



КОЛЕБАНИЯ МОЩНОСТИ В ЕДИНЫХ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ГРЕБНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

Савенко А.Е., Савенко П.С.

Керченский государственный морской технологический университет,
г. Керчь, Республика Крым, Россия
Savenko-70@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть применение гребных электрических установок в составе судовых электротехнических комплексов с единой электроэнергетической системой. Выделить винторулевые колонки как особый вид электродвижения морских судов в северных широтах. Исследовать единые электроэнергетические системы с гребной электрической установкой на предмет существования в них колебаний мощности. Предложить методы и средства для устранения колебаний мощности в таких системах. *МЕТОДЫ.* Для проведения исследований рассмотрена единая электроэнергетическая система с электрическими винторулевыми колонками единственного в мире асимметричного ледокола «Балтика». Детально проанализированы все основные элементы такой системы. Проведены экспериментальные исследования, направленные на изучение режимов работы единой электроэнергетической системы. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Получены экспериментальные осциллограммы токов параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов в различных режимах. Отмечено существование обменных и синфазных колебаний мощности при работе единой электроэнергетической системы ледокола «Балтика». Приведены данные об отрицательном влиянии колебаний мощности на работу электротехнического комплекса ледокола. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Использование морских судов ледового класса является крайне важной задачей для Российской Федерации. Установка блоков, устраняющих обменные и синфазные колебания мощности, позволит повысить надежность и эффективность использования морских судов с электрическими винторулевыми колонками при обслуживании добычи углеводородов на арктическом шельфе.

Ключевые слова: обменные колебания мощности; параллельная работа; судовой электротехнический комплекс; генераторный агрегат; гребная электрическая установка; азимутальная винторулевая колонка.

Для цитирования: Савенко А.Е., Савенко П.С. Колебания мощности в единых судовых электроэнергетических системах с гребными электрическими установками // ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 5. С. 172-183. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-172-183.

POWER OSCILLATIONS IN SHIPBOARD POWER SYSTEMS WITH PROPULSION POWER PLANTS

AE. Savenko, PS. Savenko

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russia
Savenko-70@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consider the use of propeller electric installations as part of ship electrical complexes with a single electric power system. Highlight the rudder drives as a special type of electric propulsion of ships in northern latitudes. Investigate unified electric power systems with a propeller electric installation for the existence of power exchange oscillations in them. Propose methods and means for eliminating power oscillations in such systems. *METHODS.* To carry out the research, a single electric power system with electric rudder propellers of the world's only asymmetric icebreaker Baltika was considered. All the main elements of such system have been analyzed in detail. Experimental studies were carried out aimed at studying the operating modes of a unified electric power system. *RESULTS.* Experimental oscillograms of currents of parallel operating diesel-generator sets in different modes have been obtained. The existence of exchange and in-phase power oscillations during

the operation of the unified electric power system of the icebreaker "Baltika" is noted. The data on the negative influence of power oscillations on the operation of the electrical complex of the icebreaker are presented. **CONCLUSION.** The use of ice-class sea vessels is an extremely important task for the Russian Federation. The installation of blocks that eliminate exchange and in-phase power oscillations will improve the reliability and efficiency of the use of marine vessels with electric rudder propellers when servicing hydrocarbon production on the Arctic shelf.

Keywords: power exchange oscillations; parallel operation; ship electric power system; generating set; marine propulsion system; azimuth rudder.

For citation: Savenko AE, Savenkov PS. Research of current distribution by phases in asynchronous electric motor with a combined winding. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(5): 172-183. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-172-183.

Введение

Гребные электрические установки применяются на транспортных, пассажирских, рыболовных, спасательных, ледокольных и других судах различного водоизмещения. Такое широкое применения электродвижения на морском флоте обусловлено преимуществами судов с гребными электрическими установками – хорошие маневренные качества; возможность работы в тяжелых условиях плавания, обеспечиваемая большой перегрузочной способностью электрических машин; экономия внутреннего объема судна; высокая живучесть; возможность работы с неполным числом первичных агрегатов; возможность использования главных генераторов для питания других потребителей [1-5].

