

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА СУДАХ РЫБОПРОМЫСЛОВОГО ФЛОТА

Д.Ю. Чушанков, инженер,
e-mail: chushankov@gmail.com

Л.Д. Шабалин, канд. техн. наук, доцент,
e-mail: shabalin@kltu.ru

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

В статье рассматриваются принцип построения, преимущества и недостатки судовой электроэнергетической сети постоянного тока на силовых полупроводниковых преобразователях с целью оценки применения данной системы при проектировании и строительстве новых судов рыбопромыслового флота различного типа.

судовая электроэнергетическая сеть, постоянный ток, преобразователи частоты, рыбопромысловый флот

Рыбопромысловые суда служат для добычи, переработки и транспортировки различных видов морской фауны. По назначению промысловые суда подразделяются на добывающие, добывающе-перерабатывающие, перерабатывающие и обслуживающие. Общий тоннаж мирового рыболовного флота составляет около 10 % всего мирового тоннажа судов. Характеристики и особенности промысловых судов разного назначения определяются формой организации промысла.

С середины двадцатого века на большинстве судов рыбопромыслового флота используется сеть переменного тока с напряжением 380 В и частотой 50 Гц, генерируемая несколькими дизель-генераторами и в некоторых случаях валогенераторами для питания всех потребителей электроэнергии на судне. Важно отметить, что траулеры, наиболее распространённые промысловые суда, нередко конструируются с использованием валогенераторов постоянного тока вследствие применения тралового комплекса на электроприводах постоянного тока [1]. На рис. 1 изображена типичная схема судовой электростанции среднего рыбного траулера.

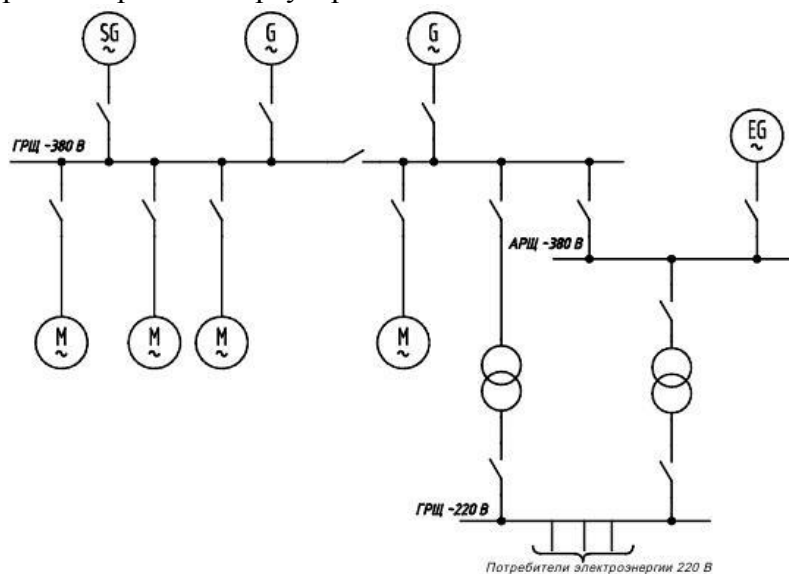


Рисунок 1 – Схема судовой электроэнергетической системы переменного тока

Сеть переменного тока хорошо зарекомендовала себя за десятилетия эксплуатации на судах рыбопромыслового флота, но имеет ряд существенных недостатков.

Во-первых, при синхронизации генераторов процесс введения на параллельную работу дизель-генераторов является относительно сложной операцией, требующей при ручной синхронизации высококвалифицированного персонала, а при автоматической синхронизации – специализированного оборудования. В случае ошибки или неисправности возможны тяжелые последствия для судна и экипажа, например, отключение электросети суда. Стоит отметить невозможность длительной работы валогенератора и судовых дизель-генераторов в связи с изменениями частоты вращения вала главного двигателя при наличии сильного волнения на море, т.е. мощный валогенератор в зависимости от положения винта судна в воде будет иметь неприемлемые для дизель-генераторов изменения частоты сети, которые приводят к аварийному отключению сети по обратной мощности.

Во-вторых, судовая сеть переменного тока всегда имеет реактивную мощность (в основном индуктивного характера), так как основные потребители электроэнергии на судне – это асинхронные электродвигатели, что приводит к потерям мощности в сети и перепадам напряжения. В свою очередь, это требует установки компенсаторов реактивной мощности или увеличения габаритной мощности генераторов, сечения кабелей, мощности силовых трансформаторов при проектировании.

