



СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Тухватуллин Л.Т.¹, Исаков Р.Г.^{1,2}

¹Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева–КАИ, г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
tukhvatullinlt@stud.kai.ru, ruslanisakov@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Развитие современной промышленности неразрывно связано с внедрением большого количества разнообразных электрических аппаратов и сложных электронных устройств. Данный процесс неизбежно сопровождается значительным ростом потребления электроэнергии. Следовательно, возникает необходимость в бесперебойной подаче электропитания на энергообъект. Серьезным препятствием в этом процессе являются провалы напряжения, приводящие к нарушениям работы предприятия и поломке оборудования. ЦЕЛЬ. Провести анализ проблемы обеспечения стабильности напряжения на промышленных предприятиях в контексте провалов напряжения. МЕТОДЫ. Проводится обзор существующих на сегодняшний день инженерных мероприятий по нейтрализации провалов напряжений. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, дано определение понятия провала напряжения, приведены главные характеристики этого явления, такие как глубина и длительность. Представлены данные об основных причинах и последствиях провалов напряжения на предприятиях. Произведен анализ существующих средств и способов по минимизации влияния провалов напряжения на технологический процесс. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Каждый способ по борьбе с провалами напряжения имеет свои достоинства и недостатки. Также следует принимать во внимание, что часть из них воздействует на глубину провала, тогда как другая часть на его длительность. Использование того или иного метода должно обосновываться исходя из требований и специфики конкретного электрооборудования, при этом данные мероприятия должны согласовываться с другими технологическими процессами на этапе проектирования.

Ключевые слова: провалы напряжения; бесперебойное электроснабжение; стабильность напряжения

Для цитирования: Тухватуллин Л.Т., Исаков Р.Г. Способы повышения стабильности напряжения в системе электроснабжения промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 82-101. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-82-101.

WAYS TO IMPROVE VOLTAGE STABILITY IN THE POWER SUPPLY SYSTEM OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

Tukhvatullin L.T.¹, Isakov R.G.^{1,2}

¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI, Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
tukhvatullinlt@stud.kai.ru, ruslanisakov@yandex.ru

Abstract: The growth of modern industry directly connects to the introduction of a wide variety of electrical apparatus and complex electronic devices. This growth inevitably leads to a significant increase in electricity consumption. As a result, industrial facilities require an uninterrupted power supply. Voltage sags present a serious obstacle in this process, causing disruptions in operations and equipment failures, which can lead to costly downtimes and increased maintenance expenses. OBJECTIVE. This study aims to analyze the issue of ensuring voltage stability at industrial enterprises in the context of voltage sags. METHODS. The

research includes an overview of existing engineering measures designed to neutralize voltage sags. These measures encompass both hardware solutions, such as UPS systems and voltage regulators, and software strategies that monitor and manage electrical loads. RESULTS. The article discusses the relevance of the topic, defines voltage sags, and outlines the main characteristics of this phenomenon, including depth and duration. The analysis presents data on the primary causes and effects of voltage sags at various enterprises. It evaluates available means and methods for minimizing the impact of voltage sags on technological processes, thereby enhancing operational efficiency. CONCLUSION. Each method for addressing voltage sags comes with its own advantages and disadvantages. Moreover, some methods influence the depth of the failure while others affect its duration. Users should justify the choice of method based on the specific requirements of each electrical system, ensuring compatibility with other technological processes during the design phase. By thoughtfully applying these strategies, businesses can enhance their operational resilience against voltage disturbances.

Keywords: voltage sags; voltage dips; uninterrupted power supply; voltage stability

For citation: Tukhvatullin L.T., Isakov R.G. Ways to improve voltage stability in the power supply system of industrial enterprises. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (3):82-101. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-82-101.

Введение (Introduction)

В настоящее время основная особенность промышленного производства заключается в том, что установленное технологическое оборудование не может нормально функционировать, если не выполняется требование по бесперебойному электроснабжению [1]. Для предприятий в области нефте- и газодобыче, транспортировке нефти и газа, переработке нефти, химическом производстве, горно-обогатительных производствах, целлюлозно-бумажной промышленности и т.д. перерыв питания на несколько секунд ведет к нарушению непрерывного технологического процесса и последующей остановке производства. На данный момент в нормативной технической документации отсутствуют требования по величине и времени провала напряжения для различных промышленных производств, что приводит к невозможности предъявлять требования к быстрдействию релейной защиты и автоматики системы внешнего и внутреннего электроснабжения.

В соответствии с ГОСТ 32144-2013¹ и IEEE 1159-2009² провал напряжения определяется как снижение среднеквадратичного значения напряжения между 0,1 и 0,9 о.е. и продолжительностью от полупериода до 1 мин. На рис. 1 показано представление провала напряжения, которое характеризуется величиной и продолжительностью провала. Величина провала определяется как самое низкое среднеквадратичное напряжение трех фазных напряжений во время события провала, а его продолжительность — это время, когда напряжение ниже порогового значения 0,9 о.е. во всех трех фазах. Обычно просадки напряжения и кратковременные перебои происходили из-за неисправностей в энергосистеме [2].

Системы электроснабжения промышленных предприятий со сложным технологическим циклом (химическая, нефтедобывающая, нефтеперерабатывающая и т.д.) характеризуется разветвленной структурой, большой долей и мощностью двигательной нагрузки (насосы, компрессоры, вентиляторы и т.д.). При снижении и провалах напряжения в системе электроснабжения необходимо обеспечивать высокую надежность электродвигательной нагрузки в режимах их выбега, автоматическом повторном включении и автоматическом вводе резерва.

Причины и последствия от провалов напряжения в системе электроснабжения промышленных предприятий представлены на рис. 2 [3].

Основной причиной возникновения провалов напряжения в сетях внешнего электроснабжения промышленных предприятий являются однофазные КЗ, составляющие 65 % от общего числа, при этом трехфазные - 5%; двухфазные - 10%; двойных замыканий на землю - 20%. Для сети внутреннего электроснабжения промышленных предприятий 6–10 кВ основными причинами возникновения провалов напряжения являются:

- короткие замыкания в сети 6-10 кВ;

¹ ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

² IEEE 1159-2019 «Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. Рекомендуемая практика мониторинга качества электрической энергии».

- пуск и самозапуск мощных электродвигателей.

Основным видом повреждения в сети 6-10 кВ являются однофазные замыкания на землю с последующим переходом в двухфазное КЗ или двойное замыкание на землю.

По данным мониторинга существующих систем электроснабжения промышленных предприятий общее число провалов напряжения составляет более 100 за год, при этом максимальная длительность провала напряжения составляет 0,1-3 секунд и глубиной провала $(0,65 \pm 0,01) \cdot U_{ном}$ [4].

При развитии современной промышленности требуются всё более сложные механизмы и технологические процессы, а вместе с тем более крупные системы электроснабжения. Например, в литейных алюминиевых производствах для выплавки продукта используется множество емкостей в виде электролизных ванн, потребляющих большое количество электроэнергии [5]. Прерывание электроснабжения в таких предприятиях даже на короткий период времени может привести к браку продукции, поломке оборудования, серьёзным финансовым убыткам и даже гибели людей [5]. Поэтому повышение качества подаваемой электроэнергии является главным условием надежного функционирования промышленных предприятий [6].

Также согласно статистическим данным [7] основные причины нарушения работы технологического оборудования это:

- 49% провалы напряжения
- 27% механический износ оборудования
- 16% неблагоприятные внешние условия
- 8% программные сбои

Как видно из приведенных цифр, на долю провалов напряжения приходится почти половина всех рабочих неисправностей оборудования. На основе приведенной информации можно сделать вывод о том, что одной из основных проблем электроснабжения предприятий являются провалы напряжения, которые создают аварийные ситуации в системе. Поэтому на сегодняшний день поддержание стабильности напряжения в сетях электроснабжения актуально для многих ведущих отраслей промышленности.

Целью настоящей работы является теоретическое обобщение научной проблемы, связанной со стабильностью напряжения на промышленных предприятиях.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Провести литературный обзор современных способов повышения стабильности напряжения систем электроснабжения производств.
2. Проанализировать и сравнить их основные характеристики.
3. На основе полученной информации определить наиболее перспективный подход к решению проблемы стабилизации напряжения.

Литературный обзор (Literature Review)

Провал напряжения определяется как временное уменьшение напряжения в конкретной точке электрической системы ниже установленного порогового значения [8]. Обычно они имеют прямоугольную форму и характеризуются магнитудой и длительностью. На рисунке 1 изображен пример формы провала напряжения [9].

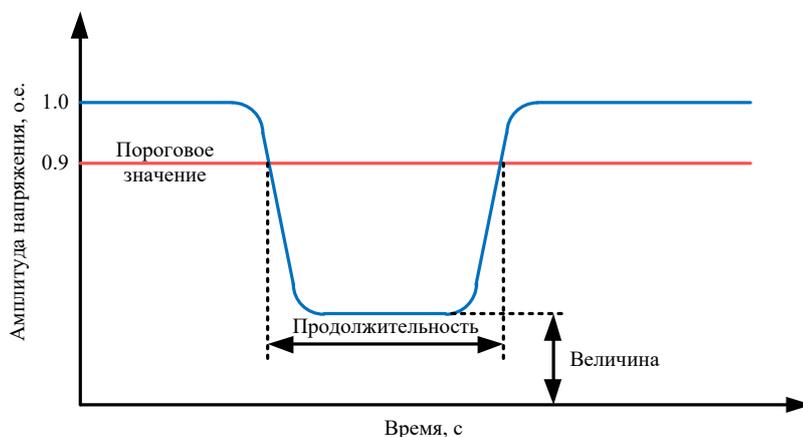


Рис. 1. Пример типичного провала напряжения *Fig. 1. An example of a typical voltage dip*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Основными характеристиками указанной помехи являются [10]:

- 1) Понижение напряжения электроэнергии ниже значения $0,9 U_{ном}$, где

$U_{\text{ном}}$ – номинальное значение напряжения. Провал характеризуется как нарушение в случае провала напряжения более 10% от номинального [9].