Гребные электрические установки имеют в своем составе первичный двигатель (дизель или турбину), который приводит в действие генераторные агрегаты, питающие электрической энергией гребные двигатели. Гребные двигатели механически соединены с гребными винтами, которые сообщают движение судну. Таким образом, применение электрических двигателей для обеспечения движения судна требует выработки большого количества электрической энергии судовой электростанцией. В настоящее время на большинстве судов для этого используются дизель-электрические агрегаты переменного тока в режиме параллельной работы [6, 7]. При этом предпочтительным является использование единой судовой электроэнергетической системы (ЕСЭЭС), когда все судовые потребители, включая гребные электродвигатели, получают питание от одних и тех же шин главного распределительного щита. Изменение скорости и направления движения судна достигается за счет применения винтов регулируемого шага и преобразования параметров электроэнергии для питания гребных электродвигателей [8-10]. В случае использования гребных электродвигателей переменного тока применяются преобразователи частоты, а при использовании двигателей постоянного тока устанавливаются управляемые выпрямители напряжения. Нужно отметить, что после появления мощных цифровых преобразователей частоты, на вновь строящихся судах, в основном, для электродвижения устанавливаются двигатели переменного тока. При этом, наиболее передовым, является применение электродвижения с использованием винторулевых колонок *Azipod (Azimuthing Podded Drive)*.



Рис.1. Асимметричный ледокол «Балтика»

Fig.1. Asymmetric icebreaker «Baltika»

Примером современного судна с единой электроэнергетической системой и винторулевыми колонками с электродвижением является единственный в мире асимметричный ледокол «Балтика» проекта Р-70202 (рисунок 1). Многофункциональное спасательное судно было построено в 2014 году на финской верфи *Arctech Helsinki Shipyard* совместно с калининградским заводом "Янтарь" по проекту финского бюро *Aker Arctic*. Треугольное судно способно прорубать канал во льду толщиной 1 м, двигаясь любой своей стороной, шириной вдвое больше обычного. Ледокол «Балтика» имеет следующие габариты: длина - 72,6 м, ширина – 20,5 м, высота борта – 9,0 м, осадка – 7,0 м, водоизмещение - 5,7 тыс. тонн, максимальная скорость хода – 15,4 узла. Экипаж судна составляет 42 человека. В состав единой электроэнергетической установки "Балтики" в качестве источников электроэнергии входят три главных дизель-генератора *Warstila 9L26* мощностью 3060 кВт каждый. Движение судна в любом направлении обеспечивают три винторулевые колонки *Azipod SP60* производства компании *Steerprop* мощностью по 2500 кВт каждая (две в кормовой и одна в носовой части ледокола).

Материалы и методы

На борту ледокола «Балтика» установлены три главных генератора *DG 1, DG 2, DG 3* с приводом от дизельного двигателя, которые питают сеть 690 В переменного тока (рис. 2). К сети можно подключить любое количество генераторов. Главный распределительный щит 690 В переменного тока *PS 1* разделен на две секции. Эти секции связаны вместе с помощью автоматического выключателя 06, который замыкается при нормальной работе. По соображениям избирательности сети и безопасности рекомендуется иметь как минимум два генератора в работе во время плавания.

Основные генераторы *DG 1, DG 2, DG 3* должны соответствовать следующим требованиям:

- максимальная полная мощность 3 300 кВА при коэффициенте мощности 0,90;
- $0,16 \text{ о.е.} \leq \text{субпереходное реактивное сопротивление } X_d''(S) \leq 0,17 \text{ о.е.}$
- иметь возможность работать в 6-пульсной сети, где $\text{THDu} \geq 10\%$

Из-за высоких токов короткого замыкания в системе необходимо согласовать конструкцию кабелей 690 В. Ледокол имеет три валопровода с электроприводом. Каждый электропривод состоит из асинхронного пропульсивного двигателя *PM1, PM 2, PM 3* мощностью 2 500 кВт, преобразователя частоты маршевого типа *FC 1, FC 2, FC 3*, системы управления движением *PCS*.

Фильтры гармоник *HF 1, HF 2* (рис. 2) используются для ограничения общих гармонических искажений, вызываемых силовыми приводами. Всего имеется два пассивных фильтра, и они должны быть подключены к распределительной сети 400 В переменного тока. Фильтры рассчитаны на ограничение искажения напряжения в распределительной сети до максимум 10%. Все оборудование, подключенное к главному распределительному щиту 690 В переменного тока, должно выдерживать преобладающие гармоники в главном распределительном щите.

