

ОСОБЕННОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ С ОБЪЕКТАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

А.А. Лоскутов

ORCID: 0000-0003-2228-596X e-mail: loskutov_aa@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

В условиях современной конъюнктуры рынка электроэнергии и мощности многие средние и крупные промышленные предприятия выбирают для своих систем электроснабжения собственные объекты распределенной генерации. Как правило, это газотурбинные, газопоршневые, дизельные генерирующие установки, в некоторых случаях солнечные, ветровые электрические станции инверторного включения. Собственники промышленных предприятий внедряют инновационные технические решения направленные на повышение эффективности электроснабжения и технологического процесса, связанные с использованием силовых электронных преобразователей, регуляторов напряжения на элементах силовой электроники. Промышленные потребители часто имеют нелинейную нагрузку с переменным графиком работы. Эти обстоятельства существенно отражается на изменении режимов работы систем электроснабжения промышленных потребителей, делает их сложнораспознаваемыми для устройств релейной защиты и автоматики. В статье анализируются проблемы современных систем электроснабжения с объектами распределенной генерации, особенности режимов и причины сложных выявлений аварий и мест повреждений. Предлагаются и обосновываются пути решения проблем и направления совершенствования цифровой защиты энергорайонов с промышленными потребителями.

Ключевые слова: системы электроснабжения промышленных потребителей, объект распределенной генерации, распознавание режимов, релейная защита и автоматика, имитационное моделирование, многопараметрическая защита, каналы связи, МЭК 61850.

Для цитирования: Лоскутов А.А. Особенности распознавания режимов функционирования систем электроснабжения промышленных потребителей с объектами распределенной генерации // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 1. С. 50-69. EDN SHGEBY

SPECIFIC FEATURES OF RECOGNIZING MODES FUNCTIONING OF POWER SUPPLY SYSTEMS FOR INDUSTRIAL CONSUMERS WITH DISTRIBUTED GENERATION FACILITIES

A.A. Loskutov

ORCID: **0000-0003-2228-596X** e-mail: **loskutov.nnov@gmail.com**

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

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. In the current conditions of the electricity and power market, many medium and large industrial enterprises choose their own distributed generation facilities for their power supply systems. As a rule, these are gas turbine, gas piston, diesel generating units, in some cases solar, wind power plants of inverter connection. Owners of industrial enterprises implement innovative technical solutions aimed at increasing the efficiency of power supply and the technological process associated with the use of power electronic converters, voltage regulators on power electronic elements. Industrial consumers often have a non-linear load with a variable work schedule. These circumstances significantly affect the change in the operating modes of power supply systems of industrial consumers, making them difficult to recognize for relay protection and automation devices. The article analyzes the problems of modern power supply systems with distributed generation facilities, features of the modes and causes of complex detection of accidents and damage locations. The ways to solve problems and directions for improving the digital protection of energy districts with industrial consumers are proposed and substantiated.

Keywords: power supply systems for industrial consumers, distributed generation facility, mode recognition, relay protection and automation, simulation modeling, multiparameter protection, communication channels, IEC 61850.

For citation: A.A. Loskutov, "Specific features of recognizing modes functioning of power supply systems for industrial consumers with distributed generation facilities", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 50-69, 2025. EDN SHGEBY

I. Введение

Развитие экономики, производства и современных технологий во многих странах мира вызывает потребность в увеличении потребляемой электрической энергии и мощности. По экспертным оценкам, до 2036 г. стоит ожидать изменения в энергосистеме России и, в частности, в системах электроснабжения промышленных потребителей (СЭПП), связанных с децентрализацией и цифровизацией. В соответствии с [1], а также Проектом генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2042 года, планируется введение большого объема генерирующего оборудования на

базе распределенной генерации (газотурбинные, газопоршневые, дизельные генерирующие установки) и возобновляемых источников (солнечные, ветровые) энергии (ВИЭ): 4,5 ГВт до 2030 г., 14 ГВт до 2036 г., 19 ГВт до 2042 г. [2]. По прогнозу агентства *IRENA* к 2030 году ежегодный мировой прирост электроэнергетических мощностей, на базе ВИЭ, будет составлять 1000 ГВт [2, 3]. При этом, по данным наблюдений, объектами внедрения данных источников являются чаще всего средние и крупные промышленные предприятия, где требуются новые электрические мощности и обеспечение непрерывного, надежного электроснабжения.

Технология распределенной генерации (РГ) набирает популярность в связи с постоянно растущим спросом на энергию, истощение ресурсов ископаемого топлива и ориентацией на чистую энергию. Размещение объектов РГ (ОРГ) целесообразно выбирать по возможности в близости от узлов электропотребления с интеграцией в распределительные сети до 110 кВ, образуя при этом энергорайоны. Установка ОРГ в СЭПП изменяет ее поведение, позволяя использовать преимущественно меньших по размеру и более гибких ресурсов. Таким образом, привычные условия работы распределительной электрической сети 6-110 кВ с ОРГ изменяются и становятся более сложными, что влияет на распознавание аварийных и нормальных режимов работы и, как следствие сказывается на эффективности работы устройств релейной защиты и автоматики (РЗА).

Статья посвящена анализу проблем и тенденций, связанных с распознаванием режимов СЭПП с промышленными и бытовыми потребителями. Приводится обзор современных решений, предложенных в отечественной и мировой технической литературе. Предлагается концептуальный вариант развития цифровой защиты и автоматики для СЭПП, имеющий два независимых уровня, соответствующих традиционному подходу к РЗА.

II. Особенности режимов работы систем электроснабжения промышленных потребителей с объектами распределенной генерации

В России организация СЭПП и энергорайонов с ОРГ получила распространение на крупных промышленных предприятиях, в сельских районах с гражданской инфраструктурой, объектах нефтяной и газовой отрасли, в местах добычи полезных ископаемых, где в качестве основных источников РГ используются газотурбинные (ГТУ), газопоршневые (ГПУ) и дизельные (ДГУ) генерирующие установки (ГУ).

На рис. 1 представлен пример электрической схемы СЭПП с ОРГ для нефтегазодобывающей компаний. Схема включает три ОРГ мощностью до 25МВА, подключенных на напряжение 10 кВ, способных работать, как в островном режиме, так и параллельно с электроэнергетической системой (ЭЭС). Схема электроснабжения имеет три класса напряжения: 220 кВ, 110 кВ, 10 кВ.

