема замещения

Fig. 3. Equivalent circuit

Для удобства дальнейших расчетов выполним преобразование схемы «треугольника» в схему «звезда» [6] (рис. 4)

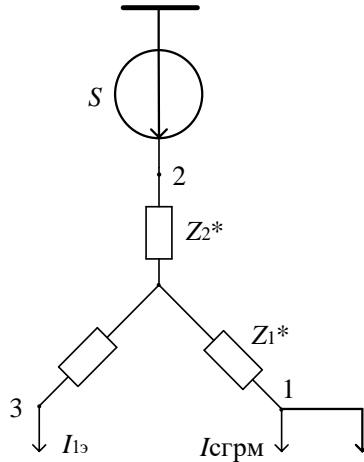


Рис. 4. Схема замещения «звезда»

Fig. 4. The «star» equivalent circuit

IV. Расчет напряжений на ПС

Расчет напряжений в системе электроснабжения с СГРМ позволяет предварительно оценить параметры напряжения стабилизации. Используя формулу [7] потерь напряжения как суммы активной и реактивной составляющих потерь напряжения, по схеме замещения на рис. 4 определим напряжение в узле 1:

$$U_{\text{сгрм}} = U_{27} - [(-I_{\text{сгрм}} + I_{23}'') \cdot X_1^* + (-I_{\text{сгрм}} + I_{23}'' + I_{13}'') \cdot X_2^* + I_{23}' \cdot R_1^* + (I_{13}' + I_{23}') \cdot R_2^*], \quad (1)$$

где $I_{\text{сгрм}}$ – емкостной ток генерации СГРМ; I_{13}'', I_{23}'' – реактивные составляющие токов нагрузки; I_{13}', I_{23}' – активные составляющие токов нагрузки; R^* и X^* – активная и реактивная составляющие сопротивлений Z1 и Z2.

В правой части (1) выражение в квадратных скобках обозначим как потери напряжения в узле 1 – ΔU_1 , тогда:

$$U_{\text{сгрм}} = U_{27} - \Delta U_1 \quad (2)$$

Задаваясь тем или иным значением напряжения стабилизации (при этом $U_{\text{стаб}} = U_{\text{сгрм}}$), можно определить в этом случае ток генерации $I_{\text{сгрм}}$.

Для примера покажем токи СГРМ для $U_{\text{стаб}}$ 27 кВ и 28 кВ в схеме замещения по рис. 4, для которой укажем полученные по расчету исходные данные:

- параметры схемы замещения [8] по рис. 4;
- $R_1^* = R_2^* = 0,578 \text{ Ом}$; $R_3^* = 0,974 \text{ Ом}$;
- $X_1^* = X_2^* = 1,366 \text{ Ом}$; $X_3^* = 2,317 \text{ Ом}$;
- параметры тяговой нагрузки: $\sin\varphi = 0,6$, $\cos\varphi = 0,8$; $I' = I \cos\varphi$; $I'' = I \sin\varphi$, $I'_{13} = 300 \cdot 0,8 = 240 \text{ А}$; $I''_{13} = 300 \cdot 0,6 = 180 \text{ А}$; $I'_{23} = 100 \cdot 0,8 = 80 \text{ А}$, $I''_{23} = 100 \cdot 0,6 = 60 \text{ А}$.

Если принять стабилизацию $U_{\text{стаб}} = 28 \text{ кВ}$ и $\Delta U_1 = 28000 - 27000 = 1000 \text{ В}$, то из (1) получим $I_{\text{сгрм}} = 679 \text{ А}$, а при $U_{\text{стаб}} = 27 \text{ кВ}$ $\Delta U_1 = 0$ и $I_{\text{сгрм}} = 313 \text{ А}$. По указанным данным мощность СГРМ равна $27,5 \cdot 679 = 18672 \text{ кВар}$ и $27,5 \cdot 313 = 8607 \text{ кВар}$. Расчеты свидетельствуют о том, что стабилизацию в 28 кВ в этом примере выполнить нельзя, так как задана мощность 15 МВар.

Важно отметить, что от заданного уровня стабилизации напряжения зависит мощность СГРМ.

V. Расчет потерь мощности тяговой сети

Активные потери мощности в тяговой сети определяются суммой потерь мощности на каждом сопротивлении схемы замещения (рис. 4).

