

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-753-763

SOLVING THE PROBLEM OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN ELECTRIC POWER SYSTEMS WITH SEMICONDUCTOR CONVERTERS

A. V. Grigoryev^{1,2}

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — Saint Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg, Russian Federation

In recent years, semiconductor power converters have been increasingly used in marine electric power systems and electric propulsion systems. Semiconductor power converters are used in a frequency-controlled electric drive, including a rowing electric drive, combined pulse installations, valve generator sets, including halogen generator sets, in shore power devices. The use of semiconductor power converters leads to a decrease in the quality of electricity in the ship's network, in particular, the coefficient of harmonic voltage components increases. The rules of the Russian Maritime Register of Shipping (RS) regulate the quality of electricity and maximum emissions in the ship's network, which is necessary for the proper functioning of ship electrical equipment. To solve the problem of electromagnetic compatibility of electrical equipment and improve the quality of electrical energy in the ship's network, the various solutions are used. In particular, the traditional methods of improving the quality of electricity should include the separation of electrical networks using electric machine converters, transformers, additional installation of filter-compensating devices, connection of semiconductor power converters using three-winding transformers, etc. At the same time, on modern ships, the solution to the problem may be associated with the use of a new type of semiconductor power converters, made on the basis of active rectifiers, and the use of electric power systems with direct current electricity distribution, in which valve generator sets and valve static electricity sources are used as power sources. The structural schemes of traditional and electric propulsion systems, as well as promising circuit and technical solutions to solve the problem of electromagnetic compatibility are discussed in the paper. The analysis of technical solutions allowing to reduce the coefficient of harmonic components of the voltage in the ship's network and to ensure electromagnetic compatibility of ship electrical equipment is given.

Keywords: ship's electric power system, electromagnetic compatibility, quality of electric power, distortion of the ship's network, coefficient of harmonic components of voltage, semiconductor converter.

For citation:

Grigoryev, Andrey V. "Solving the problem of electromagnetic compatibility in electric power systems with semiconductor converters." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 13.5 (2021): 753–763. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-753-763.

УДК 629.123:621.31

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

А. В. Григорьев^{1,2}

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрены полупроводниковые преобразователи электроэнергии, которые в последние годы находят широкое применение в судовых электроэнергетических системах и системах электродвижения. Отмечается, что полупроводниковые преобразователи электроэнергии применяются в частотно-регулируемом электроприводе, включая гребной электропривод, комбинированные пропульсивные установки

в вентильных генераторных агрегатах, в том числе валогенераторных установках, в устройствах питания с берега. Применение полупроводниковых преобразователей электроэнергии приводит к снижению качества электроэнергии в судовой сети, в частности повышению коэффициента гармонических составляющих напряжения. Подчеркивается, что Правилами Российского морского регистра судоходства (РС) регламентируются качество электроэнергии и максимальные искажения в судовой сети, что необходимо для правильного функционирования судового электрооборудования. Для решения проблемы электромагнитной совместимости электрооборудования и повышения качества электроэнергии в судовой сети используют различные решения. В частности, к традиционным способам повышения качества электроэнергии следует отнести разделение электрических сетей с помощью электромашинных преобразователей, трансформаторов, дополнительной установки фильтрокомпенсирующих устройств, подключение полупроводниковых преобразователей электроэнергии с помощью трехобмоточных трансформаторов и др. Вместе с тем на современных судах решение проблемы может быть связано с применением полупроводниковых преобразователей электроэнергии нового типа, выполненных на основе активных выпрямителей, и применением судовых электроэнергетических систем с распределением электроэнергии на постоянном токе, в которых в качестве источников электроэнергии применяются вентильные генераторные агрегаты и вентильные статические источники электроэнергии. В статье рассмотрены структурные схемы традиционных судовых электроэнергетических систем и систем электродвижения, а также перспективные схемотехнические решения, позволяющие решить проблему электромагнитной совместимости. Выполнен анализ технических решений, позволяющий уменьшить коэффициент гармонических составляющих напряжения в судовой сети и обеспечить электромагнитную совместимость судового электрооборудования.

Ключевые слова: судовая электроэнергетическая система, электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, искажения судовой сети, коэффициент гармонических составляющих напряжения, полупроводниковый преобразователь.

Для цитирования:

Григорьев А. В. Решение проблемы электромагнитной совместимости в электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями / А. В. Григорьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 5. — С. 753–763. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-753-763.

Введение (Introduction)

В последние десять лет в судовых электроэнергетических системах (СЭЭС) и системах электродвижения (СЭД) находят все более широкое применение полупроводниковые преобразователи электроэнергии (ППЭ). ППЭ применяются в частотно-регулируемом электроприводе, включая гребной электропривод, комбинированные пропульсивные установки, вентильных генераторных агрегатах, в том числе валогенераторные установки, а также в устройствах питания с берега.

Применение ППЭ приводит к снижению качества электроэнергии в судовой сети, в частности к повышению коэффициента гармонических составляющих напряжения. Правилами Российского морского регистра судоходства (РС) регламентируются качество электроэнергии и ее максимальные искажения в судовой сети, что необходимо для правильного функционирования судового электрооборудования.