Главные генераторы *DG 1, DG 2, DG 3* (табл. 1) предназначены для морской эксплуатации и приводятся в действие дизельным двигателем. Поддерживается непрерывная параллельная работа нескольких генераторов. Рама статора представляет собой жесткую сварную стальную конструкцию. Сердечник статора изготовлен из тонких листов электротехнической листовой стали, изолированных с обеих сторон термостойкими неорганическими смолами. Радиальные каналы охлаждения в сердечнике статора обеспечивают равномерное и эффективное охлаждение статора. Ротор состоит из вала и звездообразной многослойной полюсной конструкции, возбудителя и вентилятора. Вал выточен из стальной поковки или круглого стального прутка. Опорная конструкция изготовлена из листовой стали и устанавливается на вал с горячей термоусадкой. Пластины полюсов прижимаются друг к другу стальными стержнями, приваренными к торцевым пластинам. Ротор возбудителя и вентилятор устанавливаются на термоусадочную пленку. Все обмотки полностью пропитаны в вакууме высококачественной полиэфир-имидной смолой. Обмотки снабжены очень прочным креплением, которое выдерживает все ожидаемые механические и электрические удары и вибрации, а также химические вещества. Согласно *IM1101* машина имеет 2 подшипника.

Каждый генератор имеет бесщеточное возбуждение и снабжен следующими принадлежностями: шесть датчиков *pt100* для обмотки статора, два датчика *pt100* для холодного охлаждающего воздуха, два датчика *pt100* для теплого охлаждающего

воздуха, два датчика pt100 для подшипников скольжения, система автоматического регулятора напряжения (APH) Basler DECS100 (отдельный настенный шкаф), устройство водяного охлаждения, два детектора утечки для водоохладителя, нагреватель против конденсации, трансформаторы тока для управления и защиты.