В-третьих, наличие высших гармоник в напряжении судовой сети переменного тока негативно сказывается на работе как источников, так и потребителей электроэнергии. Высшие гармоники в электрических машинах приводят к дополнительным потерям, что вызывает увеличение общей температуры и местные нагревы, а также повышенную вибрацию. В кабельных линиях высшие гармоники приводят к ускорению процесса старения изоляции и дополнительным потерям в линиях. Под действием высших гармоник может быть нарушена нормальная работа систем защиты и автоматики, возникают ложные срабатывания, сбои в работе систем синхронизации и автоматического распределения нагрузок при параллельной работе генераторов и т. д.

В-четвертых, в сети переменного тока необходимы силовые трансформаторы для повышения или понижения напряжения сети для различных потребителей, которые занимают много места и влекут дополнительные потери.

Также стоит отметить, что в настоящее время имеются квоты на строительство около 110 рыбопромысловых судов различного типа по всей России (около 30 в Северо-Западном регионе в основном средние траулеры и ярусоловы) согласно поручению Президента РФ по итогам Госсовета 19.10.2015: «Разработать и утвердить сводный план размещения заказов на строительство судов рыбопромыслового флота на российских верфях». Это открывает возможности для проектирования судов с использованием современных, более эффективных технологий.

С учетом вышеперечисленного представляет интерес новая архитектура судовой электроэнергетической сети на постоянном токе (рис. 2). Этот вариант судовой электроэнергетической системы строится с использованием мощных полупроводниковых преобразователей (IGBT, IGCT, MOSFET и т.д.), т.е. выпрямителей на стороне генераторов и инверторов для всех судовых потребителей, в то время как передача электроэнергии по судну осуществляется на постоянном токе.

В данной статье оценивается перспективность использования судовой электроэнергетической сети постоянного тока для судов рыбопромыслового флота. Такая система уже находит широкое применение для судов оффшорного и военного флотов, особенно для судов с наличием мощных потребителей с повторно-кратковременным режимом работы (например, электродвижение – *azipod* или оружейные системы). В нашем случае интересно применение сети постоянного тока, исходя из работы промышленного оборудования, для которого обычно используют электроприводы переменного тока с различными способами регулирования частоты вращения [2].

