

УДК 621.31

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕЖФАКТОРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НИЗКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Смыков Юрий Николаевич¹, старший преподаватель кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника»

e-mail: sws1007@mail.ru

Горелов Сергей Валерьевич¹, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника»

e-mail: sws1007@mail.ru

¹ Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия

Аннотация. Статья посвящена поиску путей повышения качества электрической энергии в системах с распределенной генерацией и в судовых автоматизированных электроэнергетических системах. Большое внимание уделено аспектам взаимовлияния отклонения частоты питающего напряжения и провалов напряжения в энергосистемах ограниченной мощности, в том числе при запуске концентрированных потребителей. Рассматривается влияние показателей качества электрической энергии на потребители электрической энергии, в том числе в части появления и влияния кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по провалу напряжения. Предложен ряд технических решений и мероприятий, обеспечивающих высокий уровень энергоэффективности и высокие эксплуатационные показатели систем электроснабжения силовых потребителей электрической энергии, в условиях низких показателей качества электрической энергии.

Ключевые слова: энергоэффективность, энергосбережение, электронная генерация, кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха; электромагнитная совместимость.

FORECASTING AND IDENTIFICATION OF INTERFACTOR INTERACTION OF LOW ELECTRIC ENERGY QUALITY INDICATORS

Yuri N. Smykov¹, Senior teacher of the Department of "Electric Power Systems and Electrical Engineering"

e-mail: sws1007@mail.ru

Sergey V. Gorelov¹, Professor of the Department of "Electric Power Systems and Electrical Engineering"

e-mail: sws1007@mail.ru

¹ Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

Abstract. The article is devoted to the search for ways to improve the quality of electrical energy in systems with distributed generation and in ship-based automated power systems. Much attention is paid to the aspects of the mutual influence of the deviation of the frequency of the supply voltage and voltage drops in limited-capacity power systems, including during the start-up of concentrated consumers. The article examines the impact of the quality of electrical energy on consumers of electrical energy, including the appearance and influence of conductive low-frequency electromagnetic interference caused by voltage drops. A number of technical measures are proposed to ensure a high level of energy efficiency and high operational performance.

Keywords: energy efficiency, energy saving, electronic generation, conducted low-frequency electromagnetic interference; electromagnetic compatibility.

Одним из основополагающих факторов стабильного и устойчивого развития государства является современная развитая транспортная инфраструктура, в том числе в части водного транспорта. С учётом протяжённости рек и количества морей, омывающих нашу страну, поддержание высоких эксплуатационных показателей и развитие флота является актуальной долгосрочной задачей. Повышение энергоэффективности судовых электроэнергетических систем, в целом, и повышение качества электрической энергии, в частности, является залогом успешного решения указанной выше задачи.

В свою очередь вопрос повышения качества электрической энергии в судовой автоматизированной электроэнергетической системе имеет ряд объективных ограничений. К ограничениям можно отнести соизмеримость мощности источника электрической энергии и мощности концентрированных потребителей электрической энергии. В условиях активного развития генерации электрической энергии на основе газа, как первичного носителя энергии, вопросы формирования, распространения и взаимодействия показателей качества полученной электрической энергии стоят особенно остро. При неправильном прогнозировании указанных показателей возникает высокая вероятность выхода из синхронной работы генераторов, обесточивания энергосистемы и/или технологических нарушений, в том числе помпаж турбины. К значимым факторам также следует отнести возрастающие время воздействия на регулируемые электроэнергетические параметры, в условиях перехода на использование газа, как первичного топлива. Переход на указанный вид топлива имеет ряд преимуществ, в том числе меньшее количество вредных выбросов в окружающую среду, а в условиях стабильной неизменной нагрузки генераторная установка на основе газа, как первичного носителя имеет высокие электроэнергетические показатели. Однако при изменении нагрузки, особенно при распределенной генерации или при соизмеримой генерируемой мощности и мощности концентрированных потребителей, возникают значительные отклонения частоты питающего напряжения, которые в том числе формируют провалы питающего напряжения. Совокупность указанных факторов говорит об актуальности темы исследования в текущих условиях, в контексте транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года и в долгосрочной перспективе [5-9]. Рассмотрим таблицу 1, где представлены требования требований к централизованному береговому электроснабжению и требования к качеству электрической энергии для энергосистемы плавучих инженерных сооружений ПСВП РРР (Правила классификации и постройки судов внутреннего плавания Российский речной регистр).