2) Время, измеренное в момент провала среднеквадратичного напряжения ниже порогового значения (90% номинального) до момента, когда оно поднимается выше него называется длительностью провала. Оно варьируется от десяти миллисекунд до 1 минуты [9].

Согласно [11] основными причинами провалов напряжения в электрических сетях могут быть:

1. Электрические неисправности. Короткие замыкания, замыкания между фазами и замыкания между фазой и землей в системе распределения электроэнергии являются основными причинами провалов напряжения. Они возникают в сетях внешнего электроснабжения промышленного предприятия (ЭПП) напряжением 35-500 кВ и в сетях внутреннего ЭПП напряжением 6-10 кВ. В сетях внешнего ЭПП провалы бывают двух видов:

- провал напряжения величиной до $0,8U_{\text{ном}}$ и длительностью в половину периода напряжения $t=0,01$ с. Такой провал приводит сбоям в программах управления частотно-регулируемым приводом (ЧРП), устройства плавного пуска (УПП). В результате чего происходит нарушение технологического процесса (ущерб в виде брака, недоотпуска продукции, порчи технологического оборудования, воздействия на окружающую среду в виде выбросов, возникновение пожаров и взрывов). Также при таком типе провала напряжения случается отпадание контактов, пускателей, низковольтных ЭД вспомогательных механизмов, что приводит к остановке электродвигателей напряжением 6(10) кВ;

- провал напряжения величиной до $(0,1-0,5)U_{\text{ном}}$ и длительностью $T=0,1\div 4$ с (обусловлено временем действия РЗА). Этот провал приводит к выпадению из синхронизма синхронного двигателя (СД).

2. Несанкционированные отключения. Ошибочные действия персонала, отключение от технологических защит, отключение от устройств противоаварийной автоматики. Такого рода провалы характеризуются отсутствием питающего напряжения и их длительность ($T=0,1\div 4$ с) обусловлена временем действия защитной автоматики. Они могут вызвать выпадение из синхронизма СД, опрокидывание асинхронного двигателя (АД), а также привести к «лавине напряжения». Это в свою очередь приводит к снижению технологических параметров (давление, напор и т.д.) и отключению электрооборудования под действием технологических защит.

3. Коммутации в сети. В таких случаях величина провала напряжения доходит до $0,8U_{\text{ном}}$, а длительность T до 30 с, что обусловлено пуском мощных двигателей. Последствия данных провалов те же, что и у провалов, вызванных несанкционированными отключениями.

Последствия провалов напряжения в промышленных условиях могут быть серьезными: от незначительных перерывов в работе до значительных повреждений оборудования и производственных потерь. Основными последствиями являются:

1. Сбои в работе и простои. Автоматизированные производственные линии, станки с ЧПУ, робототехника и другое промышленное оборудование зависят от стабильного напряжения для корректной работы. Провалы напряжения могут привести к сбоям в работе этих систем, их сбросу или полной остановке. Даже кратковременное нарушение может остановить производственные процессы, что приведет к простоям и значительным потерям, особенно в отраслях с высокоскоростными непрерывными операциями, таких как автомобилестроение или химическая переработка.

2. Неисправности оборудования. Провалы напряжения могут вызвать сбои в работе чувствительной электроники, такой как программируемые логические контроллеры (ПЛК), частотно-регулируемые приводы (ЧРП) и системы управления. Это может привести к неправильному функционированию промышленных машин, неправильной регистрации данных и отказу систем безопасности. В критически важных отраслях, таких как фармацевтическое производство или переработка пищевых продуктов, даже незначительные неисправности могут иметь серьезные последствия.

3. Снижение эффективности двигателя и остановка. Электродвигатели широко используются в промышленных приложениях, от конвейеров и насосов до систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Провалы напряжения снижают крутящий момент, создаваемый двигателями, что приводит к снижению производительности [12]. В некоторых случаях двигатели могут останавливаться, что приводит к перегреву или повреждению. Повторные остановки могут привести к износу

двигателя, сокращению срока службы оборудования и увеличению расходов на техническое обслуживание.

4. Частое срабатывание защитных устройств. Автоматические выключатели, реле и предохранители могут срабатывать в ответ на провалы напряжения, ошибочно принимая провал за перегрузку или неисправность. Это может привести к ненужным отключениям машин и оборудования завода, еще больше нарушая работу. В отраслях со сложным оборудованием перезапуск систем может занять значительное время и усилия, что приводит к задержкам производства.

5. Проблемы контроля качества. Провалы напряжения могут повлиять на точное оборудование, такое как сварочные аппараты, станки с ЧПУ и робототехнику. Этим машинам требуются постоянные уровни напряжения для поддержания качества продукции. Изменения мощности могут привести к дефектам, некачественной отделке или незавершенным производственным циклам, что приводит к дорогостоящей доработке или бракованным материалам.

6. Потеря данных и сбой связи. Во многих отраслях промышленности операции контролируются и управляются компьютерными системами, которые собирают и обрабатывают данные в режиме реального времени. Провал напряжения может привести к отключению или перезапуску этих систем, что приведет к потере данных или неверной информации о процессе. В отраслях, которые полагаются на исторические данные для контроля качества и оптимизации процессов, такие сбои могут вызвать значительные эксплуатационные проблемы.

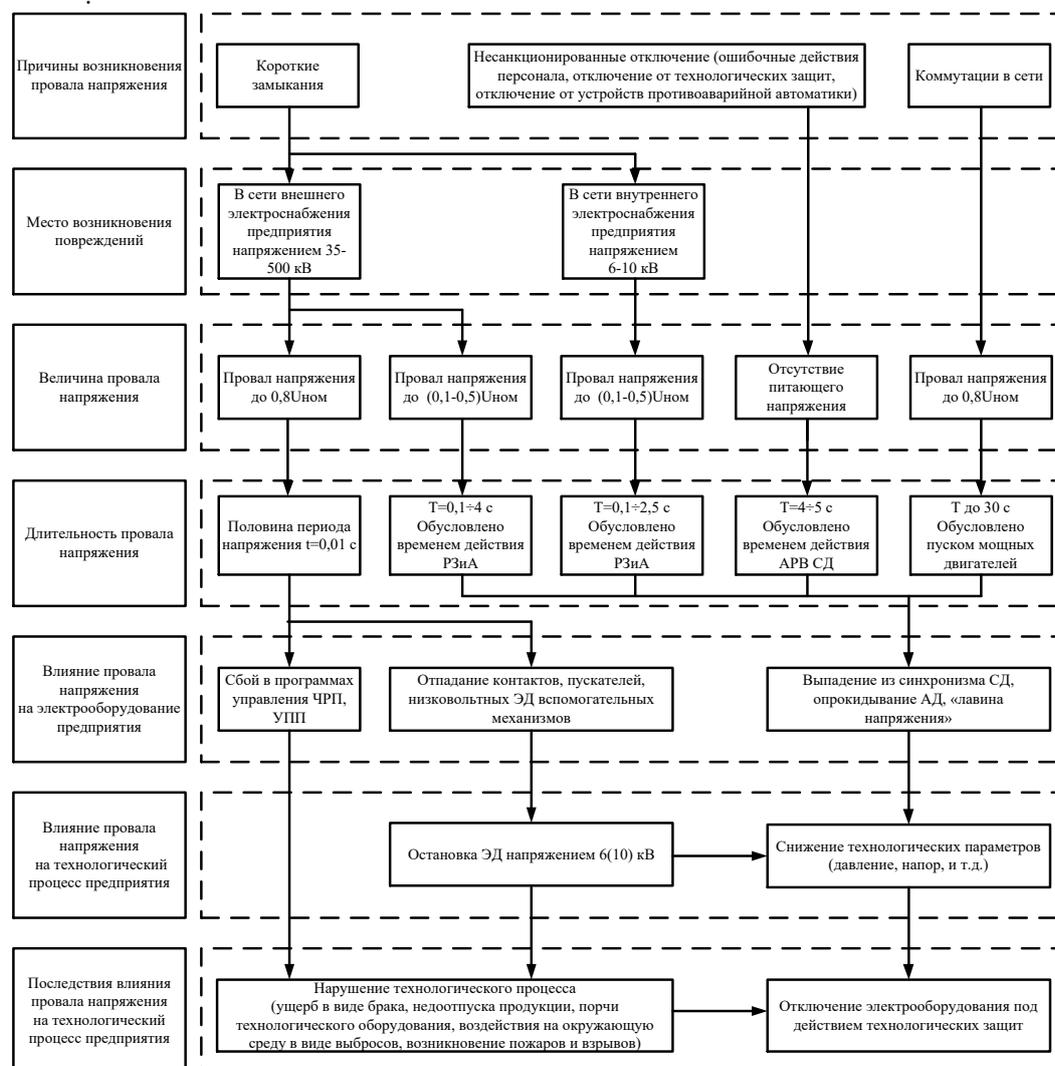


Рис. 2. Причины и последствия от провалов напряжения в системе электроснабжения промышленных предприятий

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Также провалы напряжения могут привести к серьезным экономическим

последствиям для промышленного предприятия. К ним относятся:

1. Прямые затраты. Они включают в себя немедленные финансовые потери из-за остановок производства, отказов оборудования и проблем с качеством продукции. Например, в таких отраслях, как производство полупроводников, где точность является ключевым фактором, даже кратковременный провал напряжения может испортить целую партию, что обойдется в сотни миллионов рублей. Аналогично, в отраслях с высокоскоростными производственными линиями, таких как автомобилестроение, простой, связанный с перезапуском оборудования, может привести к крупным финансовым потерям [13].

2. Косвенные затраты. Косвенные затраты менее очевидны, но могут быть столь же значительными. К ним относятся затраты, связанные с обслуживанием, ремонтом, сокращением срока службы оборудования и снижением эффективности из-за повторяющихся провалов напряжения. Кроме того, компании могут понести потерю репутации, если они не смогут удовлетворить спрос клиентов или ожидания по качеству продукции из-за проблем с качеством электроэнергии [14].

Провалы напряжения тесно взаимосвязаны с релейной защитой энергосистемы, поскольку устройства защиты как вызывают, так и смягчают провалы напряжения в зависимости от ситуации. Понимание этой взаимосвязи является ключевым фактором при минимизации негативных последствий провалов напряжения для обеспечения надежности системы.