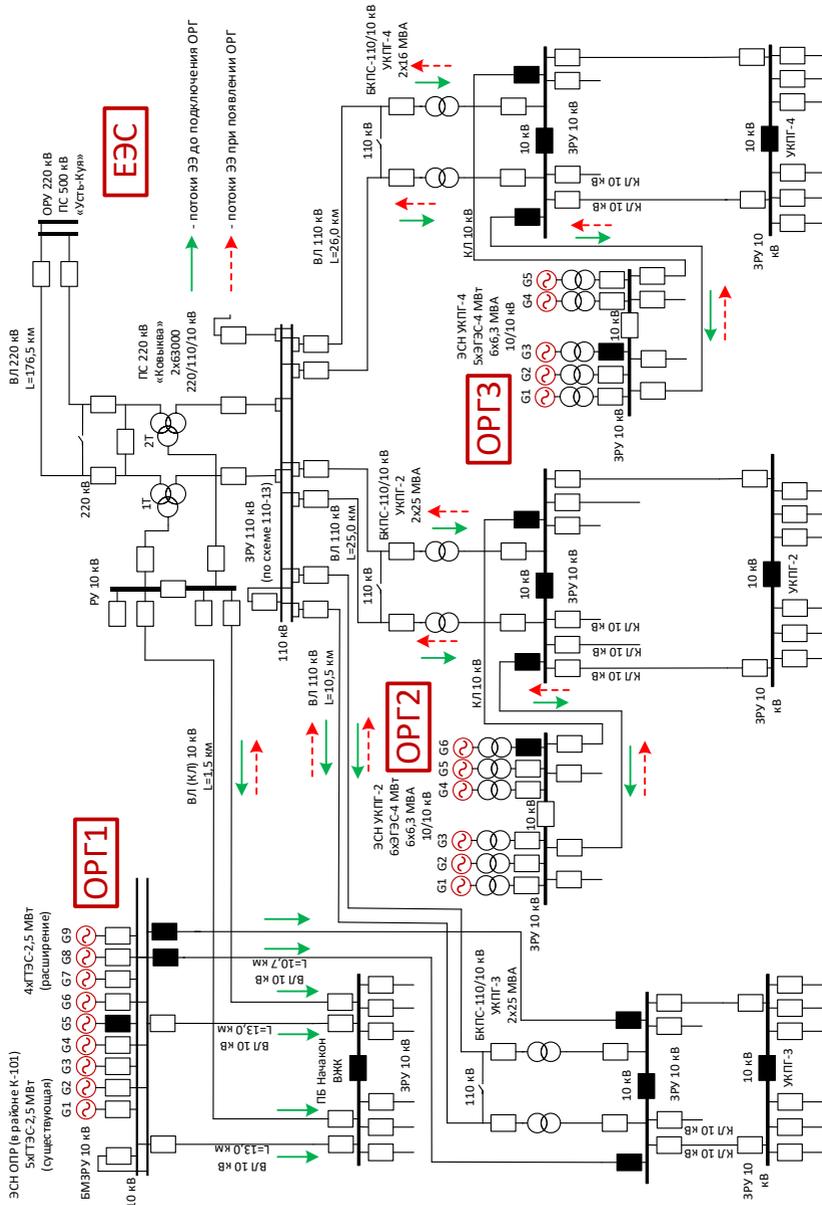


Рис. 1. Пример электрической схемы СЭП с ОРГ газодобывающей компании

Fig. 1. An example of an electrical circuit diagram of an industrial consumer's power supply system with distributed generation facilities

Соединение энергорайона с централизованной ЭЭС происходит через ПС 220/110/10 кВ, а ОРГ подключены к секциям шин РУ 10 кВ распределительных понизительных ПС 110/10 кВ. Помимо ОРГ с ГТУ, схема энергорайона имеет широкий перечень элементов: воздушные линии электропередачи (ЛЭП) 10-220 кВ, КЛ 10 кВ, автотрансформаторы 220/110/10 кВ, трансформаторы 110/10 кВ, выключатели 220 кВ, 110 кВ, 10 кВ, РУ с секциями шин 10 кВ, 110 кВ, 220 кВ и другое оборудование. Каждый из этих элементов имеет свои особенности работы, технологический режим, подвержен повреждениям и требует индивидуального подхода к организации защиты и автоматики. Топология СЭПП может меняться и переключение режимов работы происходит посредством коммутации соответствующих выключателей.

Несмотря на свою перспективность, применение ОРГ порождает в энергорайонах не характерные для классической распределительной сети сложные электрические режимы. При анализе режимов работы СЭПП с ОРГ следует принимать во внимание следующие аспекты.

Контроль и управление напряжением и частотой

В СЭПП генерируемая активная и реактивная мощность должны быть в сбалансированном состоянии с потребляемой нагрузкой, учитывая потери в ЛЭП. Дисбаланс выработки и потребления мощности в СЭПП вызывает отклонение промышленной частоты (50 Гц) от нормируемого значения по ГОСТ 32144-2013. Контроль и управление напряжением и частотой обеспечивает нормируемое их значение путем регулирования активной и реактивной мощности, вырабатываемой или потребляемой. Особенностью режимов работы СЭПП является возможность работы нескольких ОРГ в островном режиме. Важным является регулирование напряжения во время работы сети с использованием зависимости напряжения от реактивной мощности. Каждый источник РГ имеет собственную характеристику падения частоты сети во время изолированной работы. Актуален вопрос регулирования частоты, поскольку для многих ОРГ, особенно СЭС и ВЭС с инверторным включением несвойственно наличие инерционного отклика и значительного резерва по активной мощности. Для СЭПП с такими ОРГ наблюдается увеличение скорости изменения частоты (df/dt) и величины максимального его отклонения [4]. Причем увеличение доли такой несинхронной генерации приводит к увеличению скорости изменения частоты:

$$\frac{df}{dt} \sim \frac{1}{T_j / 2}, \quad (1)$$

где T_j – механическая постоянная инерции вращающихся масс турбины генератора, которая определяет время, в течение которого скорость ротора изменяется от нуля до номинальной под действием номинального избыточного момента и при постоянном моменте сопротивления:

$$T_j = \frac{2,74 \cdot GD^2 \cdot n^2}{1000 \cdot S_{\text{ном}}}, \quad (2)$$

где GD^2 – маховой момент, $\text{т} \cdot \text{м}^2$; G – масса подвижных элементов; D – диаметр подвижных масс; n – скорость вращения, об/мин; $S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность генератора, кВА.