Таблица 1 – Сравнение требований ГОСТ 32144-2013 и требований ПСВП РРР к показателям качества электроэнергии



Показатель качества электроэнергии	Обозначение по ГОСТ 32144-2013	Требования ГОСТ 32144-2013		Требования ПСВП РРР		
		Нормально допустимое значение	Предельно допустимое значение	Длительное	Кратковременное	Время кратковременного отклонения, с.
Медленные изменения напряжения	$\delta U_m(+)$ $\delta U_m(-)$	-	$\pm 10\%$	+6% -10%	+15% -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	0,2Гц	0,4Гц	5%	10%	5
Провал напряжения		-	ниже 90%	-	ниже 75%	-
Длительность провала напряжения	$\delta t_{пр}$	-	60 с	-	-	1,5

В береговых сетях изменение частоты питающего напряжения имеет небольшой коридор, поэтому влияние этого изменения на напряжение, как правило, рассматривается в аварийных режимах работы. Для указанного подхода, в условиях пренебрежения влияния частоты на напряжение сети получило распространение использование регулирующего эффекта нагрузки рисунок 1.

Происходит снижение мощности потребляемой энергосистемой, в том числе за счет снижения скорости вращения электроприводов систем и механизмов. Одновременно с указанным выше процессом происходит снижение питающего напряжения, вызванное реакцией якоря генератора и изменением скорости вращения первичного двигателя.

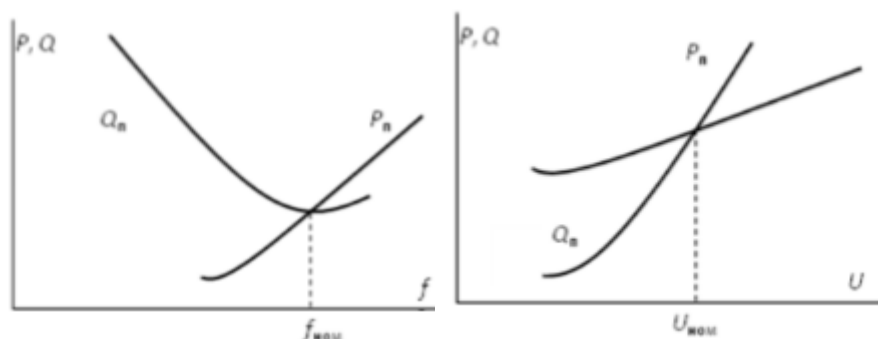


Рисунок 1 – Регулирующий эффект нагрузки по напряжению и по частоте питающего напряжения

Значительное отклонение частоты питающего напряжения в системах с распределенной генерацией оказывает влияние на напряжение на шинах главного распределительного щита и определяется через выражение 3.

Э.д.с. холостого хода

$$E_0 = 4,44fw\Phi_0k_{о\delta} = 4,44pn_2w\Phi_0k_{о\delta}, \quad (1)$$

где Φ_0 - магнитный поток полюса ротора (индуктора);

w - число витков в фазе обмотки статора;

p - число пар полюсов;

n_2 - частота вращения ротора;

$k_{о\delta}$ - обмоточный коэффициент, учитывающий конструктивные особенности обмотки статора (распределение по пазам и укорочение шага).

Напряжение на выводах синхронного генератора по второму закону Кирхгофа

$$\bar{U} = \bar{E}_0 - j\bar{I}_dX_d - j\bar{I}_qX_q, \quad (2)$$

$$\bar{U} = 4,44pn_2w\bar{\Phi}_0k_{о\delta} - j\bar{I}_dX_d - j\bar{I}_qX_q, \quad (3)$$

Так при запуске концентрированного потребителя электрической энергии или группы мощных потребителей происходит снижение частоты питающего напряжения, а значит происходит уменьшение остаточное напряжение и увеличение времени провала напряжения, что в свою очередь требует учета и применения технических средств и мероприятий по повышению качества электрической энергии.