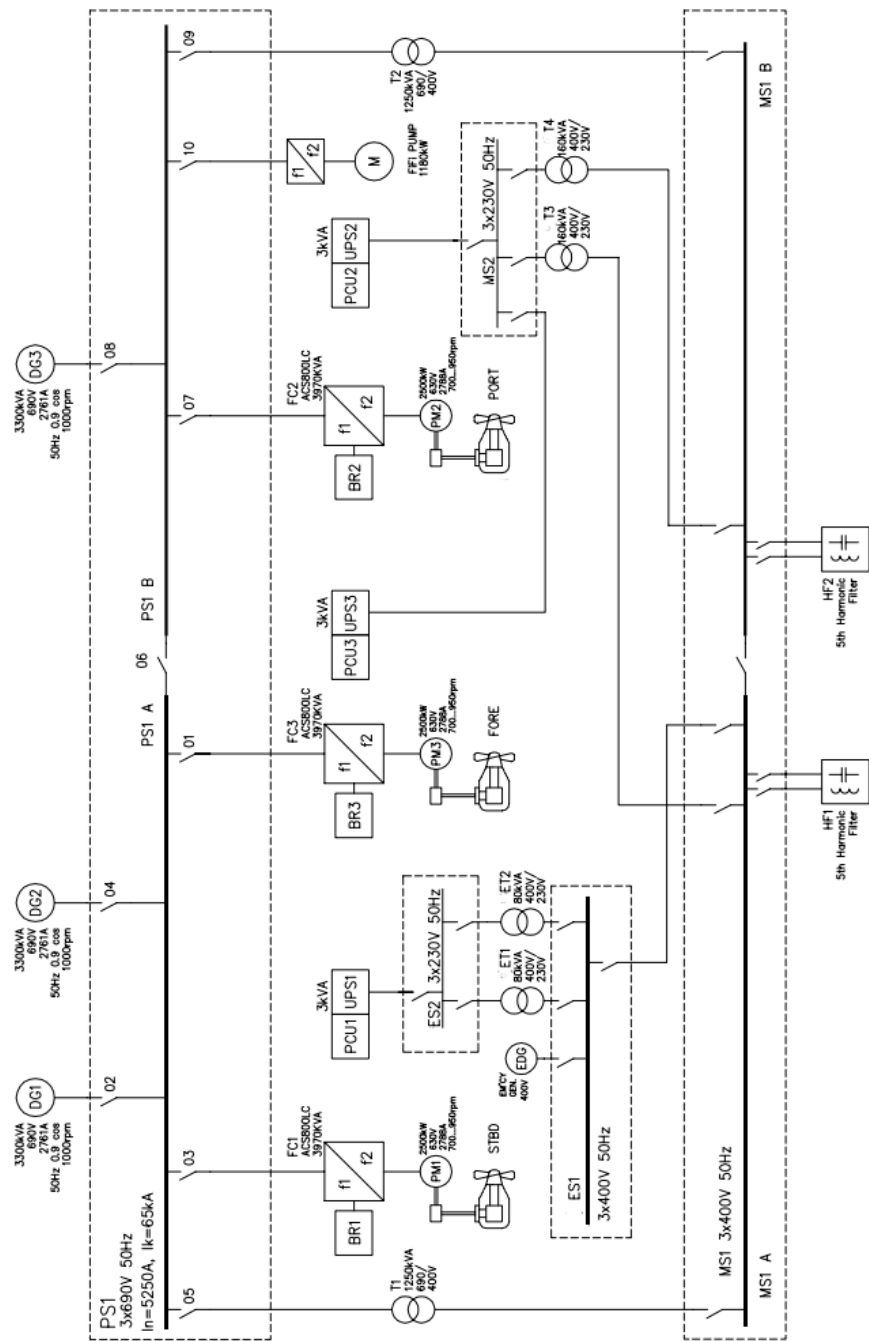


Рис.2. Однолинейная схема единой электросистемы ледокола «Балтика» Fig.2. One-line diagram of the unified electric power system of the icebreaker "Baltika"

Таблица 1

Данные главных генераторов	
Тип	AMG 0630MP06 LSA
Количество	3 ед
Направление вращения	Однонаправленный
Номинальная выходная мощность / режим работы	3300 kVA / S1

Продолжение таблицы 1

Коэффициент мощности	0,9
Мощность	2970 кВт
Частота	50 Гц
Напряжение	690 В переменного тока
Ток	2761 А
Скорость	1000 об/мин
КПД (синусоидальный, нагрузка 100%)	97,15% при коэффициенте мощности 0,90
Субпереходное реактивное сопротивление x''_d (сб.)	16,4 %
Метод охлаждения	IC8A1W7
Подача охлаждающей воды на теплообменник.	16 м ³ / час из LT-воды
Повышение температуры охлаждающей жидкости	5 К
Рассеивание тепла в воздухе	5кВт
Рассеивание тепла в охлаждающей жидкости	83 кВт
Количество подшипников	2
Тип подшипников	Стандартные подшипники скольжения; <i>NDE</i> , самосмазка <i>VG46</i> . <i>DE</i> , заливная смазка с собственным насосным агрегатом.
Класс изоляции	<i>H</i>
Повышение температуры статора / ротора	<i>F</i>
монтаж (согласно IEC 60034-7)	<i>IM1101</i>
Корпус (согласно IEC 60034-5)	<i>IP44</i>
Тестирование на одобрение класса	
- стандартное тестирование	Все машины в соответствии с <i>IEC 60034</i> и заводские стандартный протокол испытаний
- типовые испытания	На одну машину по заводскому стандарту протокол испытаний
Длина	3 156 мм
Ширина	1760 мм (без маслоохладителя)
Высота	2 450 мм
Вес	11 400 кг

Отдельный настенный шкаф АРН предусматривает автоматический контроль напряжения на клеммах. Статическая точность напряжения генератора не менее $\pm 1,5\%$ при всех симметричных нагрузках от холостого хода до номинальной. Уровень напряжения может быть установлен плавно в пределах $\pm 10\%$ от номинального значения. Напряжение постоянно между 95-105% скорости. При скорости ниже 95% напряжение пропорционально частоте. Время восстановления напряжения 0,5 с $\pm 3\%$, $\pm 1,5\%$ 1 с при резком увеличении номинальной нагрузки. У каждого генератора есть собственная ячейка контроллера.

Преобразователи частоты силовой установки ACS800 с жидкостным охлаждением *FC 1*, *FC 2*, *FC 3* (табл. 2) отличается прочной конструкцией для приводов с высокой мощностью.

Таблица 2

Данные преобразователей частоты

Тип	Инвертор источника напряжения с водяным охлаждением, с постоянным током промежуточного контура ACS800-07LC-3970-7
Количество	3
Число импульсов выпрямителя питания	6
Номинальная мощность	3970 kVA
Напряжение питания	690 В переменного тока
Выходное напряжение	630 В переменного тока
Номинальный ток	3324 А

Коэффициент мощности	0,95
КПД при номинальной мощности	> 98 %
Резервирование контроллера привода	Один на конвертер
Резервирование контроллера силовой установки	Один на вал
Метод управления двигателем	Прямое управление крутящим моментом
Двигатель	Асинхронный двигатель, 2500 кВт
Мощность торможения, максимальная	300 кВт в цикле 10 с / 60 с
Тормозная способность	5 400 кДж
Метод охлаждения привода	Закрытое внутреннее водяное охлаждение, водяной теплообменник
Расход охлаждающей воды	131 л / мин
Тепловые потери в воду	66 кВт
Тепловые потери в воздух	6 кВт
Вложение	IP42

Компактный размер с полностью закрытым шкафом оптимизирован для суровых условий окружающей среды. Жидкостное охлаждение снижает потребность в установке мощного воздушного охлаждения с фильтром и делает преобразователь компактным и бесшумным. Тормозные резисторы не рассчитаны на полную аварийную остановку. Они рассчитаны только для изменения направления вращения маршевого двигателя с малых скоростей.