Скорость переходного процесса становится гораздо быстрее, чем в традиционных энергосистемах с высокой инерцией, что сильно влияет на работу режимной и противоаварийной автоматики, а также релейной защиты (рис. 2).

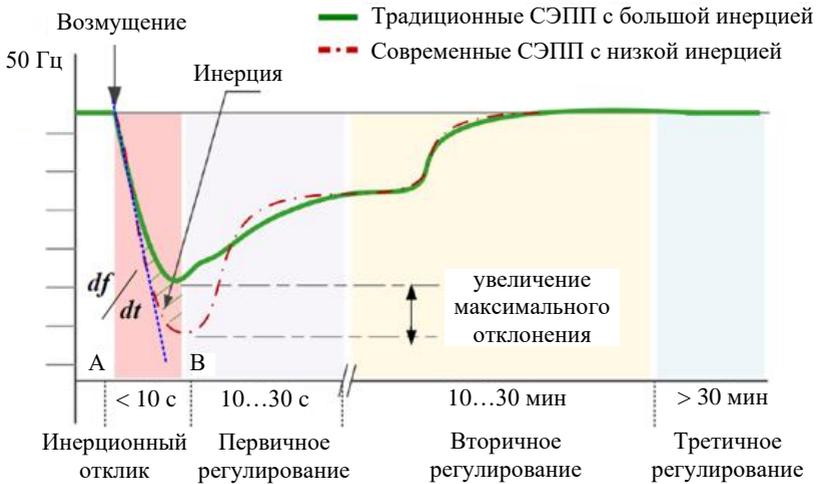


Рис. 2. Влияние инерции на скорость изменения частоты

Fig. 2. The effect of inertia on the rate of change of frequency

Для примера в некоторых странах мира скорость изменения частоты составляет более 6 Гц/с. Это, как правило, приводит к резкому отключению всех генерирующих установок и крупным авариям [4-6]. Таким образом, требуется разработка быстродействующих алгоритмов анализа параметров и принятия решения.

Дисбаланс мощности

Нарушение баланса мощности возникает во время процесса перехода от параллельной работы с сетью в изолированный (островной) режим, когда СЭПП получает часть мощности от основной ЭЭС или отдает мощность в ЭЭС до отключения. Для поддержания баланса мощности при малой инерционности некоторых генерирующих установок (например, ГПУ с небольшими значениями механической постоянной инерции $T_j = 1 \dots 2$ с) [6], а также медленного динамического отклика источников целесообразно использование накопителей электроэнергии [7]. При возвращении работы СЭПП из островного режима в режим с подключением к сети следят за тем, чтобы величина и фаза напряжений СЭПП и сети на синхронизирующем устройстве были равны. Для выполнения таких коммутаций следует использовать быстродействующий выключатель [8-10] и устройство управления выключателем соответствующей чувствительности.

Показатели качества электрической энергии

Гармонические токи, отличные от промышленной частоты и которые могут возникать в СЭПП с ОРГ (особенно при интеграции в них ВИЭ с силовыми электронными преобразователями), должны быть сокращены для снижения гармонических потерь, уменьшения помех в сетях телемеханики, исключения ложной работы релейной защиты и автоматики.

В качестве примера на рис. 3 показаны трехфазные сигналы напряжения и тока при подключении солнечной электростанции через инвертор для случая значительного затенения (~50 %) фотоэлектрических панелей [11].

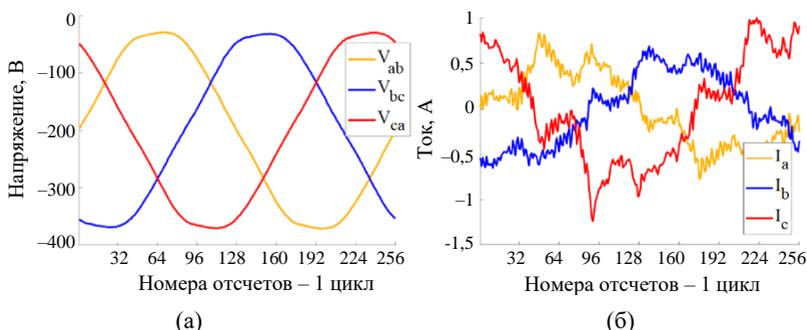


Рис. 3. Измеренное напряжение фаза-фаза (а) и фазный ток (б) в точке общего присоединения

Fig. 3. Measured phase-to-phase voltage (a) and phase current (b) at the point of common connection

Оценка сигнала напряжения (рис. 3а) показывает, что пятая гармоника составляет 2,6%, что является самым высоким среди всех остальных гармонических составляющих, не превышающих 1 % (рис. 4а).



(а)



(б)

Рис. 4. Оценка гармонического состава напряжения (а) и тока (б) [11]

Fig. 4. Evaluation of the harmonic composition of voltage (a) and current (b) [11]

Оценка гармонического состава сигнала тока (рис. 4б) показывает, что коэффициент нелинейных искажений (THD_i) равен 30,52 %. Пятая гармоническая составляющая тока для этого сценария составила самый высокий процент: 21,40 % в фазе А, 18,25 % в фазе В и 19,66 % в фазе С. Определено, что на поведение коэффициента THD_i влияет процент затенения фотоэлектрических панелей. Особенности отклонения ПКЭ проявляются в островном режиме работы СЭПП, что может повлиять на функционирование РЗА [6, 11].

Целесообразно применение методов компенсации гармоник [8, 12, 13]. Кратковременные колебания параметров режима обусловлены стохастической выработкой электроэнергии объектами ВИЭ.

Изменения в топологии сети

Из-за подключения/отключения генераторов и нагрузок, связей между узлами нагрузок, прерывистости генерации совокупности ВИЭ (солнечных, ветровых и пр.) в СЭПП и энергорайонах возможны регулярные изменения топологии сети, или схемно-режимной ситуации.

