

ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ПОДАВЛЕНИЯ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Ю. Н. Смыков, С. В. Горелов

Сибирский государственный университет водного транспорта,
Россия, 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33

В статье рассмотрены процессы формирования детерминированных провалов напряжения в автономных системах электроснабжения, в том числе при электроснабжении плавучих инженерных сооружений с берега. В качестве автономной системы электроснабжения представлена схема судовой электроэнергетической системы. Изложены результаты исследования предлагаемого способа управления, полученные в процессе имитационного моделирования детерминированных провалов напряжения при автономной генерации электрической энергии в среде SimInTech. Произведён анализ процессов формирования кондуктивной низкочастотной детерминированной электромагнитной помехи в сетях с низкими интегральными показателями (малое значение токов короткого замыкания) электрических сетей плавучих инженерных сооружений. Приведены сравнения между требованиями, предъявляемыми к показателям качества электрической энергии, вырабатываемой на плавучем инженерном сооружении и вырабатываемой береговыми энергоустановками. Предложен способ повышения качества электрической энергии за счет предварительного регулирования и подготовки электроэнергетической системы к приёму соизмеримой (мощной) нагрузки.

Ключевые слова: система электроснабжения, защита от минимального напряжения, система управления, провал напряжения, автономная энергосистема, электромагнитная совместимость, качество электрической энергии.

Для цитирования: Смыков Ю. Н., Горелов С. В. Процессы формирования и подавления детерминированных провалов напряжения в автономных системах электроснабжения // Омский научный вестник. 2025. № 4 (196). С. 65–72. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-65-72. EDN: XJXVVK.



© Смыков Ю. Н., Горелов С. В., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

PROCESSES OF FORMATION AND SUPPRESSION OF DETERMINISTIC VOLTAGE FAILURES IN AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS

Yu. N. Smykov, S. V. Gorelov

Siberian State University of Water Transport, Russia, Novosibirsk, Schetinkina St., 33, 630099

The processes of formation of deterministic voltage failures in autonomous power supply systems, including the power supply of floating engineering structures from the shore, are considered. The scheme of the ship's electric power system is presented as an autonomous power supply system. The results of the study of the proposed control method obtained in the process of simulation of deterministic voltage failures during autonomous generation of electrical energy in the SimInTech environment are considered. The analysis of the processes of formation of conductive low-frequency deterministic electromagnetic interference in networks with low integral indicators (low value of short circuit currents) of electrical networks of floating engineering structures is carried out. Comparisons are provided between the requirements for quality indicators of electrical energy generated on a floating engineering structure and generated by onshore power plants. A method has been proposed to improve the quality of electrical energy through preliminary regulation and preparation of the electrical power system to receive a commensurate (powerful) load.

Keywords: power supply system, minimum voltage protection, control system, voltage drop, autonomous power system, electromagnetic compatibility, quality of electrical energy.



Введение

Распределительные сети плавучих инженерных сооружений имеют сложную разветвлённую структуру с большим количеством потребителей, от качественной работы которых зависит возможность безопасно и в необходимые сроки обеспечить или способствовать обеспечению перевозки грузов и пассажиров, а также выполнению иных государственных задач.

Основными отличительными особенностями электроснабжения плавучих инженерных сооружений является малая инерционность генерирующих мощностей, соизмеримость мощности источников электрической энергии и приёмников электрической энергии, широкое применение асинхронных электродвигателей в качестве привода машин и механизмов. Указанные отличительные особенности являются предпосылками к возникновению провалов напряжения как при автономной работе, так и при подключении электроэнергетической системы плавучего инженерного сооружения (судна) к береговой питающей сети. Из-за возникновения провалов напряжения происходит увеличение токов потребления электрических машин и перегрев последних, что приводит к снижению энергоэффективности, снижению срока службы или отказу, сбоям автоматизированных процессов и циклов работы электрооборудования, нарушениям работы защиты и автоматики, сбоям в работе микропроцессорной техники. Дополнительным фактором является сложность ремонта и/или замены в условиях эксплуатации судового электрооборудования, вызванная удалённым местонахождением судна, специализированным исполнением электрооборудования, ограничениями по монтажу и установке. Таким образом, тема исследования обладает высокой актуальностью, а с учётом возрастающей потребности в новых энерговооружённых судах, в том числе для освоения Арктики и развития Северного морского пути, актуальна в долгосрочной перспективе.

Согласно нормативным документам, при рассмотрении наличия кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по провалу напряжения, в том числе детерминированной, необходимо обратить внимание на следующие показатели качества электрической энергии [1]:

1. Остаточное напряжение U , % — ниже 90 % опорного напряжения.
2. Длительность провала напряжения Δt_n — до 1 мин.

При этом опорное напряжение (при оценке провалов, прерываний напряжения и перенапряжений) считают равным номинальному или согласованному напряжению электропитания.

Интерес представляет процесс возникновения данной помехи в случае соразмерной нагрузки, подключение которой возможно спрогнозировать (детерминировать) в автономных системах электроснабжения, с последующим анализом значимых факторов и выработке методов подавления помехи.