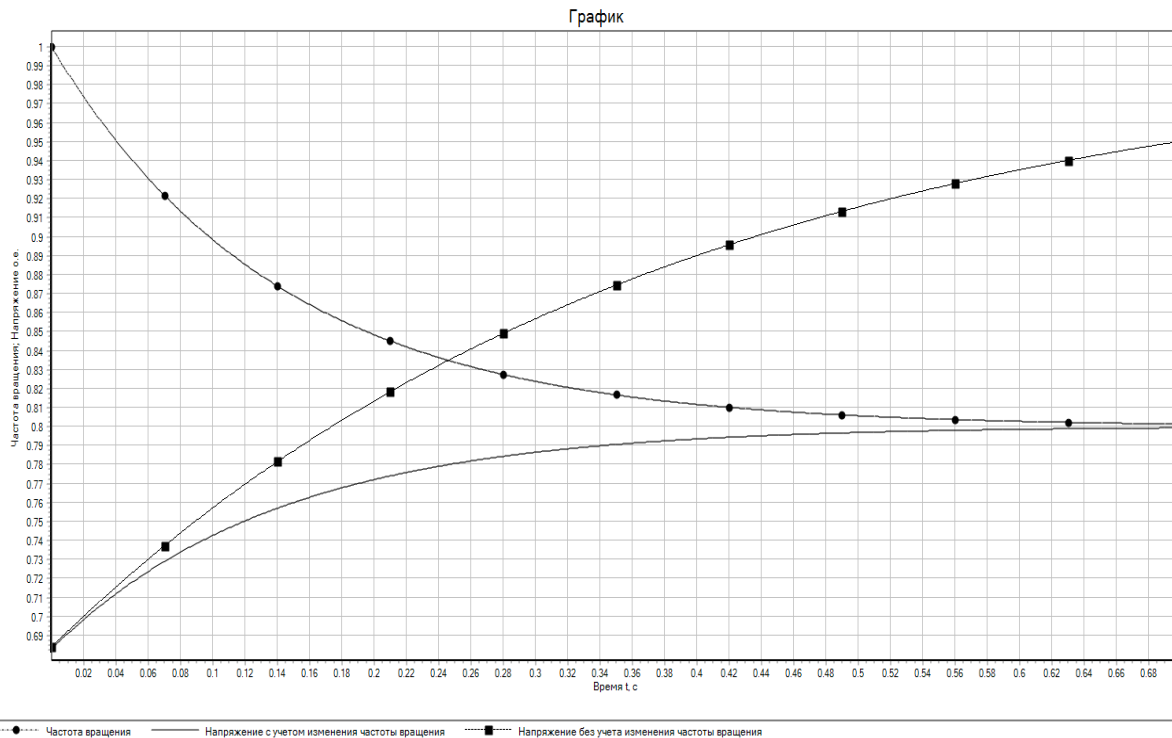


Рисунок 2 – График изменение напряжения системы электроснабжения судна проекта № 1754 при подключении концентрированного потребителя (подключение без токоограничивающих мероприятий)

На рисунке 2 наглядно представлена существенная разница в ожидаемом провале напряжения с учётом и без учёта изменения частоты вращения первичного двигателя.

Процесс формирования детерминированного (обусловленного подключением концентрированного потребителя) провала напряжения безусловно зависит от большого количества факторов, от текущей загрузки генерирующих мощностей, от текущей загрузки электроприводов, от наличия и уровня гармоник в сети, от наличия и уровня несимметрии в сети и так далее. Указанный выше аспект имеет важное значение при проектировании систем электроснабжения судов и при эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики, в том числе на судах со значительным износом источников электрической энергии. Особое значение недоучёт влияния частоты питающего напряжения на напряжение сети приобретает при рассмотрении широко внедряемых в энергосистемы различных уровней источников электрической энергии с первичным газовым двигателем таблица 2.

Таблица 2 – Сравнительный анализ переходных режимов дизель-генераторных и генераторных установок с газовым двигателем (ГОСТ 33105-2014)

Наименование показателя	Норма			
	G1	G2	G3	G4
Установившееся отклонение напряжения при неизменной симметричной нагрузке, %	±3	±1,5	±1,0	*
	±2	±1,0	±0,5	*
Установившееся отклонение напряжения при изменении симметричной нагрузки в диапазоне от 10 до 100% номинальной мощности, %	±5	±3,0	±2,0	*
Переходное отклонение напряжения, % При сбросе - набросе 100% симметричной нагрузки	±30	±20	±15	*

Продолжение Таблицы 2

Время восстановления, с, не более	5	4	3	*
При сбросе - набросе 50% симметричной нагрузки	±30	±20	±15	*
Время восстановления, с, не более	3	2	1	*
Переходное отклонение частоты, %				
При набросе 100% симметричной нагрузки, дизельный двигатель	-10	-8	-6	*
Время восстановления, с, не более	7	5	3	*
При набросе 50% симметричной нагрузки, газовый двигатель	-25	-20	-15	*
Время восстановления, с, не более	9	7	5	*