Основной причиной провалов напряжения, как было упомянуто ранее, являются электрические неисправности в системе, такие как короткие замыкания. Когда происходит неисправность, ток, потребляемый системой, резко увеличивается, вызывая временный провал напряжения в точке неисправности и во всей затронутой сети. Устройства защиты энергосистемы предназначены для обнаружения этих неисправностей и максимально быстрой изоляции неисправного участка для восстановления нормальной работы.

Время, обнаружения и устранения неисправности с помощью релейной защиты, определяет глубину и продолжительность провала напряжения [15]. Если системе защиты требуется слишком много времени для обнаружения и устранения неисправности, провал напряжения может распространиться дальше в систему и длиться дольше. Это может повлиять на большее количество потребителей или технологических процессов. Хорошо скоординированная система защиты, которая быстро реагирует на неисправность, может ограничить серьезность и продолжительность провала напряжения, предотвращая его распространение по всей сети.

Зачастую при несогласованности проектных решений технологов и электриков системы защиты могут быть чрезмерно чувствительными или плохо скоординированными, что приводит к ненужному срабатыванию автоматических выключателей или реле. Такое чрезмерное срабатывание может вызвать непреднамеренные провалы напряжения, особенно если защитные устройства отключают части сети в ответ на незначительные нарушения, которые не должны были вызвать реакцию на неисправность [16]. Также следует учитывать то, что разное оборудование имеет различные допустимые границы по провалам напряжения в процентах от номинального, при котором сохраняется работоспособность оборудования. Например работоспособность пускателя электродвигателя сохраняется при провале напряжения до 50% длительностью 40 мс, тогда как контроллер электропривода постоянного тока обладает более высоким порогом чувствительности к провалам напряжения, и допустимым провалом для него является снижение значения напряжения на 12% длительностью менее 8 мс [17].

Обеспечение надлежащей координации между защитными устройствами сводит к минимуму вероятность каскадных неисправностей или непреднамеренного отключения, которые могут усугубить провалы напряжения. С учетом этого при проектировании системы электроснабжения промышленного предприятия необходимо производить выбор способов по стабилизации напряжения в системе.

Материалы и методы (*Materials and methods*)

Как было сказано ранее, величина и длительность образуют две важнейшие характеристики, определяющие явление провала напряжения. Поэтому инженерные мероприятия по снижению его воздействия на электрическую сеть также можно разделить на две категории:

- 1) средства уменьшения глубины провала напряжения [18]:
 - статический компенсатор реактивной мощности (СТАТКОМ);

- статический источник бесперебойного питания (ИБП);
 - динамический компенсатор искажений напряжения (ДКИН);
 - маховик;
 - аккумуляторная система хранения энергии BESS;
 - увеличение кратности форсировки возбуждения синхронных машин.
- 2) способы уменьшения длительности провала напряжения:
- быстродействующий автоматический ввод резерва (БАВР);
 - применение быстродействующих защит.

Рассмотрим каждый метод по отдельности.

Статический компенсатор реактивной мощности (СТАТКОМ) – представляет собой устройство с параллельным включением, которое внедряется в линии электропередачи переменного тока [19]. Его основными элементами являются силовые полупроводниковые устройства биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) и такие пассивные элементы, как конденсаторы, резисторы и катушки индуктивности [20]. СТАТКОМ входит в группу устройств, относящихся к технологии управляемых систем электропередачи переменного тока FACTS [21]. FACTS (Flexible AC Transmission System) – это система, основной частью которой являются силовые электронные устройства и другие статические контроллеры для повышения управляемости и возможности передачи мощности, что обеспечивает более быструю реакцию по сравнению с системами, использующими электромеханическую базу [22]. Схема подключения СТАТКОМ к электрической сети показана на рис. 3.

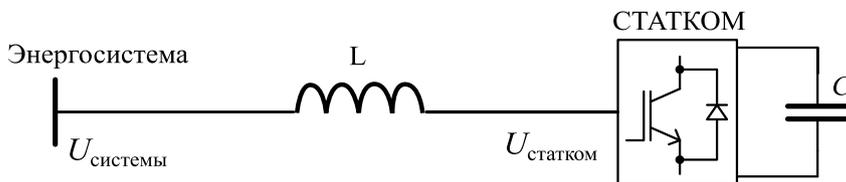


Рис. 3. Схема присоединения СТАТКОМ к сети

Fig. 3. A STATCOM installment

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Основная часть СТАТКОМ состоит из статического преобразователя, который представлен в виде серии соединенных между собой транзисторов IGBT. Он может работать в двух режимах – генерации и потреблении реактивной мощности. Инверторы преобразуют постоянное напряжение, генерируемое конденсатором С, в переменное. С помощью трансформатора связи, изображенным в виде катушек индуктивности L, СТАТКОМ подключается к энергосистеме, что обеспечивает изоляцию между высоковольтной системой и номинальным напряжением статического компенсатора [23].

Для дальнейшего исследования СТАТКОМ важно рассмотреть вольтамперные характеристики, изображенные на рис. 4.

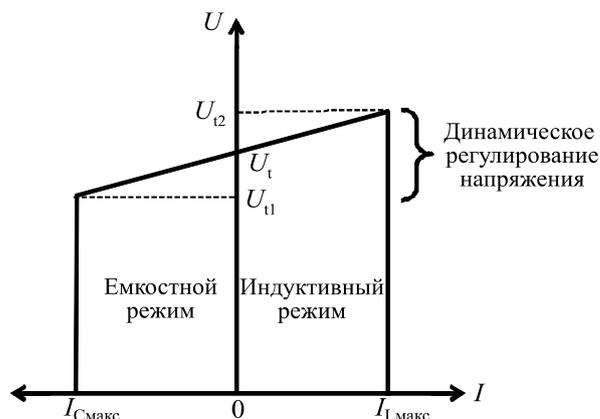


Рис. 4. Вольтамперная характеристика СТАТКОМ

Fig. 4. V-I Characteristics of STATCOM

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

I_{Cmax} и I_{Lmax} — предельные значения тока в емкостном или индуктивном режимах соответственно, которые могут быть обеспечены компенсатором.

На рисунке показаны два режима работы СТАТКОМ:

1. регулирование напряжения;
2. обеспечение баланса реактивной мощности в электрической сети.

В случае если напряжение на шине отклоняется от номинального значения U_t и колеблется между U_{t1} и U_{t2} , СТАТКОМ работает в режиме регулирования напряжения и обеспечивает поддержание напряжения на шине на номинальном значении. Если напряжение на шине падает ниже U_{t1} или поднимается выше U_{t2} , СТАТКОМ начинает контролировать реактивную мощность в сети путем подачи в систему емкостного или индуктивного тока.

По своим динамическим характеристикам, СТАТКОМ значительно превосходит другие компенсаторы реактивной мощности. Общее время отклика системы СТАТКОМ может достигать 10 мс [24]. Как показывают результаты моделирования, при провале напряжения до $0,5U_{ном}$ в течение 150 мс СТАТКОМ способен повысить его до $0,7U_{ном}$ [25]. Модифицированный СТАТКОМ для распределительных сетей так называемый Distributed STATCOM (D-STATCOM) при провале напряжения до $0,1U_{ном}$ длительностью 0,1 с позволяет улучшить профиль напряжения до $0,5U_{ном}$ [26]. Для регулирования напряжения такой СТАТКОМ целесообразно использовать на конце распределительной сети среднего напряжения или вблизи центров нагрузки [26]. Однако по сравнению с другими устройствами, используемыми для ликвидации провалов, СТАТКОМ неэффективен для устранения глубоких провалов напряжения [26]. Понимание этих ограничений помогает принимать обоснованные решения об использовании СТАТКОМ при проектировании энергосистем промышленных предприятий.

Статический источник бесперебойного питания

Источник бесперебойного питания (ИБП) — это электрическое устройство, которое обеспечивает аварийное питание нагрузки при отказе основного источника питания [28]. Он отличается от резервных генераторов тем, что ИБП обеспечивает почти мгновенную защиту от перебоев входного питания, поставляя энергию, накопленную в батареях, суперконденсаторах или маховиках. Такая короткая, но критически важная подача питания позволяет устройствам продолжать работу или корректно выключаться, избегая потенциального повреждения или потери данных [29].

Основной принцип работы системы ИБП основан на трех ключевых компонентах: выпрямитель, батарея и инвертор. На рис. 5 изображена структура простейшего резервного ИБП. Сначала выпрямитель преобразует входящий переменный ток от сети в постоянный ток, который используется для зарядки батареи ИБП. Затем батарея запасает энергию, которую можно использовать при отказе или колебаниях основного источника питания. Время работы батареи зависит от размера и типа ИБП и поддерживаемой им нагрузки. При прерывании подачи питания инвертор преобразует постоянный ток от батареи обратно в переменный ток, поставляя необходимую энергию подключенным устройствам.

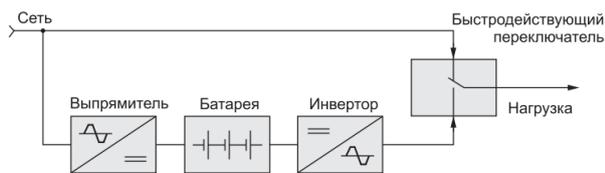


Рис. 5. Структура ИБП

Fig. 5. Structure of UPS

*Источник: [30] Source: [30].

Такой плавный переход от основного источника питания к питанию от батареи гарантирует, что устройства будут продолжать работать без перебоев в случае провалов напряжений. В случае провала напряжения в энергосистеме быстродействующий переключатель обеспечивает переключение нагрузки на ИБП в течение 3-10 мс [30]. Обычно ИБП используются для создания систем бесперебойного электроснабжения (питания) инфокоммуникационных систем, таких как компьютеры и системы связи с инженерными системами [31].

Одним из главных недостатков при работе ИБП в аварийных ситуациях является наличие кратковременных перебоев электропитания длительностью от нескольких миллисекунд до половины периода питающего напряжения [30], также он компенсирует провалы напряжения только до $0,6U_{ном}$. Также необходимо учитывать, что данное устройство не подходит для обеспечения защиты электродвигателей от провалов напряжения.