Цель и объект исследования

Цель — провести анализ процессов формирования кондуктивной низкочастотной детерминированной электромагнитной помехи в сетях с низкими интегральными показателями (малое значение токов короткого замыкания) электрических сетей плавучих инженерных сооружений. Основная задача исследования — сформировать и определить пути подавления указанной помехи при автономном электроснабжении судов, а также при электроснабжении от береговой электрической сети.

В условиях удалённых северных территорий, а также при обустройстве новых портов и терминалов в качестве берегового источника электрической энергии может выступать автономная система электроснабжения. Как правило, используется дизельная или газопоршневая энергоустановка, что несёт в себе дополнительные факторы снижения качества электрической энергии в части возникновения и проникновения в судовую сеть кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи, в том числе по провалу напряжения. Дополнительные факторы снижения качества электрической энергии связаны со снижением времени реакции на изменения электроэнергетических параметров (газопоршневые энергоустановки) и относительно более значительное влияние наброса нагрузки, в сравнении с централизованной системой электроснабжения. Схема судового электроэнергетической системы представлена на рис. 1.

В процессе исследования проанализированы различия между требованиями к качеству электрической энергии, вырабатываемой на плавучем инженерном сооружении, и береговыми установками. Сравнение требований ГОСТ 32144–2013 и требований правил классификации и постройки судов внутреннего плавания Российского речного регистра (ПСВП РРР) к показателям качества электроэнергии представлены в табл. 1.

Так как в общем случае вероятность возникновения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по провалу напряжения вследствие подключения детерминированной нагрузки зависит от соотношения мощностей короткого замыкания в приёмной и передающей системах, то определяющим фактором возникновения указанной помехи является не абсолютное значение мощности детерминированного потребителя, а соотношение

$$\frac{\delta X_{\text{пр}}}{\delta X_n} \approx f \frac{S_{\text{к,п}}}{S_{\text{к,пр}}}, \quad (1)$$

где $\delta X_{\text{пр}}$, δX_n — кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха в приёмной и передающей системе, %; $S_{\text{к,п}}$, $S_{\text{к,пр}}$ — полные мощности трёхфазных коротких замыканий (КЗ) в этих системах, кВА.

Прежде всего отметим, что электромагнитная обстановка определяется n -ым количеством стационарных случайных процессов, обусловленных нестандартными показателями качества электрической энергии. Все эти случайные процессы форми-

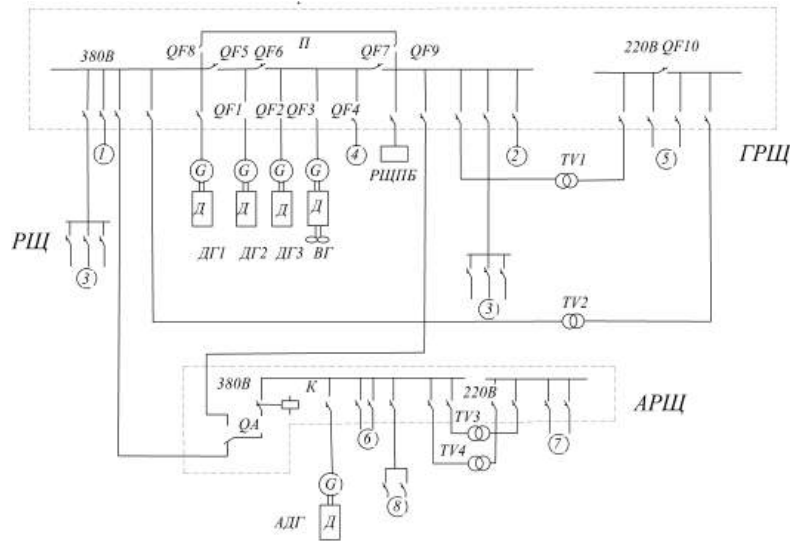


Рис. 1. Схема судовой электроэнергетической системы:
 1–8 — потребители электроэнергии: 1 — основные; 2 — резервные;
 3 — бытовые системы вентиляции, кондиционирования воздуха и т. п.;
 4 — подруливающие устройства; 5 — освещение; 6, 7 — особо ответственные;
 8 — зарядные устройства аккумуляторных батарей
Fig. 1. Ship's electrical system diagram: 1–8 — power consumers:
 1 — primary; 2 — backup; 3 — domestic ventilation, air conditioning, etc.;
 4 — thrusters; 5 — lighting; 6, 7 — critical; 8 — battery chargers

Таблица 1. Сравнение требований ГОСТ 32144–2013 и требований ПСВП РРР к показателям качества электроэнергии
Table 1. Comparison of the requirements of GOST 32144–2013 and the requirements of PSVP RRR for power quality indicators