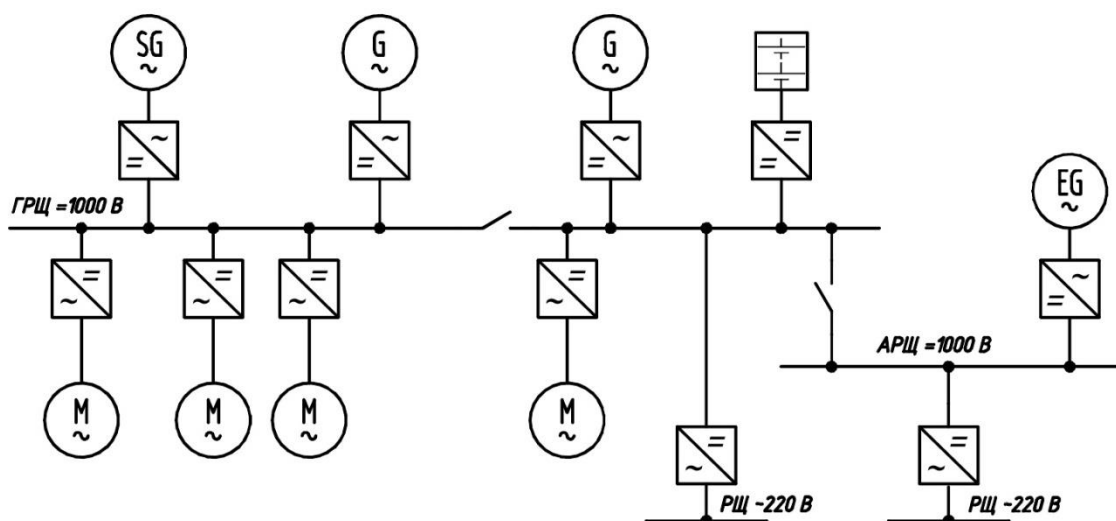


Рисунок 2 – Схема судовой электроэнергетической системы постоянного тока

На рис. 2 изображена схема судовой электростанции среднего рыболовного траулера с применением сети постоянного тока на полупроводниковых преобразователях. На схеме видно, что электроэнергия от синхронных генераторов поступает на шину (ГРЩ) постоянного тока через электронные преобразователи, которые конвертируют переменный ток в постоянный и регулируют напряжение сети. Потребители получают электроэнергию через инвертор, преобразуя постоянный ток в переменный с необходимыми параметрами. В настоящее время в основе электронных преобразователей используют технологию биполярных или полевых транзисторов с изолированным затвором (IGBT, IGCT или MOSFET – транзисторы соответственно), которые способны работать на высоких значениях выходной мощности до 30 МВт.

В судовой электроэнергетической системе переменного тока выпрямители и инверторы используются для изменения скорости вращения электродвигателей в широких пределах и применяются как единые локальные устройства для преобразования частоты тока со вставкой постоянного тока между ними и мощным конденсатором. В сети постоянного тока для изменения скорости вращения привода необходим только инвертер, а выпрямители и конденсаторы устанавливаются после синхронных генераторов. Это приводит к экономии занимаемого места оборудованием и отсутствию нежелательного влияния элементов сети друг от друга (скачки тока, провалы напряжения и т.д.).

Для инверторов на стороне сети переменного тока, если потребитель требует высокое качество параметров сети (например, системы автоматизации, освещения и т.д.), применяются пассивные LC- или LCL-фильтры [2]. А в случае сети постоянного тока потребители электроэнергии на судне могут обходиться без улучшения качества напряжения, что значительно снижает затраты.

Сеть постоянного тока на рис. 2 имеет автоматические выключатели, установленные между секциями сети, которые включены при нормальной работе системы. В случае короткого замыкания в одной части цепи автоматический выключатель отключится и изолирует остальную систему от поврежденного участка, при этом электронные преобразователи служат еще и изолятором для генераторов и потребителей от скачков тока и напряжения как на стороне постоянного, так и переменного тока. Судовая сеть постоянного тока не нуждается в силовых трансформаторах, так как инверторы на выходе могут преобразовывать напряжение и частоту в любые требуемые значения.

Рассмотрим преимущества и недостатки судовой электроэнергетической системы постоянного тока. Одним из главных преимуществ этих систем является низкое потребление топлива судовыми дизель-генераторами. Судовая электроэнергетическая система постоянного тока позволяет каждому дизель-генератору работать на различных скоростях для достижения наилучшего расхода топлива при различных режимах нагрузки на сеть из-за

отсутствия ограничений по синхронной работе генераторов. По экспериментальным данным фирмы АВВ (рис. 3) экономия топлива должна достигать 20% [2].