Потери мощности равны:

$$\Delta P = I_{13}^2 \cdot R_3^* + [(-I_{\text{сгрм}} + I_{23}'')^2 + (I_{13}')^2] \cdot R_1^* + [(-I_{\text{сгрм}} + I_{13}'')^2 + (I_{13}')^2 \cdot (I_{23}'')^2] \cdot R_1^* \quad (3)$$

Для всех режимов СГРМ выполним расчеты и результаты сведем в табл. 1.

Таблица 1.
Расчеты потерь мощности

Table 1.
Power loss calculations

Режим СГРМ	$I_{\text{сгрм}}, \text{ А} /$ $Q_{\text{сгрм}}, \text{ Мвар}$	Потери активной мощности	
		$\Delta P, \text{ кВт}$	Уменьшаются/ увеличиваются
Без СГРМ	–	185,9	–
Стабилизация 27кВ	313/8,6	175,5	Уменьшаются в 1,06 раза
Стабилизация 27,5кВ	417,6/11,5	262,9	Увеличиваются в 1,41 раза
Стабилизация 28кВ	679/18,7	456,9	Увеличиваются в 2,45 раза

Представленный пример расчета позволяет оценить режимы работы СГРМ в эксплуатационных условиях. При стабилизации 28 кВ потери мощности в тяговой сети по сравнению с отсутствием СГРМ увеличились на

271 кВт, т.е. увеличение потерь в 2,45 раза. Это результат перекомпенсации реактивной мощности в тяговой сети. Переход на режим стабилизации 27 кВ в рассматриваемом примере резко снижает потери мощности – до 175,5 кВт. Поэтому в условиях эксплуатации целесообразно проверить возможность снижения уровня стабилизации повышенного напряжения для уменьшения потерь мощности [9, 10].

В рассмотренном примере определены часовые потери мощности при проходе тяжеловесного поезда с током I_1 . Обычно в графике движения на межподстанционной зоне ограничиваются одним тяжеловесным поездом, время хода которого в зоне системы 25кВ около одного часа. При проходе другого тяжеловесного поезда с другим током I_1 , следует повторить расчеты. При необходимости расчета суточных потерь мощности следует в исходных данных задать средний ток тяговой нагрузки за сутки.

VI. Выводы

В тяговых сетях переменного тока для повышения пропускной способности устанавливают статические генераторы реактивной мощности на полупроводниковых элементах. При их положительном эффекте по пропуску тяжеловесных поездов, к сожалению, увеличиваются потери электроэнергии в тяговой сети, так как на СГРМ ПС устанавливается повышенное напряжения в контактной сети.

Новизна исследований состоит в том, что впервые в расчетах двухпутных участков контактной сети применена схема замещения «треугольника», преимущество которой в следующем:

- получены достаточно простые и наглядные схемы расчета потерь напряжения и потерь мощности сложных схем двухпутного участка железной дороги с постом секционирования и СГРМ при движении тяжеловесных поездов;
- достаточно просто и наглядно показан рост потерь мощности в тяговой сети при увеличении уровня стабилизации напряжения СГРМ;
- предлагаемый метод расчета мощности СГРМ может в дальнейшем быть основой для оценки уровня стабилизации напряжения СГРМ.

Предложены методы расчета напряжения стабилизации СГРМ по параметрам тяговой сети и тяговой нагрузки и в зависимости от уровня стабилизации напряжения выполнен расчет потерь мощности в тяговой сети. Происходит более осознанный выбор мощности СГРМ. Расчеты потерь мощности при разных уровнях стабилизации напряжения СГРМ дают возможность более правильно оценить в эксплуатации рациональный уровень напряжения СГРМ.

Поскольку изменение уровня стабилизации значительно влияет на изменение потерь мощности в тяговой сети, предлагается рассматривать

расширенный диапазон уровней стабилизации с учетом возможных различных средних напряжений на тяговых шинах подстанций: 26,5 кВ, 27 кВ, 27,5 кВ, 28 кВ.