Показатель качества электроэнергии	Обозначение по ГОСТ 32144 – 2013	Требования ГОСТ 32144 – 2013		Требования ПСВП РРР		
		Нормально допустимое значение	Предельно допустимое значение	Длительное значение отклонения	Кратковременное значение отклонения	Время кратковременного отклонения, с
Медленные изменения напряжения	$\delta U_m(+)$ $\delta U_m(-)$	—	$\pm 10 \%$	$+6 \% \dots -10 \%$	$+15 \% \dots -30 \%$	1,5
Перенапряжение	—	—	свыше 110 %	—	—	—
Кратковременная доза фликера	PSt	—	1,38 %	—	—	—
Длительная доза фликера	PLt	—	1 %	—	—	—
Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения	KU	8 %	12 %	—	10 %	—
Коэффициент несимметрии напряжений по обратной и несимметрии напряжений по нулевой последовательности	K2U; K0U	2 %	4 %	—	—	—
Отклонение частоты	δf	0,2 Гц	0,4 Гц	5 %	10 %	5
Провал напряжения	—	—	ниже 90 %	—	ниже 75 %	—
Длительность провала напряжения	δt_{np}	—	60 с	—	—	1,5

руют единый сложный электромагнитный процесс. В том числе нестандартные показатели качества электрической энергии оказывают консолидированное действие на приёмники электрической энергии. Например, консолидированное воздействие провалов напряжения и несимметрии питающего напряжения на асинхронные электродвигатели приводит к значительному снижению коэффициента полезного действия и более значительному перегреву электродвигателей относительно неконсолидиро-

ванного воздействия указанных показателей качества электрической энергии.

Исчерпывающая информация о таком сложном случайном процессе содержится в его многомерной интегральной функции распределения

$$F_n(X_1, X_2, \dots, X_n; t_1, t_2, \dots, t_n) = P(X_1 \leq X_1, X_2, \dots, X_n \leq X_n). \quad (2)$$

Указанная функция характеризует вероятность того, что в момент времени t_i случайная величина X_i не превысит определённого своего значения.

Многомерная дифференциальная функция распределения вероятности определяется по формуле

$$P_n(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n; t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n) = \frac{\partial^n F_n}{\partial X_1 \partial X_2 \dots \partial X_i \dots \partial X_n} \quad (3)$$

Для нормализации сложного электромагнитного процесса в автономных электроэнергетических системах необходимо подавить кондуктивные электромагнитные помехи (ЭМП), распространяющиеся по сетям. Осуществить это можно путём применения специальных мер по повышению помехозащищённости и помехоустойчивости автономной системы электроснабжения (АСЭС). Под помехозащищённостью понимается способность ослаблять действия кондуктивных ЭМП за счёт специальных помехозащитных средств (ПЗС), не относящихся к принципу действия или построения АСЭС. Помехоустойчивость (ПУ) означает способность электрической сети или системы сохранять заданное качество функционирования при воздействии кондуктивных ЭМП определённого уровня и в отсутствие специальных ПЗС. Повышение ПУ достигается параметрическими изменениями некоторых элементов функциональных узлов АСЭС для того, чтобы, помимо выполнения рабочих функций, эти элементы одновременно выполняли бы защитные функции.

С целью определения возможности параметрического изменения при формировании детерминированных провалов напряжения рассмотрим рис. 2, где представлен процесс в условиях подключения соразмерной нагрузки. Так как моменту подключения мощного потребителя, как правило, сопутствует процесс подготовки (например, запрос на разрешение запуска или предварительная продувка помещения перед подключением мощного грузового насоса и т.д.), то возникновение провала напряжения в данном случае следует считать детерминированным, а не случайным. Другим примером является подключение мощного электропривода, работающего в повторно кратковременном режиме, например, портального крана большой грузоподъёмности или электропривода плавкрана большой грузоподъёмности при электроснабжении от автономных береговых систем, при этом работа указанного приёмника электрической энергии также имеет циклы и закономерности.

Начало ЭМП по провалу напряжения и время длительности данной помехи рассмотрено на рис. 2.

Уравнение для определения минимального значения напряжения генератора при пуске асинхронного двигателя имеет следующий вид:

$$U_{\min} = U_{\text{уст}} + (U_{\text{нач}} - U_{\text{уст}}) \cdot e^{-t_{\min}/T_d'} + K_2 \cdot K [t_{\min} - T_d'(1 - e^{-t_{\min}/T_d'})],$$

$$T_d' = T_{d0} \frac{x_{AB} + x_d'}{x_{AB} + x_d} \quad (4)$$

где T_d' — постоянная времени обмотки возбуждения генератора при замкнутой обмотке статора на сопротивление x_{AB} ; T_{d0} — постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке статора ге-

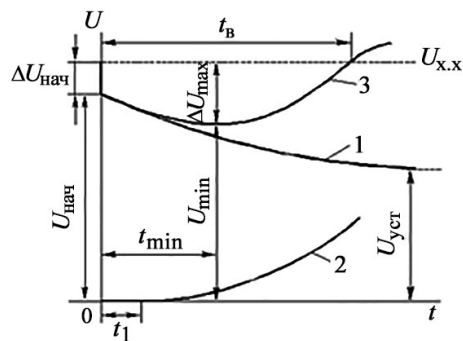


Рис. 2. Влияние наброса нагрузки:
1 — характеристика синхронного генератора, соответствующая понижению напряжения без воздействия регулятора напряжения;
2 — повышение выходного напряжения за счёт регулятора напряжения;
3 — результирующая кривая