Динамический компенсатор искажений напряжения

Динамический компенсатор искажений напряжения (ДКИН) или динамический компенсатор провалов напряжения (ДКПН) [17] представляет собой последовательный компенсатор на основе силового электронного преобразователя, который способен регулировать напряжение низковольтной нагрузки при перенапряжениях и провалах в питающей электросети. Принципиальная схема ДКИН изображена на рис. 6.

Основными компонентами данного устройства являются [32]:

- вольтодобавочный трансформатор;
- фильтр гармоник;
- устройство накопления энергии;
- преобразователь напряжения (voltage source converter/VSC);
- система управления.

При нормальном напряжении в сети ДКИН находится в состоянии ожидания с заряженным накопителем энергии, роль которого выполняет конденсатор постоянного тока. В случае провала напряжения в энергосистеме контроллер системы управления посылает сигнал преобразователю напряжения. Преобразователь, выполненный на основе IGBT транзисторов, преобразует постоянное напряжение накопителя в переменное и в необходимом количестве выдает его в распределительную сеть через вольтодобавочный трансформатор, подключенный последовательно с нагрузкой. Таким образом происходит компенсация провалов напряжения в системе электроснабжения. На выходе преобразователя также подключаются пассивные фильтры гармоник для подавления высокочастотных гармоник напряжения преобразователя [33].

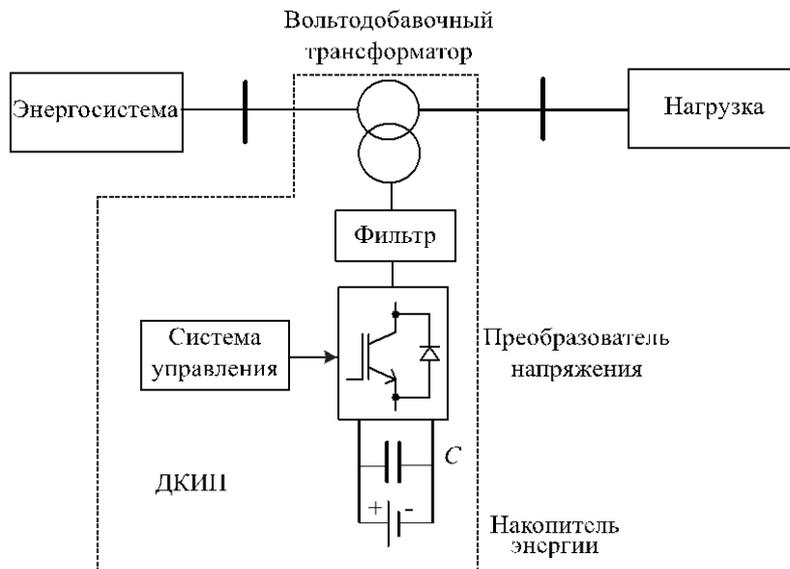


Рис. 6. Динамический компенсатор искажений напряжения (ДКИН) Fig. 6. Dynamic Voltage Restorer (DVR)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

ДКИН обеспечивает отклик на провал напряжения в течение 1-2 мс с последующим регулированием напряжения наполовину в течение 1 мс и полным восстановлением напряжения за 10 мс. ДКИН обеспечивает полную компенсацию провала напряжения в пределах номинального при перегрузках по току в $2I_{ном}$ в течение не менее 30 с, частичную компенсацию при трехфазных провалах напряжения вплоть до $0,5U_{ном}$ и однофазных провалах до $0,55U_{ном}$ в течение не менее 30с [17]. Зачастую ДКИН применяется для защиты нагрузок от провалов напряжения при коротких замыканиях, возникающих в сетях внутреннего электроснабжения 6–10 кВ промышленных предприятий [34]. Однако в [35] была продемонстрирована способность ДКИН без накопительных элементов эффективно обеспечивать кратковременное поддержание напряжения на нагрузке, подключенной к секциям распределительного устройства (РУ) 6 – 10 кВ главной понизительной подстанции (ГПП), при коротком замыкании в сетях внешнего электроснабжения 35 – 110 – 220 кВ.

Маховик-генератор

Маховик-генератор — это инновационная и эффективная технология хранения энергии, которая использует кинетическую энергию для хранения и высвобождения

мощности. Используя вращающийся маховик в качестве среды для сохранения энергии, данная технология обеспечивает устойчивую и высокопроизводительную альтернативу традиционным решениям по хранению энергии, таким как батареи [36]. Вместе с тем данное устройство может применяться для защиты технологических процессов от провалов напряжений.

Принципиальная схема системы маховик-генератор изображена на рис. 7. Основными компонентами маховика-генератора являются:

- Маховик. Ротор большой массы, который хранит кинетическую энергию. Современные маховики изготавливаются из современных материалов, таких как углеродное волокно, для высокой прочности и снижения веса.
- Двигатель/генератор переменного тока. Машины двойного назначения, которые обрабатывают входную и выходную энергию, переключаясь между режимами двигателя и генератора по мере необходимости.
- Подшипники. Они поддерживают маховик и уменьшают трение. Магнитные подшипники или сверхпроводящие подшипники часто используются для работы практически без трения.
- Вакуумный корпус. Герметичная среда, которая снижает сопротивление воздуха, позволяя маховику эффективно вращаться на очень высоких скоростях.
- Система управления. Управляет потоком энергии, обеспечивая плавную работу и интеграцию с внешними энергетическими системами. Состоит из плат электронных схем и программируемого логического контроллера.

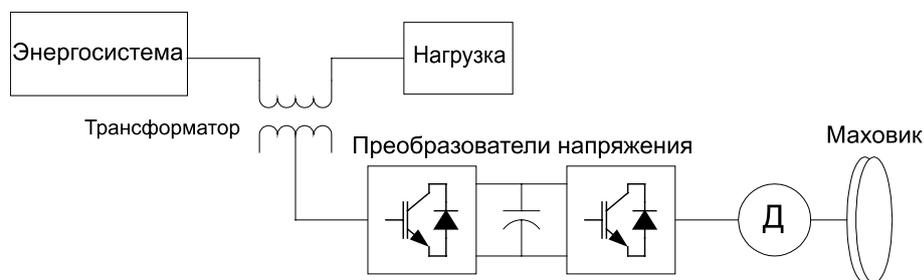


Рис. 7. Маховик-генератор

Fig. 7. Flywheel generator

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Принцип действия системы маховика с генератором основан на преобразовании электрической энергии в кинетическую и наоборот. Когда доступен избыток энергии, электродвигатель разгоняет маховик до высоких скоростей вращения. Этот процесс сохраняет энергию в виде вращательной кинетической энергии. В периоды спроса кинетическая энергия маховика преобразуется обратно в электрическую энергию с помощью генератора. Для минимизации трения и сопротивления воздуха используются усовершенствованные магнитные подшипники или вакуумная среда, что обеспечивает более длительное удержание энергии и большую эффективность.

Время реакции накопителя энергии с маховиком составляет до 4 мс [37]. Согласно существующим результатам моделирования работы данной системы при провале напряжения до $0,6U_{ном}$ длительностью 34 мс маховик-генератор способен стабилизировать напряжение на уровне $0,95U_{ном}$ (коррекцию провала можно выполнить до $1,0U_{ном}$, но это вызовет перенапряжения в конце периода провала, что может привести к повреждению изоляции) [38].

Аккумуляторная система хранения энергии

Система хранения энергии на основе аккумуляторных батарей (Battery Energy Storage System/BESS) — это тип технологии хранения энергии, которая использует аккумуляторы для хранения электроэнергии и ее распределения по мере необходимости. Она состоит из нескольких ключевых слаженно работающих компонентов [39]:

- Аккумуляторы — ядро системы, аккумуляторы могут различаться по типу, причем литий-ионные являются наиболее популярными из-за своей высокой плотности энергии, эффективности и снижения стоимости. Альтернативы, такие как свинцово-кислотные, проточные аккумуляторы и новые технологии, такие как твердотельные аккумуляторы, также используются в особых случаях.
- Система преобразования энергии (Power Conversion System/PCS) — это система, которая преобразует переменный ток (AC) из сети в постоянный ток (DC) для хранения в аккумуляторах и обратно в переменный ток при распределении энергии.

- Система управления аккумуляторами (Battery Management System/BMS) — обеспечивает безопасную и эффективную работу, контролируя такие параметры, как температура, напряжение, состояние работоспособности State-of-Health/SOH) и состояние заряда (State-of-Charge/SOC) [40]. Она также предотвращает перезарядку или глубокую разрядку, которые могут повредить аккумулятор.

- Система управления энергией (Energy Management System/EMS) — это программная система оптимизирует хранение и использование энергии, прогнозируя модели спроса и определяя наиболее экономически эффективное время для отпуска энергии.

Увеличение кратности форсировки возбуждения синхронных машин

В [41, 42] установлено, что одним из способов повышения уровня напряжения на промышленном производстве является увеличение кратности форсировки возбуждения синхронных генераторов и синхронных двигателей. Объектом исследования являлось влияние короткого замыкания во внешней электросети напряжением 110 кВ на работу типового узла системы электроснабжения промышленного потребителя напряжением 6-10 кВ, к которому были подключены синхронные машины. На основе метода математического моделирования в программной среде *MATLAB Simulink* был проведен ряд экспериментов с различными значениями мощности синхронных машин и удаленности КЗ от производства для выявления закономерностей влияния кратности форсировки возбуждения СМ на уровень остаточного напряжения. В ходе исследования была продемонстрирована способность синхронного генератора мощностью 16 МВт стабилизировать минимально допустимое напряжение на уровне $0,8U_{ном}$ за счет четырехкратной форсировки возбуждения при снижении до 4 км зоны, в пределах которой все КЗ приводят к снижению напряжения на главной понизительной подстанции ниже технологически допустимого, а для синхронного двигателя такой же мощности эта зона должна быть примерно на 10% больше. В результате работы был сделан вывод о том, что синхронные машины, установленные в системе внутреннего электроснабжения промышленных предприятий, позволяют минимизировать уровень провалов напряжения при кратковременных нарушениях электроснабжения во внешней сети без дополнительных инвестиций.