© Герман Л.А., 2025

© Саликов И.А., 2025

Поступила в редакцию 28.07.2025

Принята к публикации 02.10.2025

Received 28.07.2025

Accepted 02.10.2025

Библиографический список

- [1] Каталог продукции. Статические генераторы реактивной мощности RU-DRIVE SVG // ООО НПП «РУ-Инжиниринг». [Электронный ресурс]. URL: <https://ru-drive.com/> (дата обращения 01.10.2024).
- [2] Герман Л.А. Совершенствование тягового электроснабжения переменного тока для повышения пропускной способности железных дорог. Н. Новгород: СамГУПС, 2024. – 186 с.
- [3] Никонов А.В. Улучшение эксплуатационных показателей системы тягового электроснабжения за счет совершенствования работы регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности: автореф. дис. канд. тех. наук, ОмГУПС, Омск, 2019. – 21 с.
- [4] Никонов А.В. Потери мощности в основном оборудовании статических тиристорных компенсаторов и пути их снижения // Всерос. молодежная науч.-практ. конф. с межд. уч. «Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности», Октябрь 04-05, 2018, Омск, Россия: ОмГУПС, 2018. С. 255-263.
- [5] Черемисин В.Т., Никонов А.В. Сравнение энергетических показателей регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности в условиях эксплуатации на постах секционирования // Транспорт Урала. 2018. № 1 (56). С. 30-34. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-1-30-34
- [6] Татур Т.А., Татур В.Е. Установившиеся и переходные процессы в электрических цепях. М.: Высшая школа, 2001. – 407 с.
- [7] Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
- [8] Фигурнов Е.П. Релейная защита. Ч. 2. М.: УМЦ ЖДТ, 2009. – 604 с.
- [9] Герман Л. А., Чивенков А. И., Галкин К.В. Способ регулирования статического генератора реактивной мощности, Пат. 2819464 RU, заявл. 27.06.23; опубл. 21.05.24. – Бюл. № 1.
- [10] Герман Л.А., Галкин К.В. Рациональный режим статического генератора реактивной мощности в тяговой сети // Железнодорожный транспорт. 2025. № 6. С. 36-38.

References

- [1] Katalog produkci. Staticheskie generatory reaktivnoj moshchnosti RU-DRIVE SVG [Product Catalog. Static Reactive Power Generators RU-DRIVE SVG]. [Online]. Available at: <https://rudrive.com/> [Accessed: Oct. 1, 2024] (in Russian).

-
- [2] L.A. German, *Sovershenstvovanie tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka dlya povyshcheniya propusknoy sposobnosti zheleznih dorog* [Improving AC traction power supply to increase railway capacity]. N. Novgorod: SamGUPS, 2024 (in Russian).
 - [3] A.V. Nikonov, “*Uluchshenie ekspluatatsionnykh pokazatelej sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya za schet sovershenstvovaniya raboty reguliruemyyh ustroystv poperechnoy kompensatsii reaktivnoj moshchnosti* [Improving the performance of the traction power supply system by improving the operation of adjustable shunt reactive power compensation devices]”, Cand. of Tech. S. thesis, OSTU, Omsk, Russia, 2019 (in Russian).
 - [4] A.V. Nikonov, “Power losses in the basic equipment of static tiristor compensators and the ways of their reduction”, in proc. *All-Russian youth scientific and practical conference with international students Intellektual'naya energetika na transporte i v promyshlennosti* [Intelligent energy in transport and industry], Oct. 4-5, 2018, Omsk, Russia, pp. 255-263 (in Russian).
 - [5] V.T. Cheremisin and A.V. Nikonov, “Comparison of energy indices of regulated devices for reactive shunt compensation in conditions of operation in section switch boxes”, *Transport of the Urals*, vol. 1, no. 56, pp. 30-34, 2018. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-1-30-34
 - [6] T.A. Tatur and V.E. Tatur, *Ustanovivshiesya i perekhodnye processy v elektricheskikh cepyah* [Steady-state and transient processes in electrical circuits]. Moscow: Higher School of Economics, 2001 (in Russian).
 - [7] K.G. Markvardt, *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznih dorog* [Power supply for electrified railways]. Moscow: Transport, 1982 (in Russian).
 - [8] E.P. Figurnov, *Releynaya zashchita*. [Relay protection]. Part 2. Moscow: UMC ZDT, 2009 (in Russian).
 - [9] L.A. German, A.I. Chivenkov and K.V. Galkin, “*Sposob regulirovaniya staticheskogo generatora reaktivnoj moshchnosti* [Method of regulating a static reactive power generator]”, Patent RU 2819464, May 21, 2024 (in Russian).
 - [10] L.A. German and K.V. Galkin, “The rational mode of a static reactive power generator in a traction network”, *Railway Transport*, no. 6, pp. 36-38, 2025.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Герман Леонид Абрамович, доктор технических наук, профессор Нижегородского института путей сообщения – филиал Приволжского государственного университета путей сообщения, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Leonid A. German, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod Institute of Railways branch of the Volga State Transport University, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Саликов Илья Александрович, инженер Горьковской дистанции электро-снабжения – структурного подразделения Горьковской дирекции по энерго-обеспечению – структурного подразделения Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД», г. Нижний Новгород, Россий-ская Федерация.