Fig. 2. Effect of load surge:
1 — synchronous generator characteristic corresponding to voltage drop without voltage regulator intervention;
2 — output voltage increase due to voltage regulator;
3 — resulting curve

нератора, c ; K — коэффициент, характеризующий скорость нарастания напряжения возбуждения (для генераторов с самовозбуждением $K = 15 - 20$; $t_{\min}$ — время, при котором напряжение генератора имеет минимальное значение).

Время, при котором напряжение генератора имеет минимальное значение, определяется следующим образом:

$$t_{\min} = T_d' \left[\ln \left(\frac{U_{\text{нач}} - U_{\text{уст}}}{K_2 \cdot K \cdot T_d'} + 1 \right) \right] \quad (5)$$

При подключении мощного нагруженного электропривода, имеющего асинхронный электродвигатель в качестве движителя, провал напряжения (снижение напряжения ниже 90 %) наблюдается при мощности электродвигателя 5 % от суммарной мощности работающих в параллель генераторов.

С целью снижения количества провалов напряжения и повышения качества электрической энергии представляет интерес заблаговременное повышение частоты питающего напряжения и уровня напряжения в пределах допустимых значений. Это возможно, в том числе, из-за большего коридора регулирования указанных параметров по сравнению с береговой централизованной энергосистемой (табл. 1).

Моделирование и анализ результатов

С учётом указанных предпосылок произведено моделирование в среде SimInTech.

SimInTech (Simulation In Technic) — среда разработки математических моделей, алгоритмов управления, интерфейсов управления и автоматической генерации кода для контроллеров управления и графических дисплеев.

На рис. 3 и 4 представлено моделирование процесса возникновения провала напряжения без предварительной подготовки системы электроснабжения к набросу нагрузки. Соответственно, уровень напряжения выходит за нижнюю границу нормально допустимого значения 90 %, что говорит о наличии кондуктивной низкочастотной помехи в сети при подключении нагрузки и требует пода-

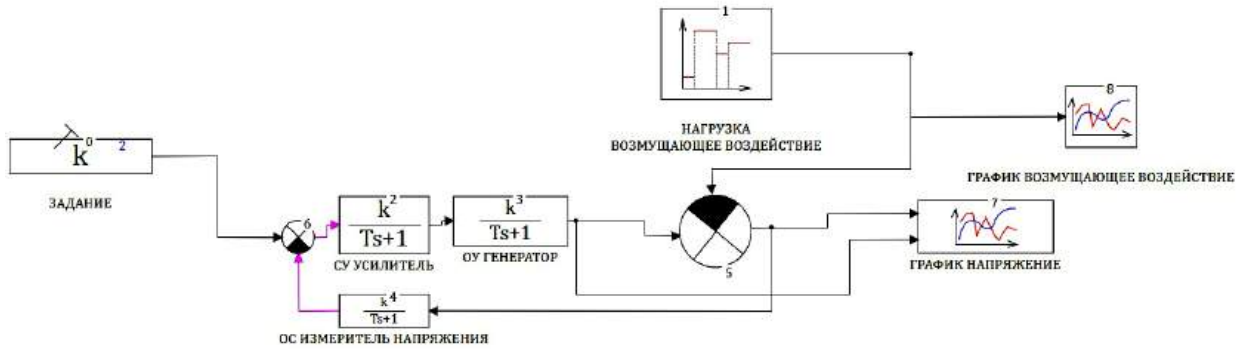


Рис. 3. Структурная схема системы регулирования напряжения без превентивного регулирования
Fig. 3. Structural diagram of a voltage regulation system without preventive regulation

