

Салимова А.К., Исмаилов С.С.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В статье предлагается способы улучшения качества электрической энергии на судах. Судовая электроэнергетическая система должна обеспечивать надежное функционирование судовых систем, безопасность плавания, условия жизни и работы экипажа, экономичное генерирование и распределение электроэнергии требуемого качества, а также иметь оптимальное сочетание стоимости ее монтажа и эксплуатации при удовлетворительных массогабаритных показателях, как отдельных элементов, так и всей системы в целом. Техничко-экономические показатели СЭЭС определяются, в первую очередь, рациональным выбором рода тока, частоты и величины напряжения в системе, которые являются основными параметрами СЭЭС.

Ключевые слова: судовая электроэнергетическая система, качество электрической энергии, стабилизации напряжения

Введение. Основные параметры, определяющие технико-экономическую эффективность судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) – это род тока, значение напряжения, частота тока. Важную актуальность приобретает сегодня и качество электрической энергии. По требованию морского регистра судоходства коэффициент несинусоидальности напряжения судовой электрической сети не должен превышать 10%.

Основная часть. На судах [1,2] разрешается применение постоянного и переменного тока. Однако опыт эксплуатации СЭЭС показал преимущества переменного тока, особенно при больших мощностях энергетических систем.

Сравнивая составные элементы СЭЭС постоянного и переменного тока, необходимо отметить, что при использовании постоянного тока судовые электроприводы отличаются хорошими регулировочными и пусковыми характеристиками; электrorаспределительные устройства – меньшими массой, габаритными размерами, стоимостью и объемом.

При использовании в СЭЭС переменного тока для электроприводов в основном применяются асинхронные короткозамкнутые двигатели, реже – асинхронные двигатели с фазным ротором и синхронные двигатели.

Асинхронные короткозамкнутые двигатели (благодаря отсутствию коллектора) обладают большей надежностью, меньшими на 30–40% массой и на 20–30% габаритными размерами, в 2–3 раза меньшей стоимостью, имеют более высокий КПД по сравнению с коллекторными двигателями и более низкий уровень шума.

Система управления асинхронным двигателем проще, а следовательно, он имеет большую надежность, меньшие габаритные размеры, массу и стоимость. Следует отметить сложность регулирования частоты вращения в широких пределах и значительные провалы напряжения при пуске мощных асинхронных короткозамкнутых двигателей.

Следует отметить, что СЭЭС переменного тока дают возможность:

- преобразовать напряжение с помощью трансформаторов;
- разделять на отдельные, электрически не связанные друг с другом части (силовую и осветительную сети);
- получать электроэнергию с берега без преобразователей;
- применять более высокое напряжение;

–повысить уровень унификации судового электрооборудования с электрооборудованием общего (берегового) применения.

Если приемники электроэнергии постоянного и переменного тока на судне сравнительно одинаковы и по важности, и по количеству (например, суда технического флота), вопрос о выборе рода тока решается рассмотрением вариантов с определением экономической эффективности, которая ожидается от их внедрения.

На некоторых судах применяются два рода тока, когда гребные электродвигатели питаются постоянным током, а остальные приемники – переменным.

Размещение СЭС может быть различным. При небольших мощностях СЭС источники, преобразователи и распределительные устройства станции размещают в машинном отделении. Иногда источники электрической энергии устанавливают в помещении, смежном с машинным отделением, а распределительное устройство – вблизи с постом управления главными двигателями. Конечно, наиболее удачным является размещение источников электроэнергии в отдельном помещении, а распределительного устройства – в центральном посту управления энергетической установкой.

Так как условия работы судового электрооборудования в целом отличаются от общепромышленных условий, то это определяет следующие к нему требования: судовое оборудование должно надежно работать при длительном крене до 15° и дифференте до 5° , бортовой качке с амплитудой до $22,5^\circ$ с периодом 7–9 с и килевой – до 10° от вертикали, повышенной влажности и температуре; при кренах, качках и дифферентах аппаратура не должна самопроизвольно включаться; подвижные контакты электрооборудования не должны изменять коммутационного положения при бортовой качке с амплитудой до 45° .

При этом судовые электрические станции должны обеспечивать возможность:

- раздельной и параллельной работы генераторных агрегатов, электрической защиты генераторов, ГРЩ и подсоединенных к ним кабельных линий при возникновении аварийных ситуаций;
- связи с береговыми электрическими системами и СЭЭС других судов;
- управления качеством распределения генерируемой электроэнергии;
- выполнения эксплуатационного наблюдения за элементами СЭС и проведения ремонтных работ.

Согласно правилам регистра, номинальные напряжения на выводах источников электроэнергии не должны превышать следующих значений: 0,4 кВ (400 В) – при трехфазной системе переменного тока; 0,230 кВ (230 В) – при однофазной системе переменного тока; 0,23 кВ (230 В) – при постоянном токе.

Для судов технического флота, а также для специальных судов допускается применение трехфазной системы напряжением до 10 кВ включительно.

Следует отметить, что напряжение до 1000 В практически не оказывает влияния на массу, габаритные размеры и стоимость электрических машин и трансформаторов. Масса, габаритные размеры и стоимость электрических аппаратов и кабельных линий электропередачи зависят от напряжения и тока, протекающего по ним, а следовательно, и электrorаспределительные щиты, в которых устанавливаются электрические аппараты, будут иметь массу, габаритные размеры и стоимость, зависящие от напряжения и тока.

Однако следует помнить, что при малой мощности СЭЭС существенную роль начинают играть такие факторы, как механическая прочность жилы кабеля, дискретность стандартных значений сечений жил кабелей и т.д.

Важную роль при выборе значения напряжения судна имеет и напряжение береговых установок, особенно при постоянном питании с берега. Следует также помнить, что повышение напряжения СЭЭС всегда связано с увеличением вероятности поражения электрическим током, поэтому по мере роста напряжения СЭЭС должна повышаться эффективность мероприятий по обеспечению безопасности обслуживания.

Сети освещения необходимо отделять от силовых сетей.

Основной частотой переменного тока как на судах, так и в береговых электроустановках принята частота 50 Гц.

На современных судах имеется группа приемников, частота тока которых равна 400–500 Гц (радиолокационное, навигационное и другое оборудование). Их питание осуществляется от судовой сети с частотой 50 Гц через преобразователи, вращающиеся и статические, количество которых на крупных судах может быть значительным. Для таких приемников иногда целесообразно иметь систему централизованного снабжения электроэнергией переменного тока частотой 400–500 Гц.

Исследования показали, что увеличение частоты питающего тока приводит к снижению массы и габаритных размеров у вращающихся машин, трансформаторов, магнитных усилителей, конденсаторов, элементов электроавтоматики. Однако масса и габаритные размеры коммутационных аппаратов при повышении частоты тока увеличиваются из-за ухудшения условий дугогашения, а в связи с этим из-за повышения тепловыделений в шинпроводах увеличиваются масса и габаритные размеры электрораспределительных устройств.

Повышение частоты отрицательно сказывается на массе и габаритных размерах электрических кабелей, так как увеличение частоты приводит к увеличению потерь энергии и электрического сопротивления кабелей.

Качества электрической энергии это совокупность свойств электрической энергии, определяющих ее пригодность для судовых электроприемников. К показателям качества в установившихся режимах относят:

- длительное отклонение напряжения в данной точке системы по отношению к номинальному значению, %:

$$\Delta U = \frac{100(U - U_{nom})}{U_{nom}} \% ;$$

- длительное отклонение частоты тока по отношению к номинальному значению, %

$$\Delta f_q = \frac{(f - f_{nom}) \cdot 100}{f_{nom}} \% ;$$

- коэффициент несимметрии напряжения основной частоты в трехфазной системе, %

$$K_{несим.} = \frac{(U_{max} - U_{min}) \cdot 100}{U_{nom}} \% ,$$

где U_{max} , U_{min} – максимальное и минимальное значения линейного напряжения;

- коэффициент амплитудной низкочастотной модуляции напряжения переменного тока, %

$$k_{мод} = \frac{\Delta U_{мод}}{U_n} 100,$$

где $\Delta U_{мод}$ – амплитуда огибающей модулированного напряжения;

- модуляцию напряжения, которая может характеризоваться частотой модуляции,

$$f_{мод} = 1/T_{мод},$$

где $T_{мод}$ – период огибающей модулированного напряжения;

- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, %

$$K = \frac{\sqrt{\sum_2^n U_n^2}}{U_1} 100\%,$$

где – $\sum_2^n U_n^2$ – сумма квадратов действующих значений высших гармонических составляющих U_n данной периодической кривой;

U_1 – действующее значение основной гармонической составляющей данной гармонической кривой, В;

- коэффициенты пульсации напряжения постоянного тока, %:

$$k_{\text{пульс}} = \frac{U_{\mu}}{U_{\text{ср}}} 100\%,$$

где U_{μ} – амплитуда низшей гармоники переменной составляющей выпрямленного напряжения;

$U_{\text{ср}}$ – среднее значение выпрямленного напряжения;

Для единообразия оценки пульсации напряжения при различных его средних значениях допускается величину $U_{\text{ср}}$ заменять $U_{\text{ном}}$, а величину $U_{\text{max}} + U_{\text{min}}$ – на величину $2U_{\text{ном}}$.

К показателям качества электроэнергии в переходных процессах СЭЭС относят: кратковременные отклонения напряжения, кратковременные отклонения частоты.

Следует отметить, что в последние двадцать лет в судостроении происходили быстрые и радикальные изменения, связанные с совершенствованием и применением гребных электрических установок. В эти годы для управления гребными двигателями переменного тока были разработаны преобразователи частоты большой мощности, созданы винторулевые колонки, современные гребные установки. Эти достижения намного повысили качественные характеристики гребных установок и позволили им потеснить пропульсивные комплексы с тепловыми двигателями, работающими непосредственно на гребной винт. По сравнению с другими видами пропульсивных комплексов современных гребных электроустановок обладают рядом преимуществ:

- повышение надежности судовой электроэнергетической установки и пропульсивного комплекса;
- улучшение маневренности судна;
- повышение КПД энергетической установки в долевых режимах;
- низкие уровни шума и вибрации;
- снижение эксплуатационных расходов;
- уменьшение сроков ремонтных работ;
- возможность более рационального размещения оборудования на судне.

Уникальные свойства современных гребных установок позволили в течение очень короткого времени найти применение на судах практически всех видов: круизных лайнерах, паромах, контейнеровозах, танкерах, рыбопромысловых, буксирах, судах снабжения и т.д.

ЭЭС современных судов с электродвижением строятся как единые системы, обеспечивающие питанием и многочисленными общесудовыми потребителями. От структуры и параметров СЭЭС зависят стоимость проектирования и постройки судов, работоспособность электрооборудования и систем автоматики, коммерческие показатели судов при эксплуатации, в том числе расход топлива, безопасность плавания судна и условия работы экипажа.

Отметим, что серьезной проблемой при создании СЭЭС является обеспечение электромагнитной совместимости общесудовых потребителей и гребных установок, которая для судовой электростанции является нелинейной нагрузкой. По требованию морского регистра судоходства [2] в полностью укомплектованной судовой электроэнергетической системе коэффициент несинусоидальной кривой напряжения не должно превышать 10%.

Судостроительные организации применяют структуру СЭЭС с трансформаторами в составе ГЭУ. В таких установках проблема электромагнитной совместимости достаточно успешно решена.

При создании современных СЭЭС с полным электродвижением необходимо генерация и преобразования электрической энергии для мощных потребителей с использованием современных полупроводниковых преобразователей и обеспечения их надежной работы. Вместо существующий ранее так называемой интерференции гармонического состава напряжения в современных СЭЭС гармонический состав напряжения в электрической ветвь суммируется. Это является основным отличием поставленной задачи от многочисленных работ по улучшению гармонического состава в «большой» и автономной энергетике.

Для создания СЭЭС необходим системный подход с учетом требований нормативных документов. В соответствии с ними вступают в действие кроме ограничения по качеству электроэнергии и другие требования (надежность, массогабаритные показатели, электромагнитная совместимость, тепловые потери и др.) При этом необходимо использовать несколько признаков.

На СЭЭС желательно добиваться минимального гармонического состава за счет относительно низкокзатратных способов преобразования электроэнергии (использование диодных мостов выпрямления, широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для систем управления, многоуровневых инверторов, расщепления обмоток и др.). В последнюю очередь необходимо использовать различные фильтры, в том числе и активные.

Обычно на гармонический состав тока и напряжения в СЭЭС влияют следующие факторы:

- параметры генератора;
- мощность эквивалентной асинхронной нагрузки;
- наличие традиционных фильтров и фильтрокомпенсирующих устройств и их параметры;
- использование активных фильтров;
- использование в статических полупроводниковых преобразователях (СПП) широтно-импульсной модуляции;
- использование многоуровневых инверторов;
- фазность системы электродвижения
- тип электродвигателя системы электродвижения (синхронный, асинхронный, вентильный)

Анализируя опыт проектирования и эксплуатации СЭЭС, можно сказать общесудовые потребители в зависимости от режима работы потребляют от 10 до 20% мощности. Однако использование мощных статических преобразователей в системе электродвижения других потребителей заставляет по новому формировать выходное напряжение при обеспечении качества электроэнергии.

Отметим, что статические преобразователи генерируют в сеть высшие гармоники. Общеизвестны их негативные последствия: снижение КПД и моментов электродвигателей, повышенный нагрев элементов системы, сбои в системах управления, связи и др. Если рассматривать типовую структурную схему (рис. 1), то видно, что необходимо обеспечивать синусоидальность токов и напряжений как на главном распределительном щите (ГРЩ), так в подсистеме электродвижения.

Основным параметром, влияющим на гармонический состав напряжения на ГРЩ, для типовых генераторов является сверхпереходное индуктивное сопротивление $-x_d''$. Уменьшение этого сопротивления приближает реальный источник электроэнергии к источнику бесконечной мощности. Применительно к судовым генераторам сопротивление x_d'' меняется от 0,11 до 0,32 о.е.

На судах часто устанавливаются приемники, требующие для своей работы электрическую энергию с параметрами, отличными от тех, с которыми вырабатывают ее источники.

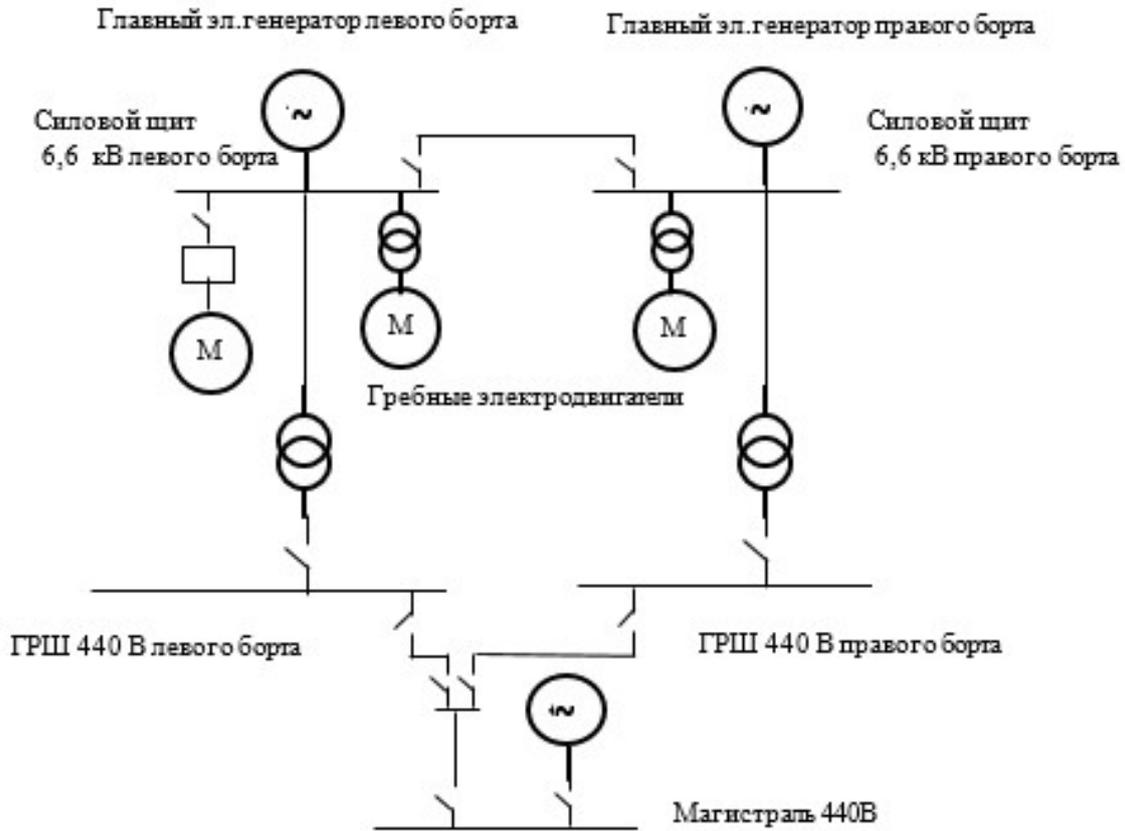


Рисунок 1 – Структурная схема СЭЭС

Например, на судне в качестве источников установлены трехфазные генераторы напряжением 400 В, а для приемника – электрического освещения – требуется напряжение 220 В. На небольших судах установлен источник – генератор постоянного тока 27 В, а приемник – холодильник, работающий от сети переменного тока 220 В. В этих случаях для питания указанных приемников требуется установка соответствующих преобразователей. Проще всего выполнить такие преобразователи в виде двухмашинного агрегата, где одна машина – двигатель – должна быть рассчитана на электроэнергию с параметрами источника, а другая – генератор – должна вырабатывать электроэнергию с параметрами, которые необходимы для работы этих приемников.

Однако вращающиеся преобразователи обладают рядом недостатков, которые присущи всем вращающимся машинам, например, наличием скользящих контактов, подшипников, поэтому часто оказывается целесообразным использование статических преобразователей, в которых нет частей, перемещающихся одна относительно другой.

В судовых электростанциях для преобразования электрической энергии обычно используются трансформаторы, выпрямители и инверторы. Другие преобразователи, например преобразователи частоты, чаще используются для отдельных электроприводов.

На небольших судах, на которых источником электрической энергии является только генератор, навешенный на главный двигатель и вырабатывающий электрическую энергию только во время работы главного двигателя, для снабжения электроэнергией всех приемников во время его стоянки необходима установка какого-либо накопителя энергии. Этот накопитель при работе генератора работает как приемник и накапливает энергию, а при стоянке генератора переходит в режим источника и отдает энергию в судовую сеть.

Многочисленные расчеты и мониторинг - непрерывный процесс наблюдения и регистрации параметров объекта, в сравнении с заданными критериями позволяют отметить, что в заданном диапазоне рассматриваемых мощностей и при заданных параметрах фильтров

коэффициент модуляции инвертора влияет на качество электроэнергии в системе электродвижения (СЭД), причем увеличение коэффициента модуляции (K_t) управления инвертором улучшает гармонический состав СЭД, однако это сказывается на уровне напряжения инвертора [1].

Для повышения показателей КЭЭ предлагается применение современных FACTS- (Flexible AC Transmission System) - гибкие управляемые системы переменного тока, для регулирования реактивной мощности и напряжения в судовой ЭЭС и снижения гармоник тока и напряжения, а также колебания напряжения при резких нагрузках.

К устройствам FACTS относятся устройств: продольной компенсации как традиционного типа, так и регулируемые тиристорно-реакторные группы, статические тиристорные компенсаторы; вставки постоянного тока; электромеханические преобразователи частоты. Если к этому классу устройств отнести управляемые реакторы и СК, то под FACTS следует отметить, что применение гибких передающих систем переменного тока повышает качества электрической энергии [3].

Совокупность устройств, устанавливаемых в судовой электрической сети и предназначенных для стабилизации напряжения, повышения устойчивости, оптимизации потокораспределения, снижения потерь, улучшает качества электрической энергии.

Установка быстродействующих STATCOM на шинах ВН (напряжением 6 кВ) и НН (440 В). Такое распределение STATCOM позволяет улучшение показателей качества электрической энергии на СЭЭС [4]. На рис.2 приведена схематическое представление СТАТКОМ

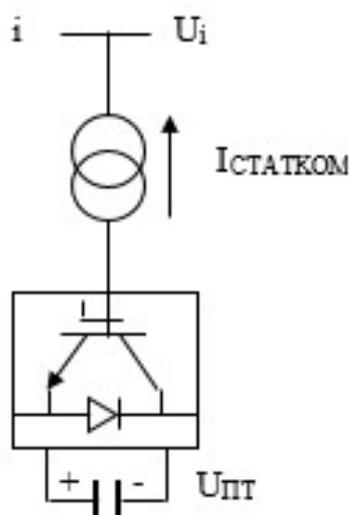


Рисунок 2 – Схематическое представление СТАТКОМ

Выводы. 1. Для повышения показателей КЭЭ предлагается применение современных FACTS для регулирования напряжения и реактивной мощности в судовой ЭЭС.

2. Используя активные фильтры для снижения гармоник напряжения возможно достичь нормально допустимые значения ПКЭЭ.

3. Применение быстродействующих СТАТОМ позволяет снижение колебаний напряжения при пусках асинхронных двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сеньюв А.А., Дмитриев Б.Ф., Калмыков А.Н., Токарев Л.Н. Судовые единые электроэнергетические системы // *Электротехника*. 2017. № 5.240 с.

2. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства. Т. 2. Санкт-Петербург, 2015. 300 с.

3. Баламетов А.Б., Халилов Э.Д. Применение гибких передающих систем переменного тока как эффективный способ решения проблем в ЭЭС. *Проблемы энергетики*. 2010. № 4. С. 20-28.

4. Баламетов А.Б., Халилов Э.Д., Исаева Т.М. Экспериментальные исследования влияния резкопеременной нагрузки на качество электроэнергии на высоковольтной подстанции. *Промышленная Энергетика*. 2008. №5. С.50-53.

Salimova A.K., Ismailov S.C.

METHODS INCREASED QUALITY ELECTRIC ENERGY IN SHIP ELECTRIC ENERGY SYSTEMS

The article proposes ways to improve the quality of electrical energy on ships. The ship electric power system must ensure reliable operation of ship systems, navigation safety, living and working conditions of the crew, economical generation and distribution of electricity of the required quality, as well as an optimal combination of the cost of its installation and operation with satisfactory weight and dimensions indicators the entire system as a whole. Technical and economic indicators of the SEES are determined, first of all, by the rational choice of the type of current, frequency and voltage in the system, which are the main parameters of the SEE.

Keywords: ship power system, quality of electric energy, voltage stabilization.

Салимова А.К., Ісмаїлов С.С.

МЕТОДИ ПОВИШЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СУДОВИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

У статті пропонується способи поліпшення якості електричної енергії на судах. Судова електроенергетична система повинна забезпечувати надійне функціонування судових систем, безпеку плавання, умови життя і роботи екіпажу, економічне генерування і розподіл електроенергії необхідної якості, а також мати оптимальне поєднання вартості її монтажу і експлуатації при удільно-масогабаритних показниках, як окремих елементів, так і всієї системи в цілому. Техніко-економічні показники СЕЕС визначаються, в першу чергу, раціональним вибором роду струму, частоти і величини напруги в системі, які є основними параметрами СЕЕС.

Ключові слова: суднова електроенергетична система, якість електричної енергії, стабілізації напруги.