Для решения проблемы электромагнитной совместимости электрооборудования и повышения качества электроэнергии в судовой сети используют различные решения. В частности, к традиционным способам повышения качества электроэнергии относятся следующие: разделение электрических сетей с помощью электромашинных преобразователей, трансформаторов, дополнительной установки фильтр-компенсирующих устройств, подключение ППЭ с помощью трехобмоточных трансформаторов, дополнительную установку вспомогательной электростанции для питания общесудовых приемников электроэнергии. Вместе с тем на современных судах решение проблемы может быть связано с применением ППЭ на новой элементной базе, в частности активных выпрямителей, и применением СЭЭС с распределением электроэнергии на постоянном токе, в которых в качестве источников электроэнергии применяются вентильные генераторные агрегаты и вентильные статические источники электроэнергии.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Наиболее широкое применение ППЭ нашли в судовом регулируемом электроприводе и, прежде всего, в СЭД. В СЭД первого поколения для питания гребных электродвигателей (ГЭД) постоянного тока использовались генераторы постоянного тока. Регулирование частоты вращения ГЭД производилось по принципу «генератор-двигатель» за счет изменения тока в обмотке возбуждения генератора или ГЭД. Для питания общесудовых приемников электроэнергии использовалась вспомогательная судовая электростанция (СЭС) переменного тока. Искажений электроэнергии в судовой сети переменного тока в таких системах практически не происходило [1]–[3].

С развитием полупроводниковой техники для питания ГЭД постоянного тока начали применять неуправляемые выпрямители (НВ). В качестве главных генераторов в данных установках используются синхронные генераторы переменного тока с электромагнитным возбуждением. Регулирование напряжения, подводимого к ГЭД постоянного тока, выполнялось за счет генераторов путем изменения тока в обмотке возбуждения. В связи с этим на судне использовалась вспомогательная СЭС переменного тока для питания общесудовых систем. СЭС с СЭД двойного рода тока с НВ и вспомогательной СЭС переменного тока представлена на рис. 1.

На шинах щита электродвижения (ЩЭД) в СЭС данного типа, значение напряжения изменялось в широком диапазоне, а коэффициент гармонических составляющих кривой напряжения (K_u) значительно превосходил допустимое Правилами РС значение. На ГРЩ вспомогательной СЭС переменного тока K_u находится в допустимых РС пределах в связи с отсутствием ППЭ. Существенным недостатком данных СЭС является наличие двух СЭС, что существенно повышает стоимость и ухудшает масса-габаритные показатели судовой электроэнергетической установки [4]–[6].

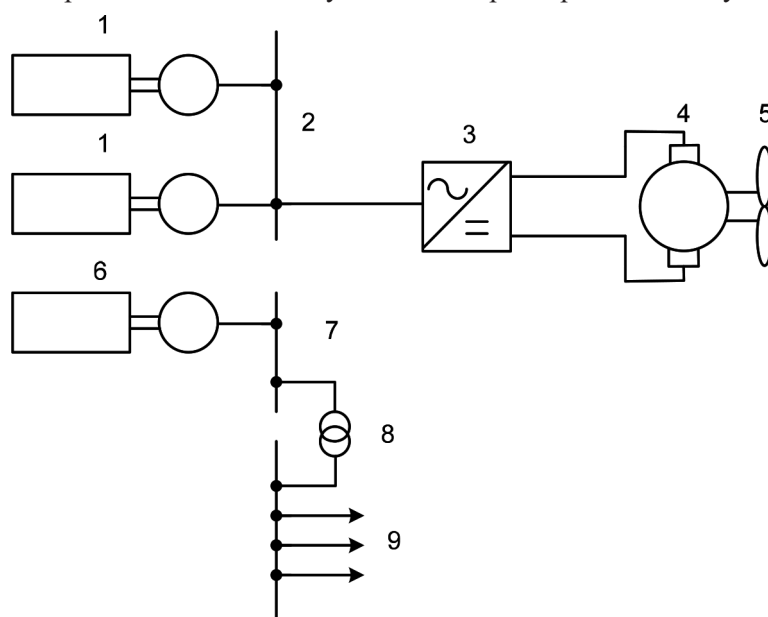


Рис. 1. СЭС с СЭД двойного рода тока и вспомогательной СЭС переменного тока:
1 — главный дизель-генератор; 2 — ЩЭД; 3 — НВ; 4 — ГЭД; 5 — гребной винт;
6 — вспомогательный дизель-генератор; 7 — ГРЩ; 8 — понижающий трансформатор;
9 — общесудовые приемники электроэнергии

После появления управляемых выпрямителей (УВ), построенных на однооперационных тиристорах, появилась возможность создания единых СЭС (ЕЭС), в которых главные генераторы питают как СЭД двойного рода тока, так и общесудовые приемники электроэнергии [7]–[9]. ЕЭС с СЭД двойного рода тока с УВ и электромашинными преобразователями приведена на рис. 2. УВ в данных ЕЭС напрямую подключаются на шины ЩЭД, а ГРЩ в связи с высоким значением K_u получает питание от ЩЭД через электромашинные преобразователи. По такому принципу построена ЕЭС с СЭД дизель-электрических ледоколов «Капитан Измайлов» и «Капитан Косолапов».