Экономические аспекты

В связи с возможностью работы в различных электрических режимах, динамичного управления, способностью интеграции разнородных источников РГ и накопителей электроэнергии, требуется обеспечение не только высокой надежности и безопасности эксплуатации оборудования, но и также коммерческой эффективности СЭПП.

Переходные процессы

В островном режиме работы СЭПП с ОРГ переходные процессы протекают значительно быстрее, что обусловлено меньшими значениями T_j (в 3...10 раз) по сравнению с крупными централизованными источниками электроэнергии. Например, на рис. 5 показано влияние постоянной инерции генератора T_j на качания после короткого замыкания (КЗ), которое происходит в СЭПП, в момент времени 70 секунд. Данные получены по результатам имитационного моделирования и подтверждаются реальными осциллограммами. При меньшем значении постоянной инерции генератора имеют место качания большей амплитуды, однако быстро затухающие из-за более легкой подвижной части генератора [14].

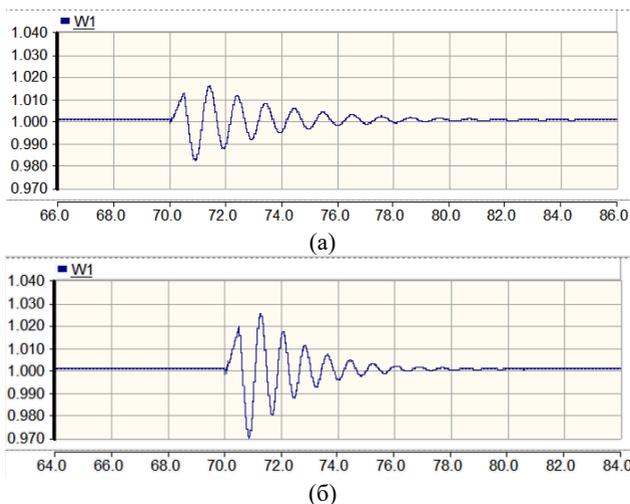


Рис. 5. График скорости вращения ротора генератора при $T_j = 8$ с (а); $T_j = 5$ с (б)

Fig. 5. Graph of the generator rotor speed at $T_j = 8$ s (a); $T_j = 5$ s (b)

Генераторы на основе двигателя внутреннего сгорания характеризуются низкой скоростью набора и сброса нагрузки, что влияет на отклонения параметров режима от нормируемых значений. Характеристики и параметры нагрузки оказывают существенное влияние на переходные процессы,

в связи с сопоставимостью суммарных мощностей ГУ и нагрузки, а также малых взаимных сопротивлений.

Устойчивость функционирования СЭПП

Наиболее часто присоединяемые ОРГ к узлам нагрузки работают в сбалансированных по нагрузке и генерации СЭПП и энергорайонах. Особенно это характерно для электроснабжения промышленных предприятий, на кустовых площадках газо- и нефтедобывающей отрасли в системах электроснабжения жилых микрорайонов. Проблема статической устойчивости возникает в случае параллельной работы ГУ с ЭЭС (рис. 6). Разного рода возмущения, возникающие в СЭПП, приводят к нарушению исходного установившегося режима и, соответственно, к колебаниям, ввиду изменения баланса мощности [14].

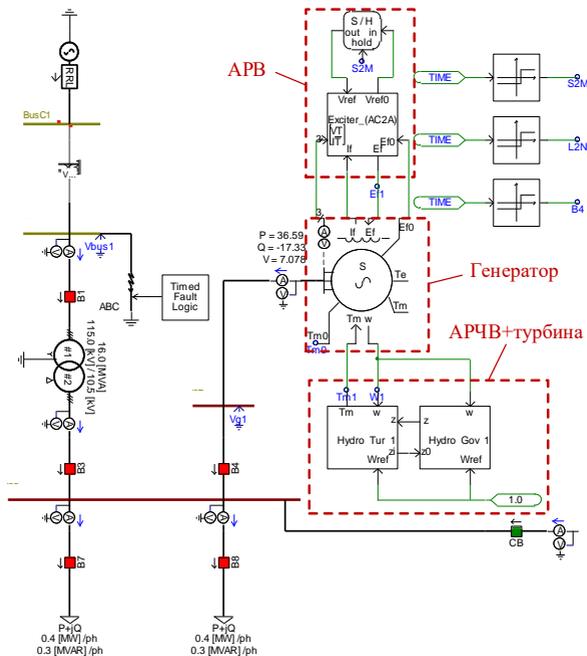


Рис. 6. Фрагмент модели СЭПП с ОРГ в PSCAD

Fig. 6. Model of the power supply system of industrial consumers with a distributed generation facility in PSCAD

Колебания роторов ГУ приводят к нарушению баланса моментов на валу турбины и электромагнитного момента ротора генератора. При этом возникают ускоряющие и тормозящие моменты на валу ГУ и, как следствие,

недопустимые отклонения параметров режима. Наличие слабых связей СЭПП с ЭЭС с низкой пропускной способностью обуславливает низкий запас статической устойчивости. Нарушение динамической устойчивости возникает в СЭПП и энергорайонах при больших возмущениях таких, как КЗ, отключение важных ЛЭП, отключение крупных блоков ГУ, не связанных с КЗ.

В качестве примера, на рис. 7 представлены осциллограммы смоделированного в PSCAD режима при возникновении непродолжительного трехфазного КЗ (длительность 0,5 с) в питающей сети 110 кВ СЭПП с ОРГ (рис. 6). Момент возникновения КЗ соответствует 70-й секунде. После непродолжительного начального переходного процесса все исследуемые величины выходят на установившееся значение. До возникновения КЗ генератор увеличивает выдаваемую активную мощность, соответственно на этом же промежутке времени активная мощность, забираемая из ЭЭС, уменьшается. В результате изменения выдаваемых генератором и системой активных мощностей угол δ плавно уменьшился до момента возникновения КЗ (70 с), что является нормой. После возникновения КЗ начинаются незатухающие колебания мощностей (P , Q), угла δ и напряжений на шинах 10 кВ.

Рассматриваемый режим является асинхронным ходом и не допустим по условию устойчивости. Таким образом, время устранения КЗ равное 0,5 с является слишком большим. Требуется обеспечение максимального быстродействия РЗА.