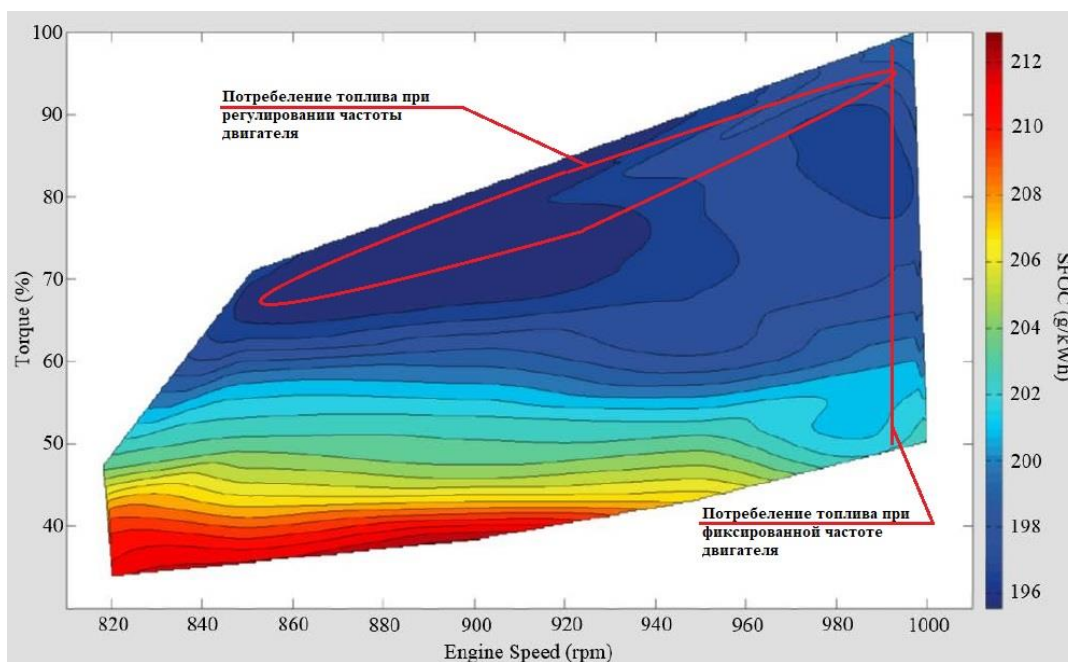


Рисунок 3 – График зависимости скорости вращения вала двигателя от нагрузки на валу

На рис. 3 изображены экспериментальные результаты потребления топлива (SFOC – specific fuel oil consumption) исходя из всего допустимого диапазона работы типичного судового дизель-генератора. Из графика видно, что потребление топлива – это нелинейная зависимость скорости вращения вала двигателя от нагрузки на валу и для каждого значения нагрузки имеется эффективная зона работы. Для сети постоянного тока система управления поддерживает дизель-генераторы в оптимальном соотношении оборотов двигателя и нагрузки на валу посредством прямого воздействия на регулятор подачи топлива (governor) дизеля. Более того, такая система способна отключать ненагруженные двигатели генераторов и даже отключать все двигатели и переходить на работу от батарей при уменьшении нагрузки на сеть.

Наибольший потенциал в экономии топлива, потребляемого дизель-генераторами, может быть достигнут путем использования в сети постоянного тока батарей с большой емкостью. Обычно их устанавливают в отдельном помещении, и они имеют достаточную емкость для питания всей сети или отдельных ее элементов при низких или пиковых нагрузках [3]. Для судов рыбопромыслового флота такая схема может быть использована при промысловом режиме работы. В этом случае энергия накапливается в батареях на подходе к месту лова и далее используется для питания электроприводов промысловых механизмов и других потребителей. Также батареи могут обеспечивать резервное питание судна при маневровом и аварийном режимах и в то же время являться буфером для судовой электростанции при резких скачках нагрузки.

Преимуществом судовой электроэнергетической системы постоянного тока является также уменьшение веса и размеров занимаемого электрооборудованием и кабельными трассами до 30% по сравнению с современной системой переменного тока [2]. Основное уменьшение веса идет за счет замены силовых трансформаторов на компактные инверторы, т.е. появляется возможность полностью исключить их из схемы судовой сети. Дополнительная экономия в этом случае осуществляется за счет меньшего количества кабелей в кабельных трассах, меньшего количества коммутационного оборудования и более удобного расположения оборудования на судне [3]. Освобожденное пространство можно использовать для увеличения размера трюмов при проектировании, в результате получаем больше места для улова.

Важным преимуществом является принцип работы системы постоянного тока, который позволяет исключить влияние на судовую электростанцию реактивной мощности, так как значение коэффициента мощности благодаря силовым полупроводниковым преобразователям достигает 0,98 [3]. В этом случае устраняются высшие гармоники, наводимые нелинейными потребителями, а также скачкообразные перепады напряжения сети как от мощных судовых потребителей (например, ваерные лебедки), так и валогенераторов, работающих на параллельной схеме с дизель-генераторами.

Таким образом, электроэнергетическая система постоянного тока дает возможность значительно расширить параллельную работу валогенератора с дизель-генераторами при любых режимах работы рыбопромыслового судна. Выпрямитель, установленный после валогенератора, позволит избежать влияния колебаний частоты на выходе с валогенератора из-за непостоянства нагрузки, прикладываемой на винт при волнении, путем быстрой отработки полупроводниковых преобразователей на изменение частоты на стороне переменного тока.

К недостатку судовой электроэнергетической системы постоянного тока следует отнести большие значения токов короткого замыкания по сравнению с сетью переменного тока [2].

Для сети постоянного тока могут быть предусмотрены специальные автоматические выключатели (Solid State Circuit Breakers – SSCB), основанные на работе силовых транзисторов (рис. 4), аналогично применяемым в силовых полупроводниковых преобразователях [4]. В этих автоматических выключателях используется только один или два IGBT или IGCT транзистора в сочетании с системой микропроцессорного управления, которые обеспечивают быстрое (около 40 миллисекунд) размыкание поврежденного участка цепи при коротком замыкании.