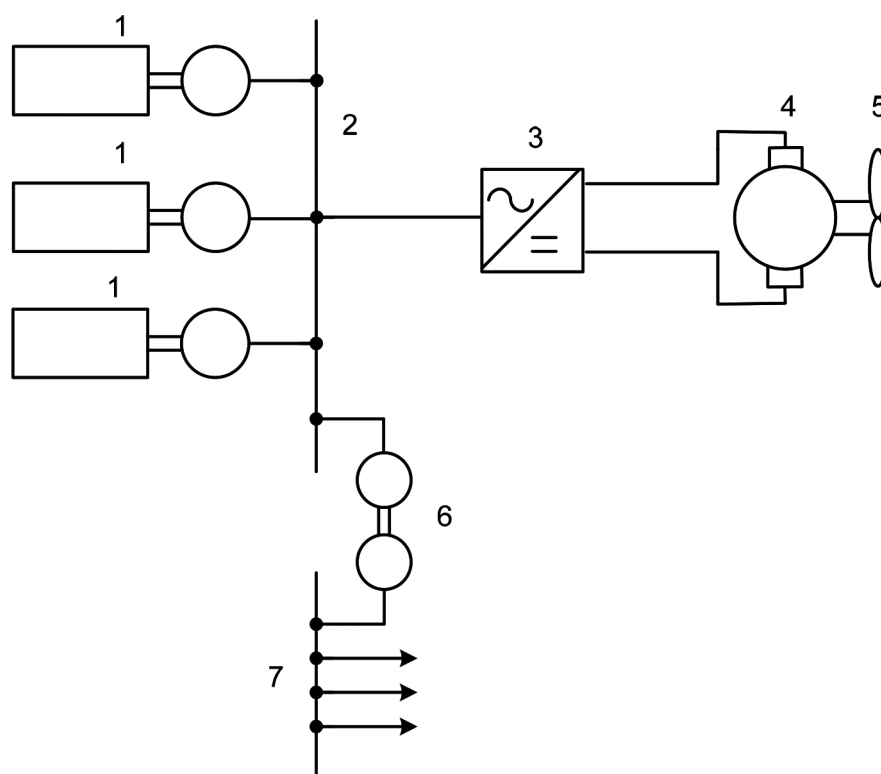


Рис. 2. ЕЭЭС и СЭД двойного рода тока с УВ: 1 — главный дизель-генератор; 2 — щит электродвижения; 3 — управляемый выпрямитель; 4 — гребной электродвигатель; 5 — гребной винт; 6 — электромашинный преобразователь; 7 — общесудовые приемники электроэнергии

С появлением полупроводниковых преобразователей частоты (ППЧ) в судостроение стали широко применяться СЭД переменного тока. В СЭД переменного тока первого поколения для питания синхронных ГЭД применялись ППЧ с непосредственной связью, построенные на однооперационных тиристорах, при этом ППЧ данного типа вносили значительные искажения в судовую сеть. Коэффициент гармонических составляющих кривой напряжения K_u на атомных ледоколах «Таймыр» и «Вайгач», в которых применяются ППЧ с непосредственной связью, превышает 10 %.

В последние десять лет в связи с развитием полупроводниковой техники наиболее широкое применение получили ППЧ со звеном постоянного тока, построенные на базе неуправляемых выпрямителей и автономных инверторов напряжения, выполненных на базе *IGBT* транзисторах. Для повышения качества электроэнергии и снижения K_u в составе СЭД стали применять ППЧ с двумя неуправляемыми выпрямителями на входе, включенными последовательно или параллельно, получающими питание от двух вторичных обмоток трехобмоточного трансформатора [10]–[12].

Применение трехобмоточного трансформатора с двумя обмотками, сдвинутыми в пространстве, позволяет добиться требуемого качества электроэнергии в судовой сети без применения дополнительных фильтрокомпенсирующих устройств или вращающихся электромашинных преобразователей. ЕЭЭС с СЭД переменного тока с ППЧ на базе НВ и АИ и трехобмоточными трансформаторами приведена на рис. 3. Данная ЕЭЭС с СЭД и ПЧ на базе двенадцатиимпульсных НВ реализована на малом гидрографическом судне «Вайгач» пр. 19910, опыт эксплуатации которого показал, что во всех режимах эксплуатации коэффициент гармонических составляющих кривой напряжения K_u не превышает допустимое Правилами РС значение, равное 8 %.

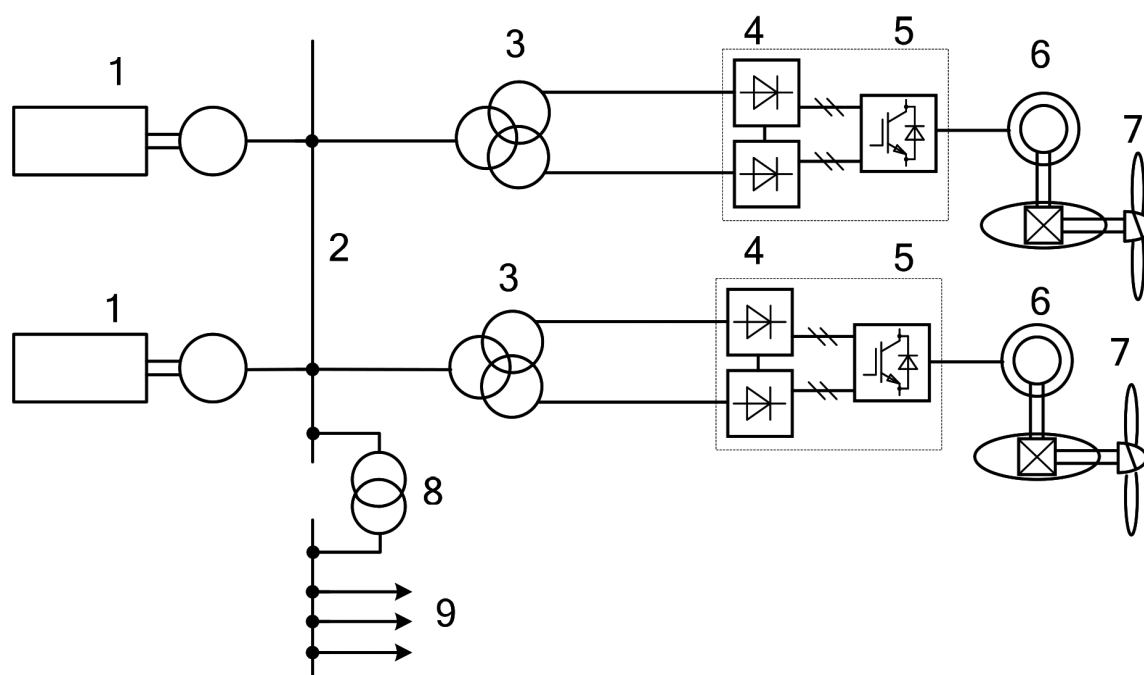


Рис. 3. ЕЭЭС с СЭД переменного тока с полупроводниковым преобразователем частоты по типу НВ-АИ и трехобмоточными трансформаторами:

- 1 — главный дизель-генератор; 2 — ГРЩ; 3 — трехобмоточный трансформатор;
4 — неуправляемый выпрямитель; 5 — автономный инвертор; 6 — ГЭД;
7 — винто-рулевая колонка; 8 — понижающий трансформатор;
9 — общесудовые приемники электроэнергии

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Развитие полупроводниковой техники связано с применением в составе СЭД переменного тока ППЧ со звеном постоянного тока на базе активных выпрямителей (АВ). Применение АВ с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) позволяет отказаться от установки трехобмоточных трансформаторов в составе СЭД. При этом коэффициент гармонических составляющих кривой напряжения $K_{и}$ в судовой сети значительно снижается, не требуя использования дополнительных фильтрокомпенсирующих устройств [13]–[15]. ЕЭЭС и СЭД переменного тока с ППЧ на базе активного выпрямителя приведена на рис. 4.

Данная ЕЭЭС и СЭД с ПЧ на базе АВ и АИ реализована на речном пассажирском судне «Княгиня Ольга». Результаты ходовых испытаний ЕЭЭС и СЭД, проведенные на этом судне, подтвердили, что во всех режимах эксплуатации коэффициент гармонических составляющих кривой напряжения $K_{и}$ не превышает допустимое Правилами РС значение, равное 8 % [20]–[22]. Аналогичное решение с применением ППЧ на базе АВ является перспективным для применения на судах с комбинированной пропульсивной установкой (КПУ) и обратимых валогенераторных установках. КПУ с винтом фиксированного шага (ВФШ) и ППЧ на базе АВ, в котором реализуется двигательный и генераторный режим эксплуатации ГЭД, представлена на рис. 5.

КПУ состоит из главного дизеля (ГД) и ГЭД, которые через редуктор подключены к ВФШ. ГЭД получает питание от обратимого ППЧ, выполненного на базе АВ и АИ, работающих в режиме активного выпрямителя и автономного инвертора. Скорость судна меняется путем изменения частоты вращения ВФШ [16]–[18]. В данной КПУ ГЭД может работать в валогенераторном режиме, при этом ход судна обеспечивает ГД, который приводит в движение ВФШ. Работа ГЭД в режиме валогенератора позволяет отказаться от работы вспомогательного дизель-генератора (ДГ) в ходовом режиме.

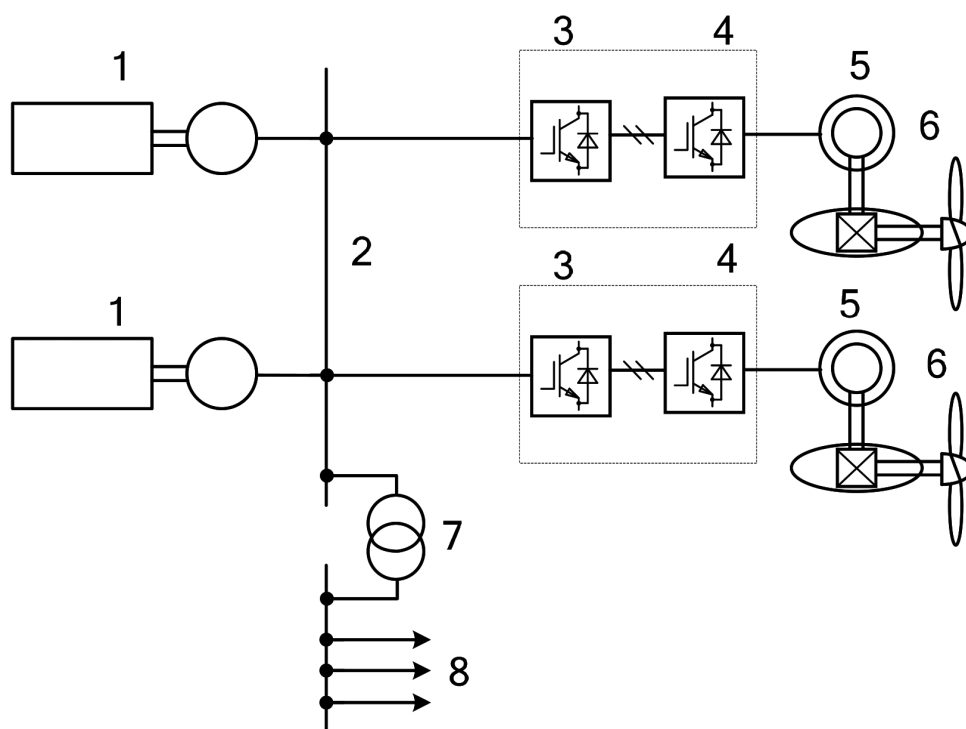


Рис. 4. ЕЭЭС и СЭД переменного тока с ППЧ
по типу активный выпрямитель-автономный инвертор: 1 — главный дизель-генератор;
2 — ГРЩ; 3 — активный выпрямитель; 4 — автономный инвертор; 5 — ГЭД;
6 — винто-рулевая колонка; 7 — понижающий трансформатор;
8 — общесудовые приемники электроэнергии