Илья А. Salikov, engineer of the Gorky Power Supply Distance – Branch of the Gorky Directorate for Energy Supply of the Transenergo – Branch of JSC «Russian Railways», Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION
NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.E. ALEKSEEV**

SMART ELECTRICAL ENGINEERING

№ 4

Nizhny Novgorod 2025

The journal is issued 4 times in year

Editor-in-Chief A.B. Loskutov

EDITORIAL STAFF

A.B. Dar'enkov (associate Editor-in-Chief),
E.N. Sosnina (associate Editor-in-Chief), A.V. Shalukho (executive secretary),
V.I. Kazakova (executive editor), I.A. Lipuzhin (executive editor)

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

Dauren Sadykovich Akhmetbaev	Doctor of technical sciences, associate professor of the S. Seifullin Kazakh Agro-Technical University (Astana, Republic of Kazakhstan)
Gennadiy Yakovlevich Vagin	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Leonid Abramovich German	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU Branch in Nizhny Novgorod (Nizhny Novgorod, Russia)
Valery Gennadievich Goldstein	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU (Samara, Russia)
Igor Vasilevich Gulyaev	Doctor of technical sciences, professor, professor MRSU (Saransk, Russia)
Pavel Vladimirovich Ilyushin	Doctor of technical sciences, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Alexander Leonidovich Kulikov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Viktor Nikolaevich Mescheryakov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair LSTU (Lipetsk, Russia)
Aleksandr Sergeevich Plekhov	Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Aleksandr Yur'evich Smirnov	Doctor of technical sciences, associate professor, leading design engineer JSC «Afrikantov OKBM» (Nizhny Novgorod, Russia)
Oleg Stanislavovich Khvatov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair FFEI HE «VSUWT» (Nizhny Novgorod, Russia)
Alexandr Ivanovich Chivenkov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)

Electronic version:
<http://www.ie.nntu.ru>

Periodic printed edition registered by Roskomnadzor
ПИ № ФС77-81688 on 06 Aug., 2021

ISSN 2658-6754

© Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 2025

CONTENT

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS	4
Akkad A.F., Sosnina E.N. Application of type 2 fuzzy logic for D-STATCOM control in distributed energy networks with renewable energy sources.....	4
Popov S.V. , Features of implementing AVR with circuit breakers equipped with electric drives	23
Beloshistov A.I., Serov A.L., Beloshistov A.A. Microprocessor-based overcurrent protection system for 3.3 kV mining electrical equipment.....	32
POWER INDUSTRY	55
Voloshin E.A., Lachugin V.F., Voloshin A.A. Methods of planning the operating mode of microgrid.....	55
Ivanov S.V. Practical issues of implementation of frequency independent measuring elements for relay protection with one supplied quantity.....	68
Averyanov S.S., Trofimov A.S. Comparative analysis of ensemble machine learning algorithms for detecting the starting mode of electric motor	77
Kryukov A.V., Suslov K.V., Ovechkin I.S. Comprehensive modeling of electricity supply systems for non-traction consumers in out-of-phase electric network operation modes.....	91
German L.A., Salikov I.A. Calculation of power losses in traction network with heavy-duty trains and static reactive power generator at sectioning station.....	106

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 4

Редакторы: **И.А. Липужин, С.В. Нуякшева**
Технический редактор: **И.Н. Терентьева**

Редакция:

603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24
smart_electric@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать 12.12.2025. Дата выхода в свет: 19.12.2025

Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 8,75. Тираж 25 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева. Типография НГТУ.

Адрес университета и типографии:
603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24