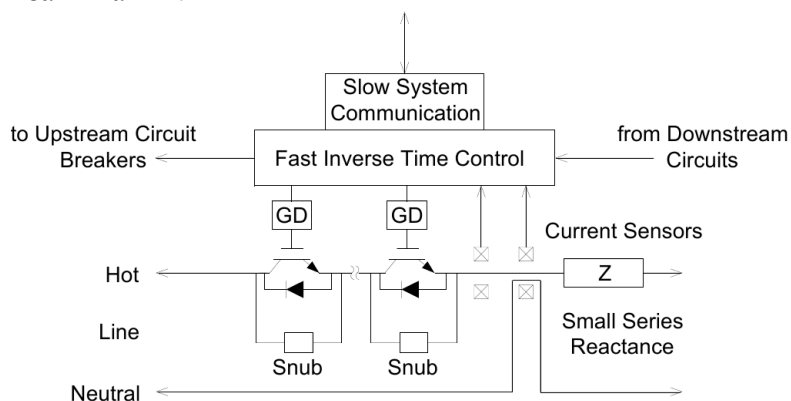


Рисунок 4 – Схема автоматического выключателя постоянного тока на силовых транзисторах (Solid State Circuit Breaker)

На данный момент предлагаются два варианта построения защиты от короткого замыкания сети постоянного тока [5]. Первый вариант получил название «Breaker-based», он создан на использовании SSCB для каждой секции сети постоянного тока и обеспечивает высокую надежность системы при увеличении ее стоимости. Второй вариант называется «Breaker-less» и основан на возможности выпрямителей и инверторов выступать в виде изолирующих (коммутирующих) устройств в случае короткого замыкания вместе с использованием специальных плавких предохранителей для сети постоянного тока на входе и выходе инверторов. Такой вариант является более экономичным, но менее защищенным от аварийных ситуаций на судне. Фирмы, разработавшие эту систему, предлагают комбинацию различных вариантов, т.е. ГРЩ разделяется на две-три секции с помощью SSCB, а защиту генераторов и потребителей осуществляют непосредственно преобразователи напряжения совместно с плавкими предохранителями.

Судовая электроэнергетическая система постоянного тока имеет более сложную архитектуру управления и автоматизации по сравнению с системами переменного тока. Если в судовой электростанции переменного тока система управления мощностью (Power

Management System) контролирует распределение нагрузки между генераторами совместно с автоматическим регулятором напряжения и обеспечивает их автоматическое отключение и включение в параллель в зависимости от нагрузки, то система управления мощностью сети постоянного тока, помимо регулирования напряжения сети при динамическом изменении нагрузки, должна в реальном времени осуществлять оптимизацию потребления топлива и координировать работу полупроводниковых преобразователей с автоматическими выключателями постоянного тока SSCB. Поэтому для достижения высокой эффективности сети постоянного тока используют иерархическую пятиуровневую структуру компьютерного управления (рис. 5) [5].