Быстрый автоматический ввод резерва

Другой эффективной мерой по снижению влияния провалов напряжения на работу энергосистемы является уменьшение его длительности. Для достижения этой цели могут использоваться устройства автоматики и релейной защиты.

В последние годы разработаны и внедрены специфические устройства, обеспечивающие быстрое включение резерва (БАВР) на напряжение 6÷10 кВ. Они характеризуются малым периодом отключения питания, в ходе которого синхронные двигатели не успевают выйти из синхронизма, а асинхронные практически не меняют скорость вращения. Это дает возможность обеспечить минимизацию параметров самозапуска, снижая риск нарушения технологического процесса при коммутации приемников от одного источника к другому. Схема БАВР выполнена в виде бесконтактной (тиристорной) и контактной аппаратуры.

Автоматический ввод резерва (АВР) — это самодействующее интеллектуальное устройство переключения питания, управляемое специальной логикой управления. Основная цель АВР — обеспечить непрерывную подачу электроэнергии от одного из двух источников питания к подключенной цепи нагрузки (электрооборудование — освещение, двигатели, компьютеры и т. д.).

Логика управления или автоматический контроллер обычно основаны на микропроцессоре и постоянно отслеживают электрические параметры (напряжение, частоту) основных и альтернативных источников питания. При отказе подключенного источника питания АВР автоматически переключит цепь нагрузки на другой источник питания (если он доступен). Как правило, большинство автоматических переключателей резерва по умолчанию ищут подключение к основному источнику питания (сети) и подключаются к альтернативному источнику питания (двигателю-генератору, резервной сети) только при необходимости (отказ основного источника) или по запросу (команда оператора).

БАВР реагирует на аварийный режим в течение 3-9 мс [43] и осуществляет переключение на резервный ввод за 23-65 мс [43]. При моделировании работы БАВР была продемонстрирована способность устройства работать при провалах напряжения до $0,5U_{ном}$ [44]. Однако в [45] отмечается, что применение АВР при провалах напряжения длительностью 1-3 с является нерациональным решением. Помимо этого, в [46]

утверждается, что проектирование собственного БАР на производстве представляет собой проблему, так как это усложняет схему электроснабжения и вносит проблему по селективности и равномерности загрузки вводов электропитания.

Применение быстродействующих защит

Другой мерой по уменьшению длительности провалов напряжения, возникающих в системах электроснабжения промышленного предприятия, является повышение быстродействия релейной защиты.

Перспективным направлением для увеличения быстродействия релейной защиты является использование цифровых логических защит электроустановок. Все чаще при проектировании технического перевооружения энергообъектов используются системы, построенные по принципу абсолютной логической селективности. Данное понятие определяет систему, в которой в случае неисправности на линии координация между защитами достигается посредством их связи для автономного распознавания необходимого вмешательства с целью сокращения времени, необходимого для устранения неисправности, и минимизации участка электрической линии, необходимого для изоляции неисправности [47]. В этом случае микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики (РЗА) подстанции взаимодействуют с помощью дискретных сигналов, определяемых серией стандартов МЭК-61850 (IEC 61850). Основными характеристиками данного стандарта являются технологическая независимость, гибкость и расширяемость [48]. Характерная черта логических защит линий является — использование разрешающих команд, что значительно уменьшает возможность ложной работы при КЗ и ошибках персонала. Время действия данного процесса составляет около 200 мс [49].

На основе информации, изложенной в [49, 50], составлена схема организации логической защиты кабельных линий (Рис. 8). На концах защищаемой линии устанавливаются комплекты цифровой релейной защиты (ЦРЗА) с функцией максимальной токовой направленной защиты. Данные устройства обмениваются информацией с помощью приемопередатчиков дискретных команд (ППДК), которые в случае короткого замыкания подают команду на отключение линии. Волоконно-оптическая линия передачи (ВОЛС) выступает в роли линии связи для ППДК, обычно идущая параллельно с линией электропередачи.

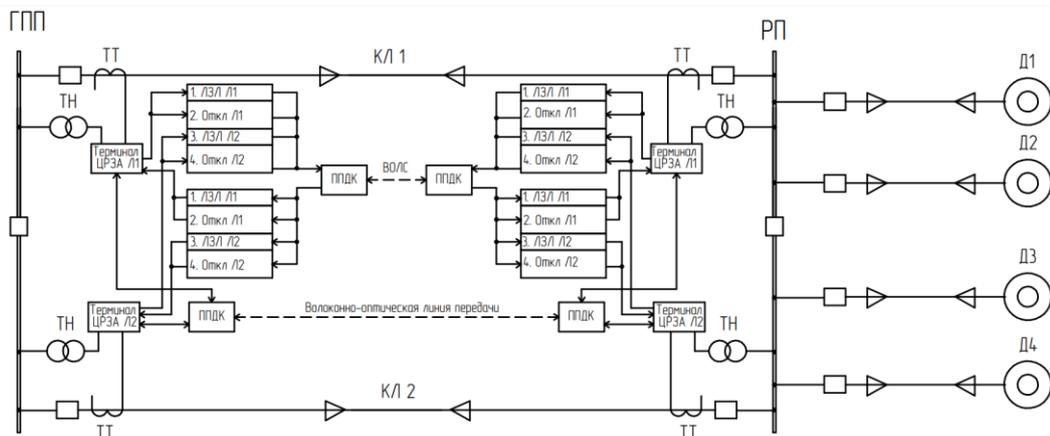


Рис. 8. Организация логической защиты

Fig. 8. Infrastructure of a logical protection system

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Согласно разделу 8.1 стандарта МЭК-61850 для передачи сигналов управления, защиты и блокировок подстанции предназначен протокол GOOSE (Generic Object-Oriented Substation Event) [51]. Использование данной технологии позволяет интегрировать управление и защиту энергообъектов подстанции в единое целое, что значительно повышает быстродействие обмена информацией в стандартизированном виде между оборудованием подстанции и за ее пределами. Например, внедрение устройств защит с локальной вычислительной сетью, обменивающихся данными по протоколам связи GOOSE, позволяет уменьшить время ввода резерва в 10 раз [52].

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

В изложенном выше литературном обзоре представлен спектр разнообразных подходов к решению проблемы провалов напряжения в энергосистеме предприятия. На основе полученных данных составлена сравнительная Таблица 1, где приведены

максимальные величины глубины и длительности провалов напряжения, при которых рассматриваемые инженерные мероприятия способны эффективно поддерживать номинальный уровень напряжения в случае аварийной ситуации.

Таблица 1

Table 1

Сравнительные технические характеристики инженерных мероприятий по снижению воздействия провалов напряжения на электрическую сеть
Comparative technical characteristics of engineering measures to reduce the impact of voltage failures on the electrical network

Наименование мероприятия	Величина провала напряжения, %	Длительность провала, мс
СТАТКОМ	50	150
D-СТАТКОМ	10	100
ИБП	60	10
ДКИН	50	10
Маховик-генератор	60	34
БАВР	50	65

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Приведённые в таблице цифры могут привести к ошибочному выводу о выборе СТАТКОМ как наиболее предпочтительному способу поддержания требуемого уровня напряжения. Как было продемонстрировано в предыдущих разделах статьи, каждый способ имеет свои достоинства и недостатки. Следовательно, применение того или иного метода должно обосновываться исходя из конкретных обоснований на основе моделирования работы промышленного предприятия при провалах напряжения. Исходной позицией для создания противоаварийных мероприятий является критическое время провала напряжения [16]. Оно определяет максимальный период времени работы оборудования после аварии, при котором не происходит нарушения технологического процесса. Данное понятие лежит в основе концепции времени невосприимчивости процесса для технологического оборудования [53], определение которого показано на рисунке 9.

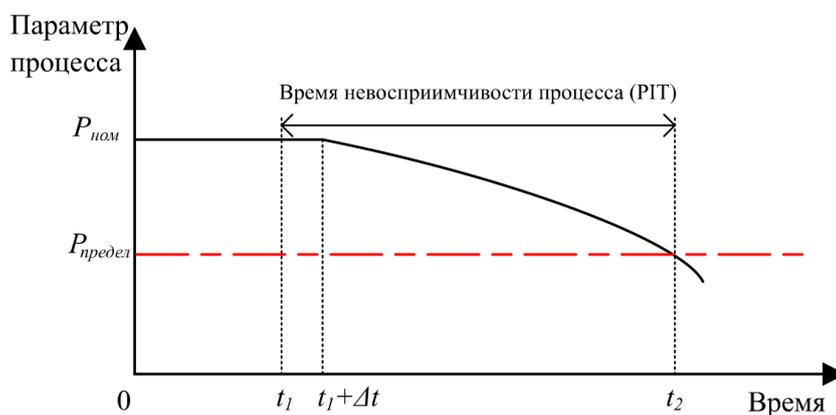


Рис.9.Определение времени невосприимчивости процесса

Fig. 9. Definition of PIT

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В момент времени t_1 происходит провал напряжения, в результате чего параметр технологического процесса $P_{ном}$ (давление, температура и т.п.) начинает отклоняться от своего номинального значения после задержки времени Δt . В момент времени t_2 параметр пересекает границу $P_{предел}$, ниже которой технологический процесс не может нормально функционировать и должен быть либо остановлен, либо перезапущен. Промежуток от t_1 до t_2 называется временем невосприимчивости процесса (Process immunity time/PIT) и определяется по формуле (1).

$$PIT = t_2 - t_1 \quad (1)$$

Одним из главных препятствий при разработке мероприятий по устойчивости работы технологического процесса является то, что зачастую предприятия не знают время невосприимчивости процесса для каждого аппарата и никто не проектирует его заранее. При этом отдельное оборудование на производстве имеет свой цикл и свое критическое время провала в виду того, что каждый технологический процесс обладает своей спецификой и имеет свои наиболее чувствительные к кратковременным перерывам электроснабжения места. Поэтому инженеру-электрику на моменте проектирования необходимо провести комплексную оценку всего оборудования на отдельно взятом промышленном предприятии, собрать данные о процессе не только в электрической, но и технологической части. Затем, на основе полученной информации, выявляются критически важные агрегаты и вычисляются значения РИТ для каждого из них. В дальнейших работах предполагается подробно рассказать о методике определения значений времени невосприимчивости технологического процесса и продемонстрировать результаты экспериментальных исследований данного времени.