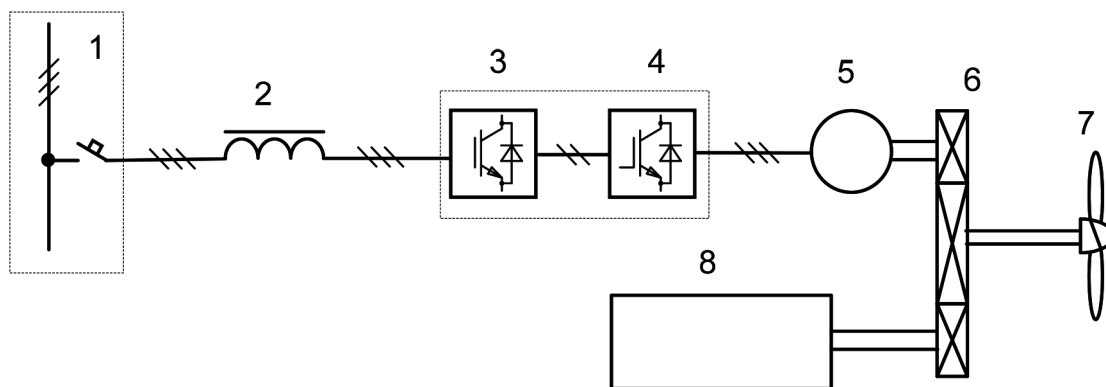


Рис. 5. Комбинированная пропульсивной установки с ВФШ и ПП
1 — ГРЩ; 2 — дроссель; 3 — активный выпрямитель; 4 — автономный инвертор;
5 — ГЭД; 6 — редуктор; 7 — ВФШ; 8 — главный дизель

В КПУ с обратимым ПП могут быть реализованы следующие режимы эксплуатации:

- автономная и совместная работа ГД и ГЭД на гребной винт;
- валогенераторный режим работы ГЭД с отбором мощности от ГД как автономно, так и в режиме параллельной работы с судовыми ДГ;
- стартерный запуск ГД от ГЭД.

Данная КПУ реализована на двух рабочих катерах: «Анатолий Климов» и «Виктор Ворыло», которые успешно прошли испытания и введены в период эксплуатации 2020 г. Результаты проведенных испытаний показали, что качество электроэнергии в судовой сети на данных судах соответствует требованиям РС.

На судах морского флота наиболее широкое применение в качестве источников электроэнергии в настоящее время находят генераторные агрегаты (ГА), работающие с постоянной частотой вращения. Данные ГА напрямую подключены к главному распределительному щиту (ГРЩ). В ЕЭЭС с СЭД нагрузка ГА изменяется в широком диапазоне, в связи с чем значительно снижается их экономичность и надежность. Решением данной проблемы является применение вентильных ГА, состоящих из приводного двигателя, генератора и ППЭ.

Вентильные ГА работают с переменной частотой вращения по оптимальной с точки зрения расхода топлива характеристике. ППЭ поддерживают постоянство параметров электроэнергии в судовой сети. Для стабилизации электрических параметров (напряжения и частоты) в судовой сети при переменной частоте вращения вентильного ГА применяется ППЭ. Приводной двигатель вместе с генератором и ППЭ образуют вентильный ГА. Структурная схема вентильного ГА приведена на рис. 6.

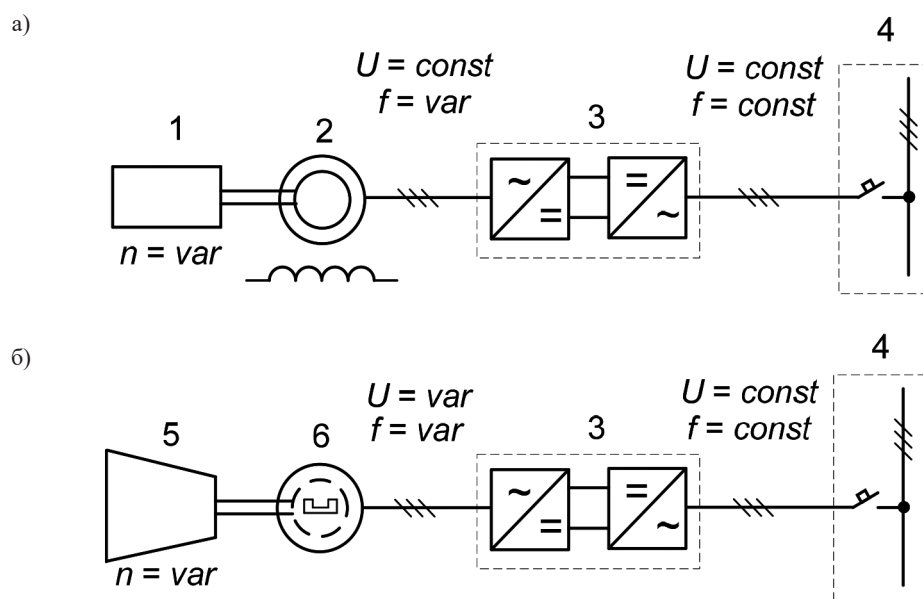


Рис. 6. Вентильный генераторный агрегат:

а — на базе дизеля; б — на базе турбины:

- 1 — приводной дизель; 2 — синхронный генератор с электромагнитным возбуждением;
 3 — неуправляемый выпрямитель; 4 — автономный инвертор; 5 — ГРЩ;
 6 — турбина; 7 — синхронный генератор с постоянными магнитами;
 8 — активный выпрямитель

В качестве приводного двигателя в составе вентильного ГА может применяться дизель, газовые или паровые турбины. В качестве генератора в составе вентильных ГА могут использоваться электрические машины разных типов, в том числе синхронные с электромагнитным возбуждением, синхронные с постоянными магнитами, асинхронные или индукторные.