Функционирование релейной защиты и автоматики

Интеграция ОРГ в СЭПП приводит к изменению потоков мощности, увеличению или снижению уровня тока КЗ, меняя привычные требования к РЗА. Также ощутимо влияние различных типов источников РГ. Их совокупное воздействие создает проблемы при обеспечении чувствительности и быстродействия традиционных токовых и дистанционных защит. Плохие показатели качества ЭЭС, имеющие место в СЭПП, могут являться причиной ложных срабатываний устройств РЗА и сбоев их работе. Вопросы самовосстановления функционирования элементов СЭПП с помощью сетевой автоматики (АПВ, АВР, УРОВ) также имеют существенные отличия в различных схемно-режимных условиях ее работы. Подробный анализ проблем РЗА представлен автором в [14].

III. Организация системы защиты согласно МЭК 61850 при наличии широкополосных каналов связи

Анализ опыта решений в РЗА свидетельствует, что основные алгоритмы РЗА принципиально не изменились за последние десятилетия и, по сути, являются цифровыми аналогами электромеханических устройств [14].

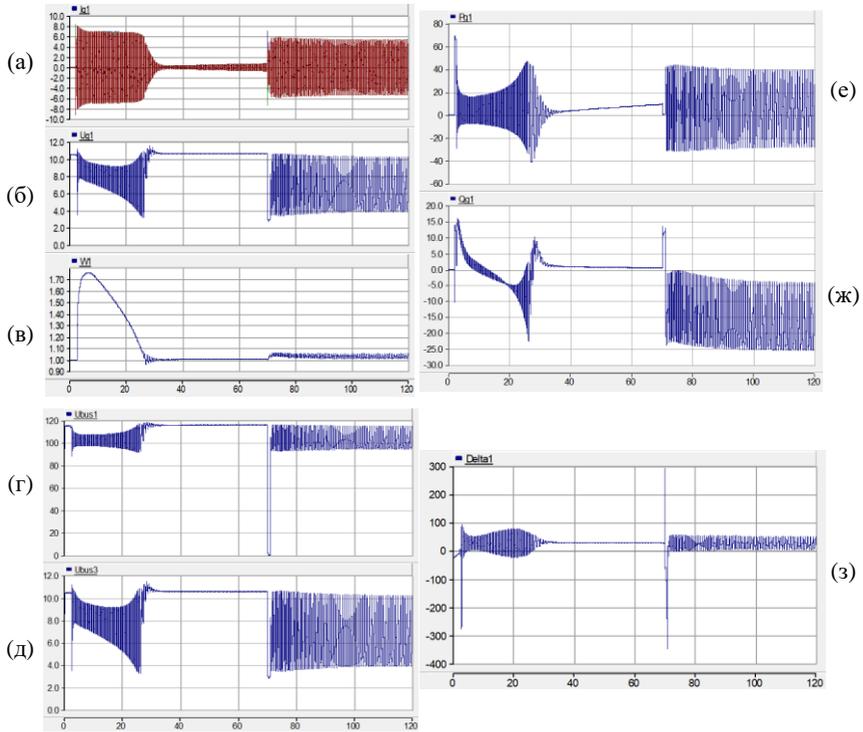


Рис. 7. Графики основных величин для смоделированного режима:
 ток на присоединении ОРГ (а); напряжение на шинах ОРГ (Bus2) (б);
 скорость вращения ротора генератора (в); напряжение на шине 110 кВ (Bus1) (г);
 напряжение на шине 10 кВ (Bus3) (д); активная мощность,
 выдаваемая генератором (е); реактивная мощность, выдаваемая генератором
 (ж); угол δ между векторами ЭДС генератора и напряжения системы (з)

Fig. 7. Graphs of the main quantities for the simulated mode:
 current at the distributed generation source connection (a); voltage on the source
 buses (Bus2) (b); generator rotor speed (c); voltage on the 110 kV (Bus1) (d);
 voltage on the 10 kV (Bus3) (e); active power generated by the generator (f);
 reactive power generated by the generator (g);
 angle δ between the vectors of the generator EMF and the system voltage (h)

На сегодняшний момент не сформирован комплексный подход к развитию системы РЗА для СЭПП в условиях изменения сетевой конъюнктуры, увеличения масштабов внедрения ВИЭ, элементов силовой электроники, ОРГ.

В то же время современные микропроцессорные устройства РЗА с поддержкой МЭК 61850 позволяют иметь доступ к большому количеству информации о защищаемом или управляемом объекте в режиме реального времени. Однако вопросы массового использования данных измерений, накопления статистических данных в узлах электрической сети, передачи мгновенных значений (*SV*-потоков) наблюдаемых параметров по каналам связи требуют глубокого изучения и проработки.

В условиях работы СЭПП, компактно находящейся на некоторой ограниченной территории, возможны варианты реализации централизованных цифровых РЗА на разных программно-аппаратных платформах, поскольку становится возможным получение синхронизированных измерений по МЭК 61850-9-2(*SV*) из разных точек электрической сети. Наличие широкополосного канала связи по волоконно-оптической линии связи дает возможность организации защиты абсолютной селективности (рис. 8).

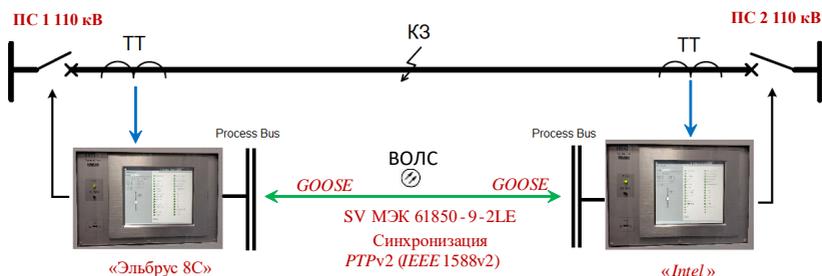


Рис. 8. Структурная схема подключения устройств РЗА на разных архитектурах

Fig. 8. Structural diagram of the connection of relay protection and automation devices on different architectures

В НГТУ совместно с промышленными партнерами, при участии автора была проведена научно-исследовательская работа по разработке опытных образцов РЗА на разных архитектурах («Эльбрус-8С» (МЦСТ) и «Intel» (x86)) с последующими лабораторными и натурными функциональными испытаниями [15]. Обмен информацией между полуккомплектами РЗА осуществлен по МЭК 61850-9-2(*SV*), что актуально для защит при внедрении ОРГ. Структурная схема подключения терминалов РЗА при опытно-промышленной эксплуатации приведена на рис. 10.