* класс G1 рассчитан на потребителей, для которых важными являются только основные характеристики

напряжения и частоты (системы освещения и прочие простые электрические нагрузки);

* класс G2 — на потребителей, у которых требования к характеристикам напряжения соответствует характеристикам напряжения систем электроснабжения коммерческих предприятий. При переключении нагрузок допускаются временные установленные отклонения напряжения и частоты (системы освещения, насосы, вентиляторы, подъёмники);

* класс G3 — на потребителей, которые предъявляют жёсткие требования к характеристикам напряжения,

частоты и форме кривой напряжения (средства дистанционной связи и тиристорные системы управления);



* класс G4 — на потребителей, которые предъявляют особо жёсткие требования к характеристикам напряжения, частоты и форме кривой напряжения (системы обработки данных или вычислительные системы).

Анализ таблицы 2 показывает, что отклонение частоты питающего напряжения в случае подключения концентрированных потребителей к источнику электрической энергии с газовым двигателем, значительно превышает значение отклонения частоты питающего напряжения при классическом использовании дизель-генераторного источника электрической энергии. Разработка и внедрения средств и технических мероприятий по повышению качества электрической энергии в автономных системах электроснабжения, с учётом вышеизложенного, является критически значимым для повышения надёжности и качества функционирования судовых автоматизированных электроэнергетических систем. В контексте транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 год является принципиально важным проработка мероприятий по повышению качества функционирования систем электроснабжения и снижения рисков ложных срабатываний защиты, в том числе при переходе на газовые двигатели и применение водорода, как первичного носителя энергии. При этом технические мероприятия по повышению качества электрической энергии являются комплексными и направлены на применение в различных режимах работы судов, в том числе при электроснабжении с берега во время стоянки в порту.

Результаты работы послужили основой для обоснования и создания характеристики защиты «время – остаточное напряжение» с использованием динамической уставки по времени срабатывания. С целью обеспечения физической основы указанной защиты, полученные математические расчёты заложены в алгоритм работы программы программируемого логического контроллера ПЛК 110-24.30.P-M (фирма производитель Овен). Программа выполнена в среде разработки CoDeSys Version 2.3.9.41 на языке непрерывных функциональных схем CFC. Полученная программа органически вливается и дополняет сценарии использования Smart Grid ("интеллектуальные сети электроснабжения"), позволяет расширить спектр решаемых задач и обеспечить высокие показатели энергоэффективности и энергосбережения, например «система управления комплексом электроснабжения судов с берега» [7]

К мероприятиям, обеспечивающим повышение качества функционирования указанных выше систем электроснабжения в том числе при электроснабжении с берега, является категорирование сетей по кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по провалу напряжения. Это необходимо с целью ухода от обработки большого количества данных к простой структуре категорий. Категорирование учитывает следующие аспекты: частота провалов напряжения, математическое ожидание глубины провала напряжения, величина глубины провала напряжения, вероятность появления провала напряжения, математическое ожидание длительности провала напряжения. На основе информации о категории береговой сети принимается обоснованное решение о возможности подключения электроэнергетической системы плавучего инженерного сооружения к береговой сети или о возможности подключения после значительного улучшения категории сети.

Таблица 3. Международная система классификации степени защиты



Степень защиты IP		IPx0	IPx1	IPx2	IPx3	IPx4	IPx5	IPx6	IPx7	IPx8
		Нет защиты	Падение вертикальных капель	Падение вертикальных капель под углом 15° от вертикали	Брызги под 60° от вертикали	Брызги со всех сторон	Струи со всех сторон небольшим давлением	Сильные потоки	Временное погружение (до 1 м)	Полное погружение
IP 0x	Нет защиты	IP00								
IP 1x	Частицы > 50 мм	IP10	IP11	IP12						
IP 2x	Частицы > 12,5 мм	IP20	IP21	IP22	IP23					
IP 3x	Частицы > 2,5 мм	IP30	IP31	IP32	IP33	IP34				
IP 4x	Частицы > 1 мм	IP40	IP41	IP42	IP43	IP44				
IP 5x	Пыль частично	IP50				IP54	IP55			
IP 6x	Пыль полностью	IP60					IP65	IP66	IP67	IP68