Структурная схема вентильного дизель-генераторного агрегата приведена на рис. 6, а, вентильного турбогенераторного агрегата — на рис. 6, б. В состав вентильного дизель-генераторного агрегата входит приводной дизель, работающий с переменной частотой вращения, синхронный генератор с электромагнитным возбуждением и ППЭ, который состоит из НВ и АИ. Стабилизация напряжения осуществляется с помощью системы возбуждения СГ, частоты — с помощью АИ.

В состав вентильного турбогенераторного агрегата входит приводная турбина, работающая с переменной частотой вращения, высокооборотный синхронный генератор с возбуждением на постоянных магнитах и ПП, выполненный по типу АВ — АИ. Стабилизация напряжения вентильного ГА осуществляется с помощью АВ, а частоты, как и в предыдущем случае, с помощью АИ [23]. Распределение электроэнергии в ЕЭЭС с СЭД в случае применения вентильных ГА целесообразно

производить на постоянном токе. При этом повышается экономичность СЭЭС, уменьшается количество ППЭ, значительно упрощается система управления и регулирования ГА и СЭД. Кроме того, решается вопрос электромагнитной совместимости электрооборудования и повышается качество электроэнергии в судовой сети. В СЭЭС данного типа общесудовые приемники электроэнергии получают питание от вспомогательного инвертора напряжения, подключенного к ЩЭД постоянного тока. На рис. 7 приведена ЕЭЭС и СЭД с распределением электроэнергии на постоянном токе.

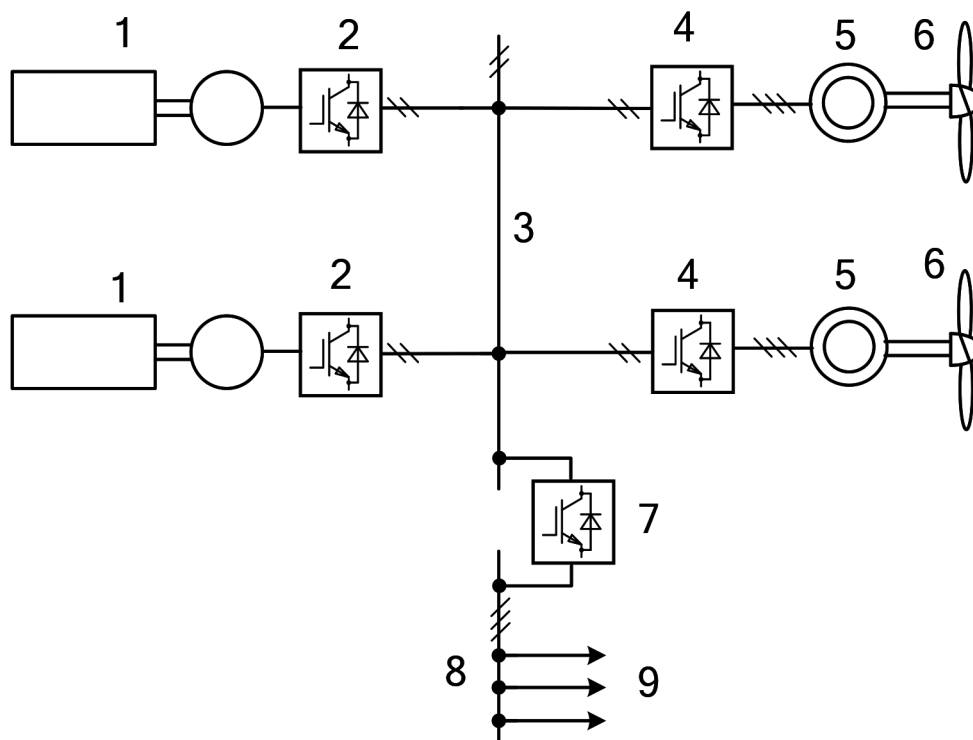


Рис. 7. ЕЭЭС с СЭД и распределением электроэнергии на постоянном токе:

- 1 — главный дизель-генератор; 2 — активный выпрямитель; 3 — щит электродвижения постоянного тока;
4 — автономный инвертор системы электродвижения; 5 — ГЭД; 6 — гребной винт;
7 — автономный инвертор общесудовых электроприемников; 8 — ГРЩ переменного тока;
9 — общесудовые приемники электроэнергии

Электроэнергию в данной ЕЭЭС вырабатывают вентильные ГА, которые работают с переменной частотой вращения. АВ стабилизирует номинальное значение напряжения в судовой сети постоянного тока и подключен к ЩЭД. АИ преобразуют электроэнергию постоянного тока в электроэнергию переменного тока и питают ГЭД. Для питания общесудовых приемников электроэнергии переменного тока применяется вспомогательный АИ.

Выводы (Summary)

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Применение полупроводниковых преобразователей электроэнергии в составе СЭЭС и СЭД приводит к снижению качества электроэнергии в судовой сети и необходимости решения проблемы электромагнитной совместимости судового электрооборудования.