IV. Концептуальная структура цифровой РЗА для СЭПП с ОРГ

Традиционные требования к РЗА (селективность, быстродействие, чувствительность и надежность) правильно отражают ее техническое совершенство и, при этом, полностью абстрагируются от конкретных реализаций устройств и алгоритмов РЗА. Для безусловного обеспечения селективности

систему РЗА перспективной интеллектуальной СЭПП предлагается выполнять двумя независимыми уровнями, соответствующими традиционному взгляду на РЗА. В качестве основного варианта предлагаемой структуры РЗА выбран следующий (рис. 9):

1) *первый уровень* включает дифференциально-логическую защиту с использованием сети связи по МЭК 61850 [16]. Защита построена на распределенных интеллектуальных электронных устройствах (ИЭУ) всех соединений электросети. Но все ИЭУ, реализующие дифференциально-логическую РЗА, активно взаимодействуют друг с другом во всех зонах защиты, адаптируясь под топологию сети, ее режимы, при отказах элементов. Принцип обмена данными изображен на рис. 8;

2) на *втором уровне* используются многопараметрические защиты, основанные на статистических принципах [17]. Алгоритмы защиты и ее аппаратное построение аналогично традиционным ступенчатым ДЗ и МТЗ. Защита отличается от существующих ДЗ и МТЗ пусковым органом, позволяющим достигать большей чувствительности РЗА за счет использования множества измерений и произвольным выбором измеряемых параметров режима, а также возможностью использования инструмента автоматического расчета уставок, интегрированного в программно-аппаратный комплекс защиты [18].

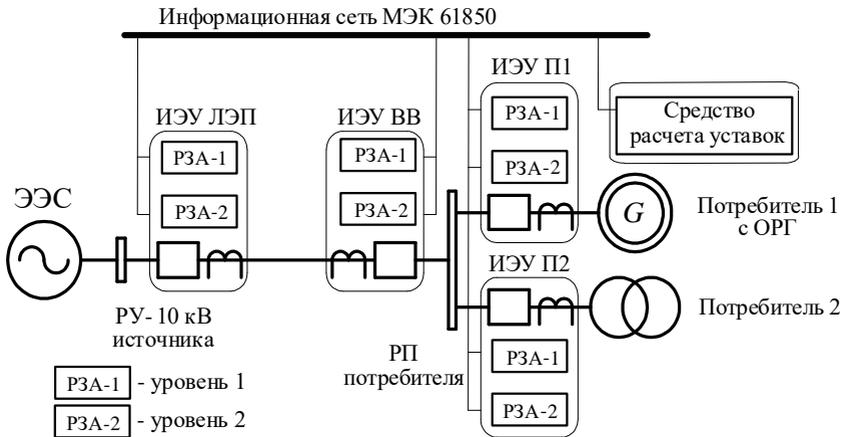


Рис. 9. Организация двухуровневой структуры интеллектуальной системы РЗА для фрагмента СЭПП с ОРГ [18]

Fig. 9. Organization of a two-level structure of an intelligent relay protection and automation system for a fragment of the power supply system with distributed generation [18]

Применение протокола МЭК 61850 позволяет непрерывно настраивать и адаптировать ИЭУ под существующие режимы работы СЭПП с помощью специализированных алгоритмов работы, расчетных и обучающих модулей. При работоспособной информационной сети, исправных трансформаторах тока, трансформаторах напряжения, интеллектуальных электронных устройствах все повреждения на участках сети будут отключаться мгновенно дифференциально-логической защитой. Резервирование реализуется многократно: и смежными выключателями дифференциально логической защиты, и ступенями многопараметрической защиты.

Под многопараметрической защитой понимается защита, использующая более чем один информационный параметр. Это не только значение тока или полного сопротивления, а целый вектор параметров, извлекаемых из мгновенных значений тока и напряжения в месте наблюдения за режимом (рис. 10) [19].

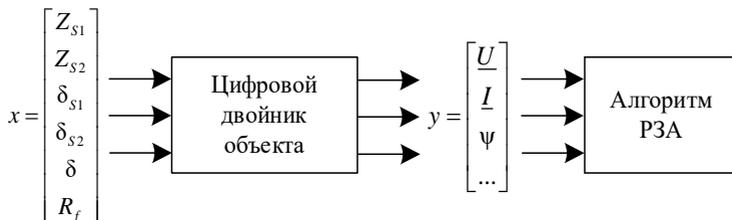


Рис. 10. Принцип использования имитационного моделирования при заданных объектных параметрах x , определяющий вектор входных параметров y для алгоритма РЗА [19]

Fig. 10. The principle of using simulation modeling for given object parameters x , determining the vector of input parameters y for the relay protection algorithm [19]

Также алгоритмы работы многопараметрической защиты используют, так называемый, информационный подход, основанный на многократном имитационном моделировании всевозможных режимов работы СЭПП с последующей статистической обработкой результатов моделирования специализированными методами [20].

V. Заключение

Современные системы электроснабжения промышленных предприятий характеризуются: использованием объектов распределенной генерации, в том числе возобновляемых источников энергии, с малыми постоянными времени; применением элементов силовой электроники; регулярными изменениями топологии распределительной сети; нелинейной промышленной нагрузкой; элементами технологического управления, критичными к отклонениям показателей качества электроэнергии и другими особенностями.

Указанные факторы существенно влияют на скорость протекания переходных процессов (до 10 раз быстрее), а также на распознавание аварийных режимов устройствами РЗА.