Фильтры гармоник HF 1, HF 2 (таблица 3) используются для уменьшения гармонических искажений в электрической сети судна. Основными компонентами фильтра гармоник являются конденсаторные блоки, реактор, контактор и тепловое реле. Один фильтр гармоник содержит две ветви фильтра, которые подключаются к сети в соответствии с необходимостью.

Система управления движением (PCS) действует как главный контроллер между входами/выходами процесса, человеком-оператором и системой привода, управляет полупроводниками преобразователя частоты.

Его основная задача - преобразовать команду рычага оператора в подходящее задание крутящего момента, чтобы преобразованный в фактический крутящий момент в преобразователе частоты сигнал мог дать двигателю тягу, пропорциональную команде рычага.

Таблица 3

Данные фильтров гармоник

Тип	Фильтр 5-й гармоники, 2 ветви
Количество	2
Количество необходимых расходных материалов на фильтр	2 x 630 A
Номинальное напряжение	400 В
Частота	50 Гц
Частота настройки	245 Гц
Номинальная реактивная мощность	175 кВАр
Исполнение	IP23

Вторая важная задача системы управления двигательной установкой - защита компонентов системы от ненормальных происшествий, когда это возможно. Система постоянно контролирует соответствующие параметры установки, такие как температура компонентов, и ограничивает изменения мощности или даже снижает фактические мощности, когда считается, что это помогает защитить систему и обеспечить стабильность.

Третья задача системы управления двигательной установкой - информировать оператора о состоянии установки. Важные фактические значения, а также аварийные сигналы силовой установки отображаются на экранах оператора.

Система управления движением содержит три основных блока управления, по одному на каждый валопровод. Они функционально отделены друг от друга, чтобы обеспечить работу хотя бы одного валопровода при неисправности в одной части системы.

На рисунке 3 приведена схема, представляющая интерфейс человек-машина для

управления двигательной установкой, который работает в отдельной сети *Ethernet MMS*.

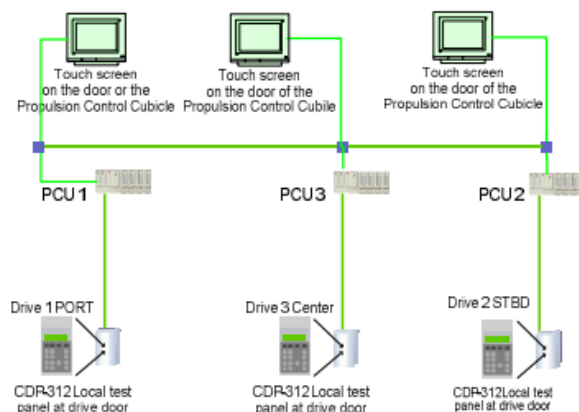


Рис.3. Схема системы управления движением Fig.3. Diagram of the motion control system (PCS) (PCS)

Пропульсивные двигатели *PM 1*, *PM 2*, *PM 3* (табл. 4) представляют собой трехфазные асинхронные двигатели с сепаратором, рассчитанные на экстремальные механические нагрузки. Они созданы для тяжелых условий эксплуатации и бесперебойной работы.

Таблица 4

Данные пропульсивных двигателей

Тип	AMI 560L6L
Количество	3
Направление вращения	Двунаправленное
Количество статорных систем	1
Номинальная мощность / режим работы	2500 кВт / S1 (длительно)
Диапазон скоростей полной мощности	700 950 об / мин
Номинальное напряжение	630 В
Частота	35,3 Гц
Номинальный ток	2749 А при 700 об / мин
Номинальный крутящий момент	34,114 кНм при 700 об / мин,
Повышенный крутящий момент, цикл	На 30% выше тягового усилия болларда, 20 секунд / 5 мин с охлаждающей водой 22 градуса
Коэффициент мощности при 100% нагрузке	0,86
КПД при полной синусоидальной нагрузке	96,4 %

Трансформаторы Т 