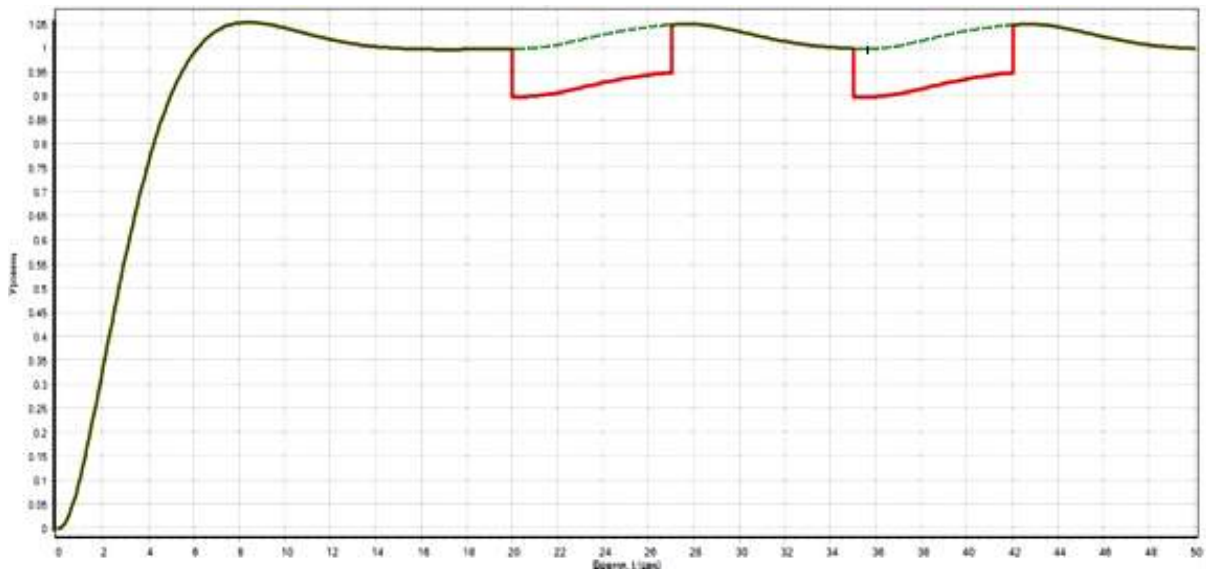


Рис. 4. Реакция на возмущающее воздействие системы регулирования напряжения без превентивного регулирования
Fig. 4. Response to disturbance of a voltage regulation system without preventive regulation

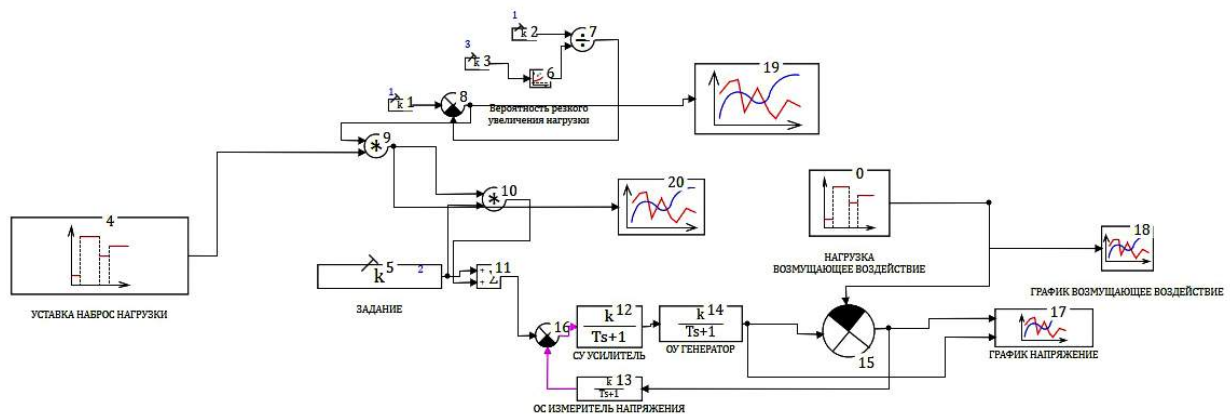


Рис. 5. Структурная схема системы регулирования напряжения с превентивным регулированием
Fig. 5. Structural diagram of a voltage regulation system with preventive regulation

вления [2–4]. Во втором случае, указанном на рис. 5 и 6, система электроснабжения заранее, за 2 с до подключения мощного потребителя, получает возможность предварительной подготовки к приёму нагрузки за счёт увеличения уровня напряжения в пределах нормально допустимых значений.

Сплошной линией обозначено изменение напряжения сети в относительных единицах, а штриховой — выходное напряжение регулятора напряжения.

Аспекты влияния провала напряжения, а также средства и способы снижения уровня и времени провала напряжения представлены в работах [4–9]. Известно, что преимущество принципа систем регулирования «по возмущению» в том, что регулятор начинает действовать на более ранней стадии, когда появилась только лишь причина рассогласования, а отклонение регулируемого параметра ещё не началось. В электроэнергетике процессы быстры, поэтому эффективность системы регулиро-