Для обеспечения надежного функционирования СЭПП предложена концептуальная двухуровневая структура организации цифровой РЗА, позволяющая использовать: современные каналы связи по МЭК 61850; многопараметрический подход с универсальными пусковыми органами; обучающий модуль, формирующий области существования нормальных и аварийных режимов по результатам предварительного имитационного моделирования и дообучающийся в процессе эксплуатации. Предложенная структура позволяет обеспечить лучшую распознающую способность, повысить надежность и быстродействие защиты, а также адаптироваться к изменяющимся сложнораспознаваемым режимам работы СЭПП.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00362, <https://rscf.ru/project/25-29-00362/>

© Лоскутов А.А., 2025

Поступила в редакцию 14.02.2025

Принята к публикации 28.02.2025

Received 14.02.2025

Accepted 28.02.2025

Библиографический список

- [1] Приказ Минэнерго России от 29.11.2024 г. № 2328 «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетических систем России на 2025-2030 годы» // Официальный сайт Минэнерго России. [Электронный ресурс]. URL: https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/808/Prikaz-ME-ot-29.11.2024-_2328-ob-utverzhenii-SiPR-EES-na-2025_2030-PUBLIKATSIYA.pdf (дата обращения 01.02.2025).
- [2] Общественное обсуждение Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2042 года // Системный оператор единой энергетической системы. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.so-ups.ru/future-planning/public-discussion-genshema/2042/> (дата обращения 01.02.2025).
- [3] Годовая выработка возобновляемой электроэнергии должна вырасти в три раза к 2030 году // IRENA – International Renewable Energy Agency. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.irena.org/News/pressreleases/2023/Jun/Annual-Renewable-Power-Must-Triple-by-2030-RU> (дата обращения 01.02.2025).
- [4] Суворов А.А., Аскарлов А.Б., Рудник В.Е., Разживин И.А., Андреев М.В., Бай Ю.Д. Верификация численных расчетов электромеханических переходных процессов при оценке устойчивости электроэнергетических систем с генерирующими объектами, использующими ВИЭ // Электрические Станции. 2022. № 1 (1086). С. 25-37. DOI: 10.34831/2022.1086.1.004

- [5] Разживин И.А., Суворов А.А., Андреев М.В., Рудник В.Е., Гусев А.С. Исследование влияния синтетической инерции на динамическую устойчивость электроэнергетических систем // *Электричество*. 2022. № 8. С. 16-26. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-8-16-26
- [6] Илюшин П.В., Куликов А.Л. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией. Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. 364 с.
- [7] Нестеренко Г.Б., Армеев Д.В., Гладков Д.С., Зырянов В.М., Мячина А.В. Исследование эффективности применения системы накопления электрической энергии в составе автономной гибридной энергоустановки для регулирования частоты // *Электроэнергия. Передача и Распределение*. 2022. № 6 (75). С. 76-83.
- [8] Shahzad U., Kahrobaee S., Asgarpoor S. Protection of distributed generation: challenges and solutions // *Energy and Power Engineering*. 2017. № 9 (10). P. 614-653. DOI: 10.4236/epe.2017.910042
- [9] Shahzad U., Asgarpoor, S. A comprehensive review of protection schemes for distributed generation // *Energy and Power Engineering*. 2017. № 09 (08). P. 430-463. DOI: 10.4236/epe.2017.98029
- [10] Venkataramanan G., Illindala, M. Small signal dynamics of inverter interfaced distributed generation in a chain microgrid // 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007, Tampa, FL, USA: IEEE, 2007. P. 1-6. DOI: 10.1109/PES.2007.385971
- [11] Pinzon-Quintero O., Gaviria-Ospina D., Parrado-Duque A., Rodríguez-Velasquez R., Osma-Pinto G. Assessment of power quality parameters and indicators at the point of common coupling in a low voltage power grid with photovoltaic generation emulated // *Electric Power Systems Research*. 2022. № 203. P. 107679. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107679
- [12] Куликов А.Л., Илюшин П.В., Лоскутов А.А., Севостьянов А.А. Обеспечение гарантированного высокого быстродействия автоматической частотной разгрузки в условиях отклонения показателей качества электроэнергии на основе процедуры последовательного анализа Вальда // *Электрические Станции*. 2021. № 4 (1077). С. 41-50. DOI: 10.34831/EP.2021.10.77.4.007
- [13] Куликов А.Л., Севостьянов А.А., Лоскутов А.А., Илюшин П.В. Определение места повреждения воздушных ЛЭП на основе метода наименьших квадратов в условиях отклонения показателей качества электроэнергии от нормативных значений // *Энергия Единой Сети*. 2023. № 3-4 (70). С. 10-19.
- [14] Лоскутов А.А., Куликов А.Л. Современные методы формирования логической части цифровой защиты и автоматики систем электроснабжения промышленных потребителей. Н. Новгород: НГТУ, 2025. – 392 с.
- [15] Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Зинин В.М., Петров А.А. Опытнo-промышленная эксплуатация дифференциальной защиты линии с организацией информационного обмена по протоколу SV (МЭК-61850-9-2) // *Релейщик*. 2024 № 3 (50). С. 12-17.
- [16] Куликов А.Л., Шарыгин М.В. Дифференциально-логический принцип релейной защиты сетей электроснабжения // *Электрические Станции*. 2018. № 3 (1040). С. 37-46.

- [17] Лоскутов А.А., Пелевин П.С., Митрович М. Разработка логической части интеллектуальной многопараметрической релейной защиты // *Электричество*. 2020. № 5. С. 12-18. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-5-12-18
- [18] Шарыгин М.В., Куликов А.Л., Фальков А.А. Автоматизация расчета адаптивной многопараметрической релейной защиты для реконфигурируемых распределительных сетей // *Релейщик*. 2022. № 1 (42). С. 12-16.
- [19] Антонов В.И., Наумов В.А., Мартынов М.В., Мокеев А.В., Попов М.Г. Основы релейной защиты и автоматики интеллектуальной электрической сети. Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 324 с.
- [20] Иванов С.В., Лямец Ю.Я. Метод информационного анализа. Ч. 2. Распознавание замыканий в заданной зоне двухцепной электропередачи // *Известия Академии Наук. Энергетика*. 2016. № 1. С. 47-57.