Заключение (Conclusions)

1. Рассмотрены особенности электроснабжения современных промышленных предприятий. Приведены основные причины аварийных ситуаций в энергосистемах производств. Показано, что основной причиной нарушения работы технологического оборудования являются провалы напряжения. Дано определение понятия «провал напряжения» и описаны основные характеристики этого явления. Представлена классификация провалов напряжения в зависимости от их причины и места возникновения. Также описаны технологические и экономические последствия провалов напряжения для промышленного предприятия.

2. Приведен список основных средств и способов по борьбе с провалами напряжений. Рассмотрен один из наиболее эффективных устройств по стабилизации напряжения в сети — СТАТКОМ. Описан принцип действия СТАТКОМ, представлена иллюстрация его присоединения к сети и даны основные характеристики его работы. Также подробно расписаны другие методы устранения провалов напряжения: статический источник бесперебойного питания; маховик-генератор; быстрый ввод резерва; быстродействующие защиты.

3. Показано, что существующие способы и средства по стабилизации напряжения на промышленном предприятии имеют свои достоинства и недостатки. Сделан вывод о том, что главным фактором при проектировании мероприятий по противодействию провалам напряжения на производстве является время невосприимчивости процесса. Каждое оборудование имеет свое значение данного времени, что не учитывается на стадии проектирования. Это приводит к проблемам обеспечения стабильности напряжения.

Научная новизна исследования состоит в формулировке проблемы провалов напряжения на основе литературного обзора и предложении её решения через концепцию времени невосприимчивости процесса. Эта задача связана с обширным комплексом устройств промышленных предприятий, что позволяет в дальнейших исследованиях разработать методику для проектирования мероприятий по повышению стабильности напряжения на промышленном объекте.

Литература

1. Суслов К.В., Солонина Н.Н., Солонина З.В., Ахметшин А.Р. Эффективный метод определения места короткого замыкания в электрических сетях. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023;25(2):71-83. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-2-71-83>

2. Motoki É. M., Filho J. M. d. C., da Silveira P. M., Pereira N. B., & de Souza, P. V. G. (2021). Cost of Industrial Process Shutdowns Due to Voltage Sag and Short Interruption. *Energies*, 14(10). pp. 2874.

3. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Зацепина В.И., Зацепин Е.П. Состояние вопроса безотказности систем электроснабжения. Горные науки и технологии. 2017;(3):47-79. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2017-3-47-73>

4. Арцишевский Я.Л. Техперевооружение релейной защиты и автоматики систем электроснабжения предприятий непрерывного производства / Я. Л. Арцишевский, Е. А. Задкова, Ю. П. Кузнецов ; Я. Л. Арцишевский, Е. А. Задкова, Ю. П. Кузнецов. – Москва : НТФ "Энергопрогресс", 2011. – 93 с. – (Библиотечка электротехника : приложение к журналу "Энергетик"). – EDN QMLLPT.

5. Хамидулин, Р.Р. Применение современных технологий автоматизации в сетях электроснабжения литейного производства / Р. Р. Хамидулин // *Academy*. – 2019. – № 2(41). – С. 32-33. – EDN YWUFUHR.
6. Фетисов, Л.В. Повышение качества электрической энергии в сетях низкого напряжения / Л. В. Фетисов, Н. В. Роженцова, О. А. Булатов // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2018. – Т. 20, № 11-12. – С. 99-106. – DOI 10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106. – EDN YXRTWN.
7. Балабанов А.М. Анализ эффективности систем СТАТКОМ в задачах повышения качества электроэнергии горнодобывающего предприятия / А. М. Балабанов, С. В. Митрофанов // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. – 2023. – Т. 15, № 1(57). – С. 68-79. – EDN BYIVEL.
8. Шклярский, Я.Э. Определение напряжения звена постоянного тока частотного электропривода при провалах напряжения / Я. Э. Шклярский, А. И. Барданов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2017. – № 12-2. – С. 447-456. – EDN ZXHANL.
9. Molnar-Matei F., Sorandaru C. LabVIEW implementation of tracking filters for voltage dip detection. *IEEE EuroCon*. 2013. pp. 897-902.
10. Смыков, Ю. Н. Управление процессами системы электроснабжения силовых электроприемников при провале напряжения / Ю. Н. Смыков, Е. Ю. Кислицин, М. Н. Иванов // *Успехи кибернетики*. – 2024. – Т. 5, № 1. – С. 61-68. – DOI 10.51790/2712-9942-2024-5-1-08. – EDN KMDXYX.
11. Саттаров Р.Р. Исследование работы группы асинхронных двигателей при кратковременных провалах напряжения для условий нефтяной промышленности / Р. Р. Саттаров, Р. Р. Гарафутдинов // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2020. – Т. 22, № 6. – С. 92-100. – DOI 10.30724/1998-9903-2020-22-6-92-100. – EDN PEXESR.
12. Червонченко С.С., Фролов В.Я. Исследование работы автономного электротехнического комплекса с комбинированным составом резервных источников питания. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022;24(4):90-104. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-90-104>
13. Khaleel M., Yusupov Z., Elmifi M., Elmenfy T., Rajab Z., & Elbar, M. (2023). Assessing the Financial Impact and Mitigation Methods for Voltage Sag in Power Grid. *Int. J. Electr. Eng. And Sustain.*, 1(3), 10–26. Доступно по: <https://ijees.org/index.php/ijees/article/view/40> Ссылка активна на 16 января 2025.
14. Almeida D.R., Cebrian J.C. Effects of Voltage Sags on Industrial Processes: Case Study. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2021, pp. 565–573.
15. Корнилов Г.П., Коваленко А.Ю., Николаев А.А., и др. Ограничение провалов напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2014. – № 2(23). – С. 44-48. – EDN SNOTPZ.
16. Гуревич Ю.Е. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя / Ю. Е. Гуревич, К. В. Кабиков ; Ю. Е. Гуревич, К. В. Кабиков. – Москва : Элекс-КМ, 2005. – 407 с. – ISBN 5-93815-025-6. – EDN QMIQZR.
17. Богданов И.А. Автоматическая система компенсации провалов напряжения в электроэнергетических системах судов с электродвижением / И. А. Богданов, Н. Д. Сенчило // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2020. – № 3-1(49). – С. 212-218. – DOI 10.37220/МТ.2020.49.3.028. – EDN AGYUOD.
18. Ершов С.В. Анализ средств и способов ограничения влияния провалов напряжения / С. В. Ершов, М. С. Пигалов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2017. – № 12-1. – С. 95-104. – EDN ZXGZJL.
19. Sharma S. et al. A Comprehensive Review on STATCOM: Paradigm of Modeling, Control, Stability, Optimal Location, Integration, Application, and Installation // *IEEE Access*. 2024. vol. 12, pp. 2701-2729. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3345216.
20. Liang X. et al. Improved Hybrid Reactive Power Compensation System Based on FC and STATCOM and Its Control Method. // *Chinese Journal of Electrical Engineering*. 2022. vol. 8, no. 2, pp. 29-41. doi: 10.23919/CJEE.2022.000012.
21. Савина Н.В., Лисогурский И.А., Лисогурская Л.Н. Выбор схемных и технических решений для улучшения качества электроэнергии в адаптивных сетях с тягой переменного тока. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022;24(3):42-54. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-3-42-54>
22. Иванов И.Ю., Новокрещенов В.В., Иванова В.Р. Современное состояние проблем функционирования комплексов релейной защиты и автоматики, применяемых в активно-

адаптивной сети. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022;24(6):102-123. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-102-123>

23. Dilshad S., Abas N., Farooq H., A. R. Kalair and A. A. Memon. NeuroFuzzy Wavelet Based Auxiliary Damping Controls for STATCOM. IEEE Access. 2020, vol. 8, pp. 200367-200382. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3031934.

24. Qingguang Y., Pei L., Wenhua L. and Xiaorong X. Overview of STATCOM technologies. IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. Proceedings, Hong Kong, China, 2004, pp. 647-652 Vol.2, doi: 10.1109/DRPT.2004.1338063.

25. Hamdan I., Ibrahim A.M.A., Noureldeen O. Modified STATCOM control strategy for fault ride-through capability enhancement of grid-connected PV/wind hybrid power system during voltage sag // SN Appl. Sci. 2020. N2, p. 364. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2169-6>

26. Sharma V., Chandrakar V. Power Quality Enhancement by minimizing the effect of Voltage Sag in Non-linear Load Using D-STATCOM // Journal of Physics: Conference Series. 2022. 2325. 012019. 10.1088/1742-6596/2325/1/012019.

27. Du Z., Chen Z., Dai G., et al. Influence of DVR on Adjacent Load and Its Compensation Strategy Design Based on Externality Theory // Energies 2019, 12, 3716. <https://doi.org/10.3390/en12193716>

28. Уметалиев С.Д., Галбаев Ж.Т., Борукуев Т.С., Галбаев А.Ж.. Повышение качества стабилизации выходных параметров источника бесперебойного питания для ветроустановок // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2024. № 3(71). С. 978-983. DOI 10.56634/16948335.2024.2.978-983. – EDN UFXDGD.

29. Oliveira T., Caseiro L., Mendes, A., Cruz S., Perdigão M. Model Predictive Control for Paralleled Uninterruptible Power Supplies with an Additional Inverter Leg for Load-Side Neutral Connection // Energies 2021, 14, 2270. <https://doi.org/10.3390/en14082270>

30. Гуревич В. Источники бесперебойного электропитания: устройство, принципы действия и применение / В. Гуревич // Силовая электроника. – 2012. – Т. 6, № 39. – С. 63-70. – EDN PJWKFN.

31. Caseiro L., Mendes A. Fault Analysis and Non-Redundant Fault Tolerance in 3-Level Double Conversion UPS Systems Using Finite-Control-Set Model Predictive Control // Energies 2021, 14, 2210. <https://doi.org/10.3390/en14082210>

32. Pandian S. Voltage Sag Compensation in Fourteen Bus System Using IDVR // International Journal of Engineering and Technology. 2017; 4. pp.183-186. Available at: <https://www.irjet.net/archives/V4/i3/IRJET-V4I338.pdf>. Accessed: 12 Nov 2024.