2. Традиционными методами решения проблемы электромагнитной совместимости в СЭЭС и СЭД с ППЭ является применение электромашиных преобразователей, трехобмоточных трансформаторов, фильтрокомпенсирующих устройств, а также вспомогательной электростанции для питания общесудовых приемников электроэнергии. Использование дополнительного оборудования для решения проблемы электромагнитной совместимости приводит к повышению стоимости, снижению КПД, ухудшению массогабаритных показателей СЭЭС и СЭД.

3. На современном этапе развития полупроводниковой техники для решения проблемы электромагнитной совместимости возможно использование в составе СЭД и вентильных ГА активных выпрямителей, которые практически не снижают качество электроэнергии в судовой сети.

4. Перспективным решением на судах с ЕЭЭС и СЭД является использование систем распределения электроэнергии на постоянном токе, что упрощает решение проблемы электромагнитной совместимости судового электрооборудования и улучшает технико-экономические характеристики судовой электроэнергетической установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов.— СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2021.— Ч. XI.— 366 с.
2. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов. Ч. IV.— СПб: Российский морской регистр судоходства, 2021.— 532 с.
3. Руководство по техническому наблюдению за постройкой судов.— СПб: Российский морской регистр судоходства, 2021.— 523 с.
4. Григорьев А. В. Перспективы применения статических источников электроэнергии на судах с системами электродвижения / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин, С. М. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.— 2020.— Т. 12.— № 1.— С. 202–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-202-213.
5. Григорьев А. В. Судовые комбинированные пропульсивные комплексы нового поколения / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер // Морской вестник.— 2013.— № 2S (11).— С. 49–50.
6. Хватов О. С. Судовая пропульсивная гибридная установка / О. С. Хватов, И. А. Тарпанов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта.— 2013.— № 35.— С. 337–340.
7. Григорьев А. В. Судовые комбинированные пропульсивные установки / А. В. Григорьев // Морской флот.— 2013.— № 2.— С. 50–52.
8. Хватов О. С. Математическая модель судовой гибридной пропульсивной установки / О. С. Хватов, О. А. Бурмакин, И. А. Тарпанов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта.— 2009.— № 27.— С. 150–154.
9. Григорьев А. В. Судовые комбинированные пропульсивные установки / А. В. Григорьев, А. Ю. Попов, С. М. Малышев, Р. Р. Зайнуллин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства.— 2019.— № 56–57.— С. 106–114.
10. Григорьев А. В. Судовые комбинированные пропульсивные установки: назначение, состав, классификация / А. В. Григорьев, С. М. Малышев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.— 2019.— Т. 11.— № 5.— С. 951–958. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-951-958.
11. Будашко В. В. Разработка трехуровневой многокритериальной стратегии управления гибридной судовой энергетической установкой комбинированного пропульсивного комплекса / В. В. Будашко // ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА.— 2017.— № 2.— С. 62–72. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.2.10.
12. Григорьев А. В. Современные и перспективные судовые валогенераторные установки: монография / А. В. Григорьев, В. А. Петухов.— СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2009.— 175 с.
13. Григорьев А. В. Схемотехнические решения судовых единых электроэнергетических систем на базе вентильных генераторов и статических источников электроэнергии / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин, С. М. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.— 2020.— Т. 12.— № 4.— С. 801–811. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-801-811.
14. Baldi F. Optimal load allocation of complex ship power plants / F. Baldi, F. Ahlgren, F. Melino, C. Gabriellii, K. Andersson // Energy Conversion and Management.— 2016.— Vol. 124.— Pp. 344–356. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.07.009.
15. Ancona M. A. Efficiency improvement on a cruise ship: Load allocation optimization / M. A. Ancona, F. Baldi, M. Bianchi, L. Branchini, F. Melino, A. Peretto, J. Rosati // Energy Conversion and Management.— 2018.— Vol. 164.— Pp. 42–58. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.02.080.
16. Capasso C. Design of a Hybrid Propulsion Architecture for Midsize Boats / C. Capasso, E. Notti, O. Veneri // Energy Procedia.— 2019.— Vol. 158.— Pp. 2954–2959. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.958.

17. Geertsma R. D. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments / R. D. Geertsma, R. R. Negenborn, K. Visser, J. J. Hopman // *Applied Energy*.— 2017.— Vol. 194.— Pp. 30–54. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.060.
18. Ling-Chin J. Investigating a conventional and retrofit power plant on-board a Roll-on/Roll-off cargo ship from a sustainability perspective — A life cycle assessment case study / J. Ling-Chin, A. P. Roskilly // *Energy Conversion and Management*.— 2016.— Vol. 117.— Pp. 305–318. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.03.032.
19. Григорьев А. В. Результаты проектирования и испытаний комбинированной пропульсивной установки лоцмейстерского катера / А. В. Григорьев, С. М. Малышев, С. В. Воробьев // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*.— 2021.— Т. 13.— № 2.— С. 290–299. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-290-299.
20. Григорьев А. В. Результаты испытаний единой электроэнергетической системы и системы электродвижения пассажирского судна «Княгиня Ольга» / А. В. Григорьев, С. В. Воробьев // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*.— 2021.— Т. 13.— № 1.— С. 139–149. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-139-149.
21. Григорьев А. В. Опыт модернизации и результаты испытаний единой электроэнергетической системы и системы электродвижения дизель-электрического ледокола «Капитан Косолапов» / А. В. Григорьев, А. В. Вейнмейстер // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*.— 2020.— Т. 12.— № 6.— С. 1103–1117. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1103-1117.
22. Григорьев А. В. Основные направления развития судовых электроэнергетических систем и электродвижения / А. В. Григорьев // *Морской флот*.— 2021.— № 4 (1556).— С. 28–31.
23. Токарев Л. Н. Особенности работы гребных электродвигателей в составе судовых систем электродвижения с полупроводниковыми преобразователями / Л. Н. Токарев, Д. А. Макаров, А. В. Григорьев // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*.— 2021.— № 62–63.— С. 131–137.