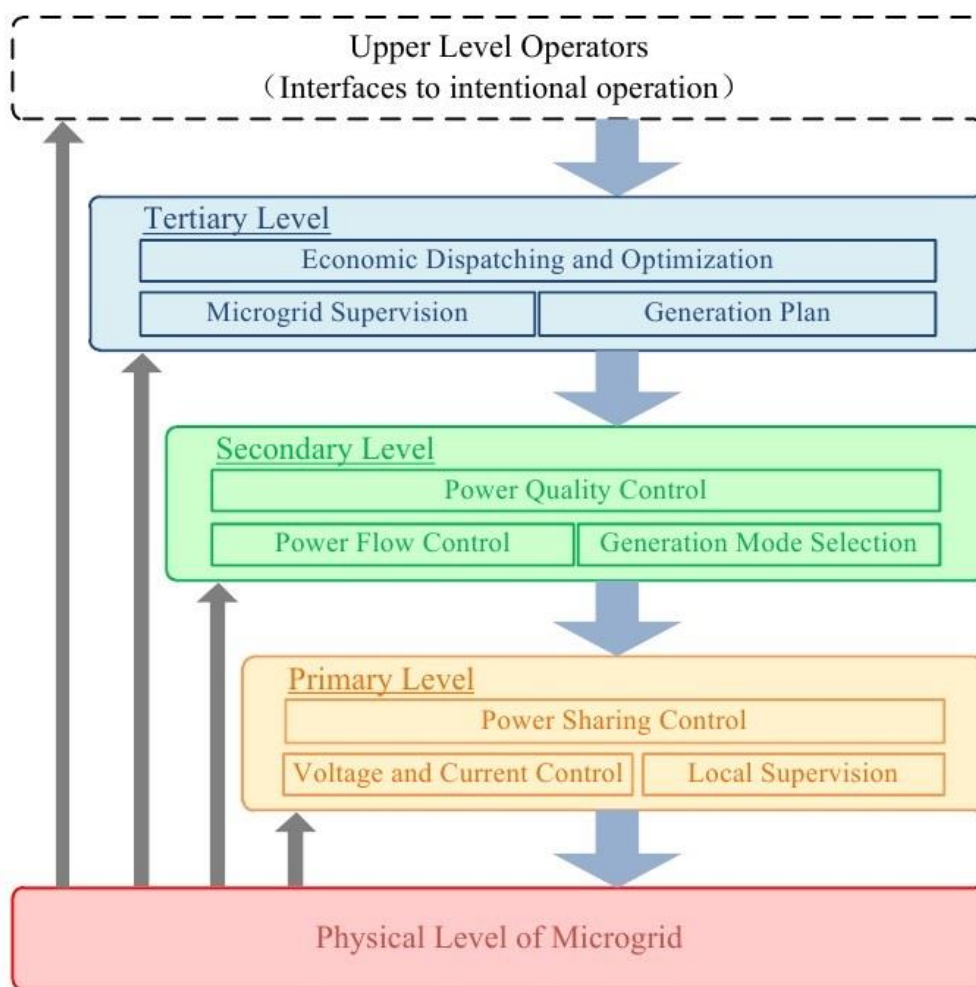


Рисунок 5 – Иерархическая пятиуровневая структура управления сетью постоянного тока

Нулевой уровень (physical level) отвечает за регулирование напряжения тока на каждом из полупроводниковых преобразователей. Первый уровень (primary level) отвечает за имитацию (моделирование) физического поведения системы для ее стабилизации. Второй уровень (secondary level) обеспечивает поддержание всех переменных системы в заданных диапазонах. Третий уровень (tertiary level) отвечает за распределение мощности и обеспечивает экономию электроэнергии и топлива. Верхним уровнем (upper level) является интерфейс для взаимодействия с обслуживающим персоналом. Все уровни иерархической структуры взаимодействуют между собой для достижения эффективной работы сети постоянного тока в реальном времени.

В результате проведенного анализа существующей информации по установкам с сетью постоянного тока можно сделать вывод, что электроэнергетическая система постоянного тока, с учетом значительной (до 20%) экономии топлива и большей

вместимости груза (до 30%), является перспективным вариантом постройки судовой электроэнергетической системы на постоянном токе для новых судов рыбопромыслового флота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранников, В.К. Эксплуатация электрооборудования рыбопромысловых судов: учеб. пособие / В.К. Баранников. – Москва: Моркнига, 2013. – 496 с.
2. DC distribution system on offshore supply vessels // Электрон. дан. – Режим доступа URL: <https://ru.scribd.com/document/142939358/Dc-Distribution-System> – (Дата обращения 14.09.2017)
3. Prenc R., Cuculic A. Baumgartner I. Advantages of using a DC power system // Pomorski zbornik. – 2016. – Т. 52. – p. 83-97.
4. Kempkes M., Roth I., Gaudreau M. Solid-State Circuit Breakers for medium voltage DC power // IEEE Electric Ship Technologies Symposium. – 2011. – p. 254-257.
5. Next-Generation Shipboard DC Power System / Z. Jin, G. Sulligoi, R. Cuzner, L. Meng // IEEE Electrification Magazine. – 2016. – Т.4. – № 2. – p. 45-57.

PERSPECTIVE OF USE THE DC GRID ON SHIPS OF THE FISHERY FLEET

D.U. Chushankov, engineer, chushankov@gmail.com
L.D. Shabalin, PhD in Engineering, Associate Professor, shabalin@klgtu.ru
Kaliningrad State Technical University

The article deals with analysis of operational principle, advantages and disadvantages of maritime power system DC grid based on power electronics converters and assessment of usage DC power system for designing and building new vessels of fishery fleet of different type.

ship power system, electrical drive, power converter, direct current, fishing fleet