33. Mbuli N. Dynamic Voltage Restorer as a Solution to Voltage Problems in Power Systems: Focus on Sags, Swells and Steady Fluctuations // Energies 2023, 16, 6946. <https://doi.org/10.3390/en16196946>

34. Ивкин О.Н., Киреева Э.А., Пупин В.М. и др. Применение динамических компенсаторов искажения напряжения с целью обеспечения надежности электроснабжения потребителей // Главный энергетик. 2006. №1. С. 28-31.

35. Федотов А.И., Кузнецов Р.В., Федотов Е.А., Леухин А.Н. Влияние ДКИН на качество электроэнергии при коротких замыканиях в питающих электрических сетях. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2015;(3-4):36-41. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-0-3-4-36-41>

36. Dai X., Ma X., Hu D., Duan J., Chen H. An Overview of the R&D of Flywheel Energy Storage Technologies in China // Energies 2024, 17, 5531. <https://doi.org/10.3390/en17225531>

37. Guorui R., Jinfu L., Jie W., et al. Overview of wind power intermittency: Impacts, measurements, and mitigation solutions // Applied Energy. 2017; 204:47-65. 10.1016/j.apenergy.2017.06.098.

38. Samineni S., Johnson B.K., Hess H., Law J.D. Modeling and analysis of a flywheel energy storage system for Voltage sag correction // Industry Applications, IEEE Transactions on. 2006; 42: 42 - 52. 10.1109/TIA.2005.861366.

39. Nor Anwar I. B., Hussain M. N. M., Noor S. Z. M., et al. Micro-Grid of Battery Energy Storage System (BESS) Design for Malaysia's Net Energy Metering (NEM) // E3S Web of Conferences. 2024; Vol. 473: p. 02001. doi 10.1051/e3sconf/202447302001

40. Lawder M. T. et al. Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications // Proceedings of the IEEE, vol. 102, no. 6, pp. 1014-1030, June 2014, doi: 10.1109/JPROC.2014.2317451

41. Федотов А.И., Бахтеев К.Р. Влияние форсировки возбуждения синхронных машин на уровень остаточного напряжения при кратковременных нарушениях электроснабжения. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016;(7-8):64-71. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-7-8-64-71>

42. Bakhteev K., Fedotov A, Misbakhov R. The improving efficiency of electric receivers on the industrial enterprises in case of short-term power outages // Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava. Czech Republic. 2019, pp. 347-352.

43. Грунтович Н. В., Капанский А. А., Пупин В. М., Сафонов Д. О., Фёдоров О. В. Влияние работающих двигателей на остаточные напряжения узлов комплексной нагрузки станций // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2021. №2 (85). Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-rabotayuschih-dvigatelay-na-ostatochnye-napryazheniya-uzlov-kompleksnoy-nagruzki-stantsiy> (дата обращения: 16.12.2024).

44. Червоненко А.П., Котин Д.А., Рожко А.В. Перевод нагрузки с основной сети на резервную с применением типового АВР. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021;23(5):160-171. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-5-160-171>

45. Храмшин Т.Р. Способы повышения устойчивости электроприводов непрерывных производств при провалах напряжения // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2014. – № 2 (14). – С.80–87.

46. Корнилов Г.П., Храмшин Т.Р., Карандаева О.И. и др. Способы повышения устойчивости частотно-регулируемых электроприводов при нарушениях электроснабжения // Вестник МГТУ. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2011. – № 4. – С. 79–84.

47. Jafary P., Supponen A., Salmenperä M., Repo S. Analyzing Reliability of the Communication for Secure and Highly Available GOOSE-Based Logic Selectivity // Security and Communication Networks. 2019, 9682189: 16. <https://doi.org/10.1155/2019/9682189>

48. Акулова А. С. Формирование сообщений на цифровых // XX Всероссийская студенческая научно-практическая конференция Нижневартовского государственного университета : сборник статей, Нижневартовск, 03–04 апреля 2018 года. Том 1. – Нижневартовск: Нижневартовский государственный университет, 2018. – С. 425-428. – EDN YACYLJ.

49. Емельянцева А., Филин Л. Линии 6–10 кВ между электростанциями и энергосистемой. быстродействующая логическая защита // Новости электротехники. 2021. №2(128)–№3(129). Доступно по: <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/45/11.php> (дата обращения: 20.01.2025).

50. Исаков Р.Г., Гарке В.Г. Концепция развития релейной защиты системы электроснабжения крупного промышленного предприятия. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2012;(7-8):46-54.

51. Давыдов А., Холмов М. А., Никитин К. И., Клецель М. Я. Способ построения защиты линии с применением стандарта МЭК 61850 на примере микропроцессорного терминала Sepam серии 1000+ // Омский научный вестник. – 2024. – № 2(190). – С. 87-98. – DOI 10.25206/1813-8225-2024-190-87-98. – EDN EYIQKX.

52. Пфафенрот, Е. В. Организация цифровой логической защиты электроустановок НПЗ. Примеры внедрения, перспективы применения // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России : Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, 18–21 апреля 2023 года / сборник докладов VII международной научно-практической конференции. – Чебоксары: Б. и., 2023. – С. 143-147. – EDN RATKCZ.

53. Bollen M. H. J. et al. CIGRE/ CIREN/ UIE joint working group C4.110, voltage dip immunity of equipment in installations - Main contributions and conclusions // CIREN 2009 - 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - Part 1. Prague, Czech Republic, 2009, pp. 1-4, doi: 10.1049/cp.2009.0584.

Авторы публикации

Тухватуллин Леонид Тимурович – аспирант Казанского национального исследовательского технического университета имени А. Н. Туполева (КНИТУ-КАИ). tukhvatullint@stud.kai.ru.

Исаков Руслан Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электрооборудование» (ЭО) Казанского национального исследовательского технического университета имени А. Н. Туполева (КНИТУ-КАИ). ruslanisakov@yandex.ru.

References

1. Suslov K.V., Solonina N.N., Solonina Z.V., Akhmetshin A.R. Operational determination of the point of a short circuit in power lines. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023;25(2):71-83. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-2-71-83>

2. Motoki, É. M., Filho, J. M. d. C., da Silveira, P. M., Pereira, N. B., & de Souza, P. V. G. (2021). Cost of Industrial Process Shutdowns Due to Voltage Sag and Short Interruption. *Energies*, 14(10), 2874. <https://doi.org/10.3390/en14102874>

3. Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A., Zatsepina V.I., Zatsepina E.P. State of the issue of the power supply system's reliability. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2017;(3):47-79. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2017-3-47-73>

4. Artsishevskii YaL. *Tekhperevooruzhenie releinoi zashchity i avtomatiki sistem*

- elektrosnabzheniya predpriyatii nepreryvnogo proizvodstva*. Moscow: NTF "Energoprogress"; 2011. (In Russ).
5. Khamidulin RR. Primenenie sovremennykh tekhnologii avtomatizatsii v setyakh elektrosnabzheniya liteinogo proizvodstva. *Academy*. 2019; 41(2):32-33. (In Russ).
 6. Fetisov L.V., Rozhencova N.V., Bulatov O.A. IMPROVING THE QUALITY OF ELECTRIC POWER IN LOW VOLTAGE NETWORKS. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(11-12):99-106. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106>
 7. Balabanov AM, Mitrofanov SV. Analiz effektivnosti sistem STATKOM v zadachakh povysheniya kachestva elektroenergii gornodobyvayushchego predpriyatiya. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2023; 15(57(1)):68-79. (In Russ).
 8. Shklyarskii YaE, Bardanov AI. Opredelenie napryazheniya zvena postoyannogo toka chastotnogo elektroprivoda pri provalakh napryazheniya. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2017; 12(2):447-456. (In Russ).
 9. Molnar-Matei F., Sorandaru C. LabVIEW implementation of tracking filters for voltage dip detection. *IEEE EuroCon*. 2013. pp. 897-902. doi: 10.1109/EUROCON.2013.6625089.
 10. Smykov YuN, Kislitsin EYu, Ivanov MN. Upravlenie protsessami sistemy elektrosnabzheniya silovykh elektropriemnikov pri provale napryazheniya. *Uspekhi kibernetiki*. 2024; 5(1):61-68. (In Russ). doi: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-08.
 11. Sattarov R.R., Garafutdinov R.R. Research of the operation of a group of asynchronous motors at short-term voltage slopes for the conditions of the oil industry. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(6):92-100. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-6-92-100>
 12. Chervonchenko S.S., Frolov V.Ya. Research of the operation of an autonomous electrical complex with a combined composition of backup power sources. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(4):90-104. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-90-104>
 13. Khaleel, M., Yusupov, Z., Elmif, M., Elmenfy, T., Rajab, Z., & Elbar, M. (2023). Assessing the Financial Impact and Mitigation Methods for Voltage Sag in Power Grid. *Int. J. Electr. Eng. And Sustain.*, 1(3), 10–26. Retrieved from <https://ijees.org/index.php/ijees/article/view/40> Accessed: 16 Jan 2025.
 14. Almeida D., Cebrian J. Effects of Voltage Sags on Industrial Processes: Case Study. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2021, pp. 565–573. doi:10.46254/sa02.20210301
 15. Kornilov G. P., Kovalenko A. Yu., Nikolaev A. A. Ogranichenie provalov napryazheniya v sistemakh elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*. 2014; 23(2): 44-48. (In Russ).
 16. Gurevich Yu. E., Kabikov K. V. *Osobennosti elektrosnabzheniya, orientirovannogo na bespereboinuyu rabotu promyshlennogo potrebitelya*. Moscow: Eleks-KM; 2005. (In Russ).
 17. Bogdanov I. A., Senchilo N. D. Avtomaticheskaya sistema kompensatsii provalov napryazheniya v elektroenergeticheskikh sistemakh sudov s elektrodvizheniem. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2020; 49(3-1): 212-218. (In Russ). DOI 10.37220/MIT.2020.49.3.028.
 18. Ershov S. V., Pigalov M. S. Analiz sredstv i sposobov ogranicheniya vliyaniya provalov napryazheniya. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2017. 12(1):95-104. (In Russ).
 19. Sharma S. et al., A Comprehensive Review on STATCOM: Paradigm of Modeling, Control, Stability, Optimal Location, Integration, Application, and Installation. *IEEE Access*. 2024. vol. 12, pp. 2701-2729. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3345216.
 20. Liang X. et al. Improved Hybrid Reactive Power Compensation System Based on FC and STATCOM and Its Control Method. *Chinese Journal of Electrical Engineering*. 2022. Vol. 8, no. 2, pp. 29-41. doi: 10.23919/CJEE.2022.000012.
 21. Savina N.V., Lisogurskiy I.A., Lisogurskaya L.N. Selection of circuit and technical solutions for improvement the quality of electricity in adaptive networks with traction AC power. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(3):42-54. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-3-42-54>
 22. Ivanov I.Yu., Novokreshchenov V.V., Ivanova V.R. Current state of the problems of functioning of relay protection and automation complexes used in an active adaptive network. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(6):102-123. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-102-123>
 23. Dilshad S., Abas N., Farooq H., et al. NeuroFuzzy Wavelet Based Auxiliary Damping Controls for STATCOM. *IEEE Access*. 2020. 8:200367-200382. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3031934.
 24. Qingguang Y., Pei L., Wenhua L. and Xiaorong X.. Overview of STATCOM technologies. *2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies*.