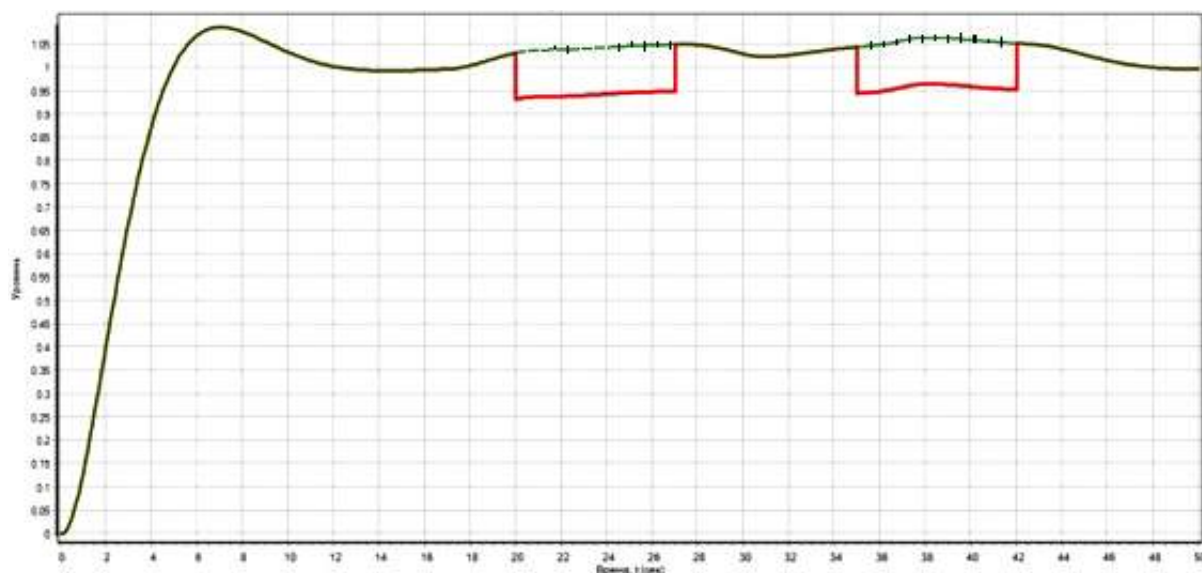


Рис. 6. Реакция на возмущающее воздействие системы регулирования напряжения с превентивным регулированием
Fig. 6. Response to disturbance of a voltage regulation system with preventive regulation

вания «по возмущению» снижается. Действительно, время возникновения возмущения (увеличение тока нагрузки) и время начала провала напряжения от указанного возмущения практически одновременны, поэтому оказать существенное воздействие на изменение электроэнергетических параметров АСЭС крайне затруднительно. Однако возможно применение принципа опережающего регулирования, базирующегося на детерминированности (обоснованности) вероятности возмущающего воздействия.

Рассмотрим пример: существует жёстко прописанный алгоритм запуска электропривода, включающий в себе продувку помещения, в котором он установлен (грузовой насос). Соответственно, запуск будет осуществлён с определённой выдержкой времени. Таким образом, появляется детерминированная вероятность подключения мощного потребителя. Зная соотношение мощностей подключаемого электродвигателя по отношению к мощности сети, вычисляем ожидаемую кондуктивную низкочастотную помеху по провалу напряжения. Далее следует заблаговременно увеличить напряжение (в пределах нормально допустимых значений, установленных ГОСТом 32133–2013), вырабатываемое генератором, с целью повышения качества электрической энергии в заданной АСЭС.

Вероятность появления возмущающего воздействия в локальной энергосистеме при электропитании судна с берега или ином случае, когда возможно и предусмотрено получение сигнала о процессе подготовки подключения мощного потребителя, определяется как

$$P_{\text{дет}}[x] = \begin{cases} 1 - e^{-x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}, \quad (6)$$

где x — коэффициент детерминации. Тогда

$$t_{\text{мин опт}} = T_d' \ln \left(\frac{U_{\text{нач}} - U_{\text{уст}}}{K_2 \cdot K \cdot T_d'} + 1 \right) - \frac{20P_{\text{дет}}}{K}. \quad (7)$$

Таким образом, снижается количество провалов напряжения в целом, увеличивается остаточное

напряжение и снижается длительность детерминированных провалов напряжения, что повышает качество электрической энергии мобильных и стационарных АСЭС. Другой предпосылкой является уже используемая система последовательного запуска (sequential start). Однако работа осуществляется по отклонению, когда провал напряжения уже сформирован, что в условиях быстроизменяющихся электроэнергетических параметров энергосистемы автономных объектов недостаточно.

За последние десятилетия особенно остро проявляются вопросы межфакторного взаимодействия снижения показателей качества электрической энергии. Так, при наличии гармонических составляющих в сети, а также высокого уровня несимметрии с одновременным возникновением детерминированного провала напряжения, происходит консолидация негативного воздействия. Увеличение загрузки асинхронных двигателей на 10 % при несимметричных провалах напряжения приводит к увеличению напряжения статической устойчивости в среднем на 0,8 % и к уменьшению допустимой длительности провала напряжения по условию сохранения динамической устойчивости в среднем на 5,8 % [10].

Выводы

При рассмотрении динамики развития судовых и береговых электроэнергетических систем прослеживается системное увеличение применения микропроцессорных средств, частотного электропривода, программируемых логических контроллеров как в отдельных подсистемах, так и в рамках создания безэкипажных судов и производств с минимальным количеством обслуживающего персонала.

Высокая чувствительность указанных выше систем к низким показателям качества электрической энергии, в том числе к провалам напряжения, демонстрирует необходимость учёта процессов формирования и подавления детерминированных провалов напряжения при проектировании систем электроснабжения в процессе эксплуатации и модернизации, что ещё раз подчёркивает актуальность данного направления работы.

В исследовании были решены следующие задачи:

1. Представлены процессы формирования детерминированных кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех по провалу напряжения.