Таблица 4. Концепция международной классификации провалов напряжения систем берегового электроснабжения судов IDV (International Voltage Dip)

Провал напряжения IVD			M[δU_{Π}]								
			IVDx0	IVDx1	IVDx2	IVDx3	IVDx4	IVDx5	IVDx6	IVDx7	IVDx8
			не ограничено	до 90%	до 80%	до 70%	до 60%	до 50%	до 40%	до 30%	до 20%
M[Δt_{Π}]	IVD 0x	не ограничено	IVD00								IVD08
	IVD 1x	до 60с	IVD10							IVD17	IVD18
	IVD 2x	до 20с	IVD20						IVD26	IVD27	IVD28
	IVD 3x	до 3с	IVD30					IVD35	IVD36	IVD37	IVD38
	IVD 4x	до 1с	IVD40				IVD44	IVD45	IVD46	IVD47	IVD48
	IVD 5x	до 500мс	IVD50			IVD53	IVD54	IVD55	IVD56	IVD57	IVD58
	IVD 6x	до 100мс	IVD60		IVD62	IVD63	IVD64	IVD65	IVD66	IVD67	IVD68

Таким образом одним из путей совершенствования в области технического регулирования и повышения качества функционирования систем взаимодействия берегового электроснабжения и систем электроснабжения мобильных объектов, в том числе плавучих инженерных сооружений, является концепция международной классификации провалов напряжения систем берегового электроснабжения судов IDV (International Voltage Dip (Таблица 3)

1. Глубокий анализ и предложения к изменениям в нормативные документы, в части подключения и электроснабжения плавучих инженерных сооружений к береговой сети. В том числе ограничения по подключению к сетям с низкой категорией по кондуктивным низкочастотным электромагнитным помехам по провалу напряжения.

2. Использование двухфидерной независимой электропередачи «берег - судно» с целью разделения систем электроснабжения ответственных потребителей и особо ответственных потребителей.

3. Использование сухих трансформаторов с литой изоляцией обмоток, с целью минимизации рисков электропожаробезопасности и упрощению систем автоматизированного мониторинга и контроля параметров электроэнергетической системы плавучего инженерного сооружения и упрощению удалённого управления, что особенно важно при развитии значительно удалённых от централизованного электроснабжения районов страны, а также в зимний период работы.



4. Повышение качества электрической энергии, как при электроснабжении с берега, так и от автономной системы электроснабжения. Применение фильтрокомпенсирующих устройств, систем упреждающего регулирования напряжения сети при детерминированных провалах напряжения, применение систем накопления электрической энергии для демпфирования пиковой нагрузки и т.д.

Список литературы:

1. Смыков Ю.Н. Оптимизация системы электроснабжения судна с берега В сборнике: Россия молодая. Сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Редакционная коллегия: Костюк Светлана Георгиевна отв. редактор, Останин Олег Александрович, Хорешок Алексей Алексеевич, Дворовенко Игорь Викторович, Кудреватых Наталья Владимировна, Черкасова Татьяна Григорьевна,
2. Сальников В.Г., Смыков Ю.Н., Барков Д.А., Васильев С.М. СОХРАНЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПИТАНИИ СУДНА С БЕРЕГА.// Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 3. С. 160-163.
3. Смыков Ю.Н. Аспекты повышения качества электрической энергии в автономных системах электроснабжения // Промышленная энергетика. 2022. № 11. С. 17-23.
4. Ström L., Bollen M., Kolessar R. Voltage Quality Regulation in Sweden. [Proceedings of the 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, 6–9 June, 2011; Paper 0168] [Electron. Resurs] <https://cired.net/publications/cired2011> (Data of appeal 10.12.2022).
5. 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.
6. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (EN 50160:2010, NEQ). – М., Стандартиформ, 2014. – 16 с.
7. Переладов М.Е. Смыков Ю.Н. Система управления комплексом электроснабжения судов с берега / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022610299, 11.01.2022
8. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Богомолов И.И. Провалы напряжения в системах электроснабжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2018. № 12. С. 7-12.
9. Гладких Т.Д. Подход к защите нефтепромысловых потребителей от провалов напряжения // В сборнике: инновационные инструменты повышения эффективности технологического развития топливно-энергетического комплекса. VI Всероссийский научно-практический семинар-конференция. Нижневартовск, 2021. С. 68-71