Proceedings, Hong Kong, China, 2004, pp. 647-652 Vol.2, doi: 10.1109/DRPT.2004.1338063.

25. Hamdan I., Ibrahim A.M.A. and Nourdeeden O. Modified STATCOM control strategy for fault ride-through capability enhancement of grid-connected PV/wind hybrid power system during voltage sag. *SN Appl. Sci.* 2, 364 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2169-6>

26. Sharma V., Chandrakar V. Power Quality Enhancement by minimizing the effect of Voltage Sag in Non-linear Load Using D-STATCOM. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. 2325. 012019. 10.1088/1742-6596/2325/1/012019.

27. Du Z., Chen Z., Dai G., et al. Influence of DVR on Adjacent Load and Its Compensation Strategy Design Based on Externality Theory. *Energies* 2019, 12, 3716. <https://doi.org/10.3390/en12193716>

28. Umetaliev S. D., Galbaev Zh. T., Borukeev T. S., Galbaev A. Zh. Povyshenie kachestva stabilizatsii vykhodnykh parametrov istochnika bospereboinogo pitaniya dlya vetroustanovok. *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova*. 2024; 71(3):978-983. (In Russ) doi: 10.56634/16948335.2024.2.978-983

29. Oliveira T., Caseiro L., Mendes, A., Cruz S., Perdigão M. Model Predictive Control for Paralleled Uninterruptible Power Supplies with an Additional Inverter Leg for Load-Side Neutral Connection. *Energies* 2021, 14, 2270. <https://doi.org/10.3390/en14082270>

30. Gurevich V. Istochniki bospereboinogo elektropitaniya: ustroystvo, printsipy deistviya i primeneniye. *Silovaya elektronika*. 2012. Pt. 6, 39:63-70. (In Russ).

31. Caseiro L., Mendes A. Fault Analysis and Non-Redundant Fault Tolerance in 3-Level Double Conversion UPS Systems Using Finite-Control-Set Model Predictive Control. *Energies* 2021, 14, 2210. <https://doi.org/10.3390/en14082210>

32. Pandian S. Voltage Sag Compensation in Fourteen Bus System Using IDVR. *International Journal of Engineering and Technology*. 2017; 4. pp.183-186. <https://www.irjet.net/archives/V4/i3/IRJET-V4I338.pdf>

33. Mbuli N. Dynamic Voltage Restorer as a Solution to Voltage Problems in Power Systems: Focus on Sags, Swells and Steady Fluctuations. *Energies* 2023, 16, 6946. <https://doi.org/10.3390/en16196946>

34. Ivkin O.N., Kireeva E.A., Pupin V.M. Primeneniye dinamicheskikh kompensatorov iskazheniya napryazheniya s tsel'yu obespecheniya nadezhnosti elektrosnabzheniya potrebitel'ei. *Glavnyi energetik* 2006; 1: 28-31. (In Russ).

35. Fedotov A.I., Kuznetsov R.V., Fedotov E.A., Leuhin A.N. Effect of dynamic compensators voltage distortion on the power quality during faults on the electrical networks. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;(3-4):36-41. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-0-3-4-36-41>

36. Dai X., Ma X., Hu D., Duan J., Chen H. An Overview of the R&D of Flywheel Energy Storage Technologies in China. *Energies* 2024, 17, 5531. <https://doi.org/10.3390/en17225531>

37. Guorui R., Jinfu L., Jie W., et al. Overview of wind power intermittency: Impacts, measurements, and mitigation solutions. *Applied Energy*. 2017; 204:47-65. 10.1016/j.apenergy.2017.06.098.

38. Samineni S., Johnson B.K., Hess H., Law J.D. Modeling and analysis of a flywheel energy storage system for Voltage sag correction. *Industry Applications, IEEE Transactions on*. 2006; 42: 42 - 52. 10.1109/TIA.2005.861366.

39. Nor Anwar I. B., Hussain M. N. M., Noor S. Z. M., et al. Micro-Grid of Batteray Energy Storage System (BESS) Design for Malaysia's Net Energy Metering (NEM). *E3S Web of Conferences*. 2024; Vol. 473: p. 02001. doi 10.1051/e3sconf/202447302001

40. Lawder M. T. et al. Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications. *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 6, pp. 1014-1030, June 2014, doi: 10.1109/JPROC.2014.2317451

41. Fedotov A.I., Bakhteev K.R. Vliyanie forsirovki vobuzhdeniya sinkhronnykh mashin na uroven' ostatochnogo napryazheniya pri kratkovremennykh narusheniyakh elektrosnabzheniya. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2016;(7-8):64-71. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-7-8-64-71>. (In Russ).

42. Bakhteev K., Fedotov A, Misbakhov R. The improving efficiency of electric receivers on the industrial enterprises in case of short-term power outages. *Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Ostrava. Czech Republic. 2019, pp. 347-352.

43. Gruntovich N. V., Kapanskii A. A., Pupin V. M., Safonov D. O., Fedorov O. V. Vliyanie rabotayushchikh dvigatelei na ostatochnye napryazheniya uzlov kompleksnoi nagruzki stantsii. *Vestnik GGTU im. P.O. Sukhogo*. 2021. 85(2). (In Russ).

44. Chervonenko A.P., Kotin D.A., Rozhko A.V. Load switching between main power grid to the backup grid by standard automatic transfer switch. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(5):160-171. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-5-160-171>

45. Khramshin T.R. Sposoby povysheniya ustoichivosti elektroprivodov nepreryvnykh proizvodstv

pri provalakh napryazheniya. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»*. 2014; 14(2):80–87. (In Russ.)

46. Kornilov G.P., Khramshin T.R., Karandaeva O.I. Sposoby povysheniya ustoychivosti chastotno-reguliruemyykh elektroprivodov pri narusheniyakh elektrosnabzheniya. *Vestnik MGTU*. 2011 Magnitogorsk: GOU VPO «MGTU» 4: 79–84. (In Russ.).

47. Jafary P., Supponen A., Salmenperä M., Repo S. Analyzing Reliability of the Communication for Secure and Highly Available GOOSE-Based Logic Selectivity. *Security and Communication Networks*. 2019, 9682189: 16. <https://doi.org/10.1155/2019/9682189>

48. Akulova, AS. Formirovanie soobshchenii na tsifrovyykh podstantsiyakh. In: Akulova AS, Pecheritsa AS. *XX Vserossiiskaya studencheskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta; 03–04 Apr 2018; Nizhnevartovsk, Russia*. Nizhnevartovsk: Nizhnevartovskii gosudarstvennyi universitet, 2018. Pt. 1. pp. 425–428. (In Russ.).

49. Emel'yantsev A., Filin L. Linii 6–10 kV mezhdru elektrostantsiyami i energosistemoi. bystrodeistvuyushchaya logicheskaya zashchita. *Novosti elektrotekhniki*. 2021. 2(128)–3(129). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/45/11.php>. Accessed: 20 Jan 2025. (In Russ.).

50. Isakov R.G., Garke V.G. Kontseptsiya razvitiya releinoi zashchity sistema elektrosnabzheniya krupnogo promyshlennogo predpriyatiya. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2012;(7-8):46-54. (In Russ.).

51. Davydov D.A., Kholmov M.A., Nikitin K.I., Kletsel' M.Ya. Sposob postroeniya zashchity linii s primeneniem standarta MEK 61850 na primere mikroprotsessornogo terminala Sepam serii 1000+. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2024; 2(190):87–98. DOI:<https://doi.org/10.25206/1813-8225-2024-190-87-98>. (In Russ.).

52. Pfafenrot EV. Organizatsiya tsifrovoi logicheskoi zashchity elektroustanovok NPZ. Primery vnedreniya, perspektivy primeneniya. In: Pfafenrot EV. *VII nauchno-prakticheskaya konferentsiya „Releynaya zashchita i avtomatizatsiya elektroenergeticheskikh sistem Rossii“; 18–21 Apr. 2023; Cheboksary, Russia*. Cheboksary: Chuvashskii gosudarstvennyi universitet imeni I.N. Ul'yanova, 2023. pp. 143-147. (In Russ.).

53. Bollen M. H. J. et al. CIGRE/ CIREN/ UIE joint working group C4.110, voltage dip immunity of equipment in installations - Main contributions and conclusions. *CIREN 2009 - 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - Part 1*. Prague, Czech Republic, 2009, pp. 1-4, doi: 10.1049/cp.2009.0584.

Authors of the publication

Leonid T. Tukhvatullin - Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev, Kazan, Russia. tukhvatullinlt@stud.kai.ru.

Ruslan G. Isakov - Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev, Kazan, Russia. ruslanisakov@yandex.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Получено 25.02.2025 г.

Отредактировано 23.03.2025 г.

Принято 30.04.2025 г.