References

- [1] Order of the Ministry of Energy of Russia dated Nov. 29, 2024 no. 2328 “Ob utverzhdenii skhemy i programmy razvitiya elektroenergeticheskikh sistem Rossii na 2025-2030 gody [On approval of the scheme and program for the development of electric power systems of Russia for 2025-2030]”, *Official website of the Ministry of Energy of Russia*. [Online]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/?partner=19&news-item=utverzhdena-skema-i-programma-razvitiya-elektroenergeticheskikh-sistem-rossii-na-2025-2030-gody> [Accessed: Feb. 1, 2024] (in Russian).
- [2] *Obshchestvennoe obsuzhdenie General'noj skhemy razmeshcheniya ob'ektov elektroenergetiki do 2042 goda [Public discussion of the General scheme for the placement of electric power facilities until 2042]*, Russian Power System Operator. [Online]. Available at: <https://www.so-ups.ru/future-planning/public-discussion-genshema/2042/> [Accessed: Feb. 1, 2024] (in Russian).
- [3] *Annual Renewable Power Must Triple until 2030*, IRENA – International Renewable Energy Agency. [Online]. Available at: <https://www.irena.org/News/pressreleases/2023/Jun/Annual-Renewable-Power-Must-Triple-by-2030> [Accessed: Feb. 1, 2024].
- [4] A.A. Suvorov, A.B. Askarov, V.E. Rudnik, I.A. Razzhivin, M.V. Andreev and Yu.D. Bai, “Validation of numerical calculations of electromechanical transients in assessing the stability of electric power systems with generating facilities using renewable sources of energy”, *Electrical Stations*, vol. 1, no. 1086, pp. 25-37, 2022. DOI: 10.34831/2022.1086.1.004
- [5] I.A. Razzhivin, A.A. Suvorov, M.V. Andreev, V.E. Rudnik and A.S. Gusev, “Studying the influence of synthetic inertia on electric power system transient stability”, *Elektrichestvo*, no. 8, pp. 16-26, 2022. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-8-16-26
- [6] P.V. Ilyushin and A.L. Kulikov, *Avtomatika upravleniya normal'nymi i avarij-nymi rezhimami energorajonov s raspredelyonnoj generaciej [Automation of control of normal and emergency modes of power districts with distributed generation]*. Nizhny Novgorod: RANEPА, 2019 (in Russian).
- [7] G.B. Nesterenko, D.V. Armeev, D.S. Gladkov, V.M. Zyryanov and A.V. Myachina, “Efficiency analysis of electrical energy storage system as part of an autonomous hybrid power plant for frequency control”, *Electric Power. Transmission and Distribution*, vol. 6, no. 75, pp. 76-83, 2022.

- [8] U. Shahzad, S. Kahrobaee and S. Asgarpoor, "Protection of distributed generation: challenges and solutions", *Energy and Power Engineering*, vol. 9, no. 10, pp. 614-653, Sep. 2017. DOI: 10.4236/epe.2017.910042
- [9] U. Shahzad and S. Asgarpoor, "A comprehensive review of protection schemes for distributed generation", *Energy and Power Engineering*, vol. 09, no. 08, pp. 430-463, Aug. 2017. DOI: 10.4236/epe.2017.98029
- [10] G. Venkataramanan and M. Illindala, "Small signal dynamics of inverter interfaced distributed generation in a chain microgrid", in *proc. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, June 24-28, 2007, Tampa, FL, USA, pp. 1-6. DOI: 10.1109/PES.2007.385971
- [11] O. Pinzon-Quintero, D. Gaviria-Ospina, A. Parrado-Duque, R. Rodríguez-Velasquez and G. Osma-Pinto, "Assessment of power quality parameters and indicators at the point of common coupling in a low voltage power grid with photovoltaic generation emulated", *Electric Power Systems Research*, vol. 203, pp. 107679, Feb. 2022. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107679
- [12] A.L. Kulikov, P.V. Ilyushin, A.A. Loskutov and A.A. Sevostyanov, "Wald's sequential analysis to improve under frequency load-shedding performance in case of abnormal power quality indicators", *Electrical Stations*, vol. 4, no. 1077, pp. 41-50, 2021. DOI: 10.34831/EP.2021.10.77.4.007
- [13] A.L. Kulikov, A.A. Sevostyanov, A.A. Loskutov and P.V. Ilyushin, "Determining the fault location for overhead power lines based on the least squares method in conditions of deviation of power quality indicators from standard values", *Energy of Unified Grid*, vol. 3-4, no. 70, pp. 10-19, 2023.
- [14] A.A. Loskutov and A.L. Kulikov, *Sovremennyye metody formirovaniya logicheskoy chasti cifrovoy zashchity i avtomatiki sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh potrebitелей [Modern methods of forming the logical part of digital protection and automation of power supply systems of industrial consumers]*. N. Novgorod: NNSTU, 2025 (in Russian).
- [15] A.L. Kulikov, A.A. Loskutov, V.M. Zinin and A.A. Petrov, "Opytno-promyshlennaya ekspluatatsiya differentsial'noy zashchity linii s organizatsiej informatsionnogo obmena po protokolu SV (MEK-61850-9-2) [Pilot-industrial operation of differential protection of a line with organization of information exchange according to the SV protocol (IEC-61850-9-2)]", *Relejschik [Relayman]*, vol. 3, no. 50, pp. 12-17, 2024 (in Russian).
- [16] A.L. Kulikov and M.V. Sharygin, "Differential-logic principle protection of power networks", *Electrical Stations*, vol. 3, no. 1040, pp. 37-46, 2018.
- [17] A.A. Loskutov, P.S. Pelevin and M. Mitrovich, "Development of the logic part for intelligent multiparametric relay protection", *Elektrichestvo*, no. 5, pp. 12-18, 2020. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-5-12-18
- [18] M.V. Sharygin, A.L. Kulikov and A.A. Falkov, "Automation of calculation of adaptive multi-parameter relay protection for reconfigurable distribution networks", *Relejschik [Relayman]*, vol. 1, no. 42, pp. 12-16, 2022 (in Russian).
- [19] V.I. Antonov, V.A. Naumov, M.V. Martynov, A.V. Mokeev and M.G. Popov. *Osnovy relejnoj zashchity i avtomatiki intellektual'noj elektricheskoy seti [Fundamentals of relay protection and automation of intelligent electrical networks: monograph]*. Moscow, Vologda: Infra-Engineering, 2023 (in Russian).

- [20] S.V. Ivanov and Yu.Ya. Lyamets, "Informational analysis method. P. 2. Fault identification in a given zone of double-circuit power line", *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, no. 1, pp. 47-57, 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ
INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Лоскутов Антон Алексеевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Anton A. Loskutov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.