2. Предложен способ повышения качества электрической энергии за счет предварительного регулирования и подготовки электроэнергетической системы к приёму соизмеримой (мощной) нагрузки, а именно повышения уровня напряжения и уровня частоты электрической сети (для судовых электроэнергетических систем) в пределах нормально допустимых значений.

3. Разработана программа для ЭВМ «Система управления комплексом электроснабжения судов с берега» [11], обеспечивающая повышение качества электрической энергии в части провалов напряжения при подключении силовых потребителей мобильных объектов или судовой автоматизированной электроэнергетической системы к береговой автономной системе электроснабжения.

Также был выполнен анализ наличия кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи и снижения вероятности появления указанной помехи, в том числе за счёт предиктивного (заблаговременного) регулирования напряжения и частоты автономных энергосистем. Предиктивное регулирование напряжения и частоты позволяет снизить перегрузку электрических машин, повысить динамическую устойчивость асинхронных и синхронных электродвигателей [12], повысить устойчивость частотного электропривода к более длительным провалам напряжения за счёт накопления энергии в магнитном поле электрических машин и инерционного вращения всех электроприводов во время провала напряжения. Повышение качества электрической энергии за счёт применения указанного выше способа регулирования позволяет значительно уменьшить количество глубоких и продолжительных детерминированных провалов напряжения, которые вызывают выход из строя оборудования; снижение производительности; снижение уровня энергоэффективности и электробезопасности; потерю времени на повторное включение частотного электропривода; потерю времени и электроэнергии на восстановление электроэнергетических параметров АСЭС; снижение срока службы электрооборудования и т. д.

Применение предиктивного регулирования напряжения и частоты АСЭС в условиях возникновения детерминированных провалов напряжения имеет высокое практическое значение, что связано не только с большим количеством мобильных и стационарных объектов с автономными системами электроснабжения, но и с повышением востребованности применения (с целью обеспечения меньшего негативного влияния на экологию и относительно низкой стоимости вырабатываемой энергии) газопоршневых энергоустановок. Газопоршневые энергоустановки, в свою очередь, при резком изменении нагрузки имеют более длительный переходный процесс по сравнению с дизель-генераторными установками.

Список источников / References

1. ГОСТ 32144–2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения

(EN 50160:2010, NEQ). Введ. 01–2014–07. Москва: Стандартинформ, 2014. 16 с.

GOST 32144–2013. Mezhgosudarstvennyy standart. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya (EN 50160:2010, NEQ) [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, 2014. 16 p. (In Russ.).

2. Ершов С. В., Пигалов М. С. Анализ средств и способов ограничения влияния провалов напряжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 12-1. С. 95–104. EDN: ZXGZJL.

Ershov S. V., Pigalov M. S. Analiz sredstv i sposobov ogranicheniya vliyaniya provalov napryazheniya [Analysis of means and methods of limitation of influence voltage fails]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2017. No. 12-1. P. 95–104. EDN: ZXGZJL. (In Russ.).

3. Зацаринная Ю. Н., Маргулис С. М., Федотов Е. А. Применение динамических компенсаторов искажений напряжения для повышения надежности системы электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. Т. 10, № 1 (37). С. 55–63. EDN: UTFBTK.

Zatsarinnyaya Yu. N., Margulis S. M., Fedotov E. A. Primeneniye dinamicheskikh kompensatorov iskazheniy napryazheniya dlya povysheniya nadezhnosti sistemy elektrosnabzheniya [Application of dynamic compensators of voltage disturbances for increasing the reliability of the electrical supply system]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. 2018. Vol. 10, no. 1 (37). P. 55–63. EDN: UTFBTK. (In Russ.).

4. Шпиганович А. Н., Черных И. А., Шилов И. Г. Провалы напряжения в высоковольтных электрических сетях // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2006. № 1. С. 16–19.

Shpiganovich A. N., Chernykh I. A., Shilov I. G. Provaly napryazheniya v vysokovol'tnykh elektricheskikh setyakh [Voltage dips in HV-networks] // *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya. News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region*. 2006. No. 1. P. 16–19. (In Russ.).

5. Choi S. S., Li J. D., Vilathgamuwa D. M. A generalized voltage compensation strategy for mitigating the impacts of voltage sags/swells. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005. Vol. 20, no. 3. P. 2289–2297. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.848442.

6. Qian Y., Zhang Y., Chen M. [et al.]. Research and application of test system for voltage dip ride through capability of electrical equipments. *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. 2014. P. 168–172. DOI: 10.1109/CICED.2014.6991686.

7. Ершов М. С., Егоров А. В., Валов Н. В., Комков А. Н. Учет несимметрии питающего напряжения в системах защиты от потери устойчивости промышленных электротехнических систем // Промышленная энергетика. 2011. № 9. С. 22–24. EDN: OGHOPX.

Ershov M. S., Egorov A. V., Valov N. V., Komkov A. N. Uchet nesimmetrii pitayushchego napryazheniya v sistemakh za shchity ot poteri ustoychivosti promyshlennykh elektrotekhnicheskikh system [Considering the asymmetry of the supply voltage in systems for protection against loss of stability of industrial electrical systems]. *Promyshlennaya energetika. Industrial Power Engineering*. 2011. No. 9. P. 22–24. EDN: OGHOPX. (In Russ.).

8. Егоров А. В., Новоселова Ю. В. Устойчивость асинхронных многомашинных комплексов при внешних многопараметрических возмущениях // Промышленная энергетика. 2000. № 11. С. 24–27. EDN: WFZUTD.

Egorov A. V., Novoselova Yu. V. Ustoychivost' asinkhronnykh mnogomashinnykh kompleksov pri vneshnikh mnogoparametricheskikh vozmushcheniyakh [Stability of asynchronous multi-machine complexes under external multi-parameter disturbances]. *Promyshlennaya energetika. Industrial*

Power Engineering. 2000. No. 11. P. 24–27. EDN: WFZUTD. (In Russ.).

9. Солодовников В. Е., Тульский В. Н., Шамонов Р. Г. Методика обработки статистической информации о провалах и кратковременных прерываниях напряжения в электрических сетях // *Электричество*. 2019. № 1. С. 4–16. EDN: VPXVGS.

Solodovnikov V. E., Tul'skiy V. N., Shamonov R. G. Metodika obrabotki statisticheskoy informatsii o provalakh i kratkovremennykh preryvaniyakh napryazheniya v elektricheskikh setyakh [A technique for processing statistical information for elaborating design solutions for protection from sags and short-term voltage interruptions]. *Elektrichestvo*. 2019. No. 1. P. 4–16. DOI: 10.24160/0013-5380-2019-1-4-16. EDN: VPXVGS. (In Russ.).

10. Лосев Ф. А., Сушков В. В. Разработка методики и алгоритмов оценки влияния несимметричных провалов напряжения на устойчивость узла асинхронной электродвигательной нагрузки нефтяных месторождений // *Омский научный вестник*. 2018. № 4 (160). С. 94–98. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-94-98. EDN: UZEKWC.

Losev F. A., Sushkov V. V. Razrabotka metodiki i algoritmov otsenki vliyaniya nesimmetrichnykh provalov napryazheniya na ustoychivost' uzla asinkhronnoy elektrodvigatel'noy na gruzki neftnykh mestorozhdeniy [Technique and algorithms for induction electromotive loading node stability assessment of oil fields at three-phase unbalance voltage sag]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2018. No. 4 (160). P. 94–98. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-94-98. EDN: UZEKWC. (In Russ.).

11. Переладов М. Е., Смыков Ю. Н. Система управления комплексом электроснабжения судов с берега: программа для ЭВМ. Москва: ФИПС, 2021. № 2022610299.

Pereladov M. E., Smykov Yu. N. Sistema upravleniya kompleksom elektrosnabzheniya sudov s berega [Control system for the ships power supply complex from the shore]: computer software. Moscow, 2021. No. 2022610299. (In Russ.).

12. Ершов М. С., Егоров А. В., Комков А. Н. Влияние несимметрии питающего напряжения на устойчивость синхронных двигателей // *Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И. М. Губкина*. 2012. № 1 (266). С. 117–128. EDN: SCCVHT.

Ershov M. S., Egorov A. V., Komkov A. N. Vliyaniye nesimmetrii pitayushchego napryazheniya na ustoychivost' sinkhronnykh dvigateley [Effect of voltage unbalance on stability of synchronous motors]. *Trudy Rossiyskogo gosudarstvennogo universiteta nefti i gaza imeni I. M. Gubkina. Proceedings of Gubkin University*. 2012. No. 1 (266). P. 117–128. EDN: SCCVHT. (In Russ.).

СМЫКОВ Юрий Николаевич, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника» Сибирского государственного университета водного транспорта (СГУВТ), г. Новосибирск.

SPIN-код: 4714-8430

AuthorID (РИНЦ): 892905

ORCID: 0009-0000-3976-6271

Адрес для переписки: sws1007@mail.ru

ГОРЕЛОВ Сергей Валерьевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электроэнергетические системы и электротехника» СГУВТ, г. Новосибирск.

SPIN-код: 9751-7557

AuthorID (РИНЦ): 694545

ORCID: 0000-0001-9048-7104

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 28.04.2025; одобрена после рецензирования 18.09.2025; принята к публикации 20.10.2025.

SMYKOV Yuriy Nikolayevich, Associate Professor of the Electric Power Systems and Electrical Engineering Department, Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk.

SPIN-code: 4714-8430

AuthorID (RSCI): 892905

ORCID: 0009-0000-3976-6271

Correspondence address: sws1007@mail.ru

GORELOV Sergey Valerievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Electric Power Systems and Electrical Engineering Department, Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk.

SPIN-code: 9751-7557

AuthorID (RSCI): 694545

ORCID: 0000-0001-9048-7104

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 28.04.2025; approved after reviewing 18.09.2025; accepted for publication 20.10.2025.