REFERENCES

1. *Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships*. Part XI. SPb.: Russian Maritime Register of Shipping, 2021.
2. *Rules for Technical Supervision during Construction of Ships and Manufacture of Materials and Products for Ships*. Part IV. SPb.: Russian Maritime Register of Shipping, 2021.
3. *Guidelines on Technical Supervision of Ships under Construction*. SPb.: Russian Maritime Register of Shipping, 2019.
4. Grigoryev, Andrey V., Ruslan R. Zaynullin, and Sergei M. Malyshev. “Perspectives of using the static electric power sources on ships with electric propulsion plants.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 12.1 (2020): 202–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-202-213.
5. Grigor'ev, A. V., and E. A. Glekler. “Sudovye kombinirovannye propul'sivnye komplekсы novogo pokoleniya.” *Morskoi vestnik* 2S(11) (2013): 49–50.
6. Khvatov, O. S., and I. A. Tarpanov. “Ship propulsion hybrid installation.” *Bulletin of VSAWT* 35 (2013): 337–340.
7. Grigoryev, A. V. “Sudovye kombinirovannye propul'sivnye ustanovki.” *Morskoy flot* 2 (2013): 50–52.
8. Khvatov, O. S., O. A. Burmakina, and I. A. Tarpanov. “Mathematical model of ship hybrid propulsive installations.” *Bulletin of VSAWT* 27 (2009): 150–154.
9. Grigoryev, A. V., A. A. Popov, S. M. Malyshev, and R. R. Zaynullin. “Ship combined propulsion plants.” *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 56–57 (2019): 106–114.
10. Grigoryev, Andrey V., Sergei M. Malyshev, and Ruslan R. Zaynullin. “Ship combined propulsion plants: purpose, composition, classification.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.5 (2019): 951–958. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-951-958.
11. Budashko, V. V. “Design of the three-level multicriterial strategy of hybrid marine power plant control for a combined propulsion complex.” *ELEKTROTEKNIKA I ELEKTROMECHANIKA* 2 (2017): 62–72. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.2.10.
12. Grigoryev, A. V., and V. A. Petukhov. *Sovremennye i perspektivnye sudovye valogeneratortnye ustanovki*. SPb.: Izd-vo GMA im. adm. S. O. Makarova, 2009.

13. Grigoryev, Andrey V., Ruslan R. Zaynullin, and Sergei M. Malyshev. "Schematic solutions for ship unified electric power systems based on valve generators and static electric power sources." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 801–811. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-801-811.
14. Baldi, Francesco, Fredrik Ahlgren, Francesco Melino, Cecilia Gabrielli and Karin Andersson. "Optimal load allocation of complex ship power plants." *Energy Conversion and Management* 124 (2016): 344–356. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.07.009.
15. Ancona, Maria Alessandra, F. Baldi, M. Bianchi, L. Branchini, F. Melino, A. Peretto, and J. Rosati. "Efficiency improvement on a cruise ship: Load allocation optimization." *Energy Conversion and Management* 164 (2018): 42–58. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.02.080.
16. Capasso, Clemente, Emilio Notti, and Ottorino Veneri. "Design of a Hybrid Propulsion Architecture for Midsize Boats." *Energy Procedia* 158 (2019): 2954–2959. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.958.
17. Geertsma, R. D., R. R. Negenborn, K. Visser, and J. J. Hopman. "Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments." *Applied Energy* 194 (2017): 30–54. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.060.
18. Ling-Chin, J., and A. P. Roskilly. "Investigating a conventional and retrofit power plant on-board a Roll-on/Roll-off cargo ship from a sustainability perspective—A life cycle assessment case study." *Energy Conversion and Management* 117 (2016): 305–318. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.03.032.
19. Grigoryev, Andrey V., Sergei M. Malyshev, and Semen V. Vorobyev. "The results of design and trials of combined propulsion plant for a buoy boat" *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 290–299. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-290-299.
20. Grigoryev, Andrey V., and Semen V. Vorobyev. "A unified electric power system and electric propulsion system of the passenger ship "Knyaginya Olga" trials results." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 139–149. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-139-149.
21. Grigoryev, Andrey V., and Andrey V. Veinmeister. "Modernization experience and trials results of the unified electric power system and electric propulsion system of the "Kapitan Kosolapov" diesel-electric icebreaker." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.6 (2020): 1103–1117. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1103-1117.
22. Grigor'ev, A. V. "Osnovnye napravleniya razvitiya sudovykh elektroenergeticheskikh sistem i elektrodvizheniya." *Morskoi flot* 4(1556) (2021): 28–31.
23. Tokarev, L. N., D. A. Makarov, and A. V. Grigoryev. "Features of propulsion motors operation as a part of ship electric propulsion systems with semiconductor converters." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 62–63 (2021): 131–137.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Григорьев Андрей Владимирович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197376, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Профессора Попова, 5
e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru,
kaf_saees@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Grigoryev, Andrey V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
Saint Petersburg Electrotechnical University
5 Professora Popova Str., St. Petersburg, 197022,
Russian Federation
e-mail: a.grigorev@eds-marine.ru,
kaf_saees@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 4 октября 2021 г.
Received: October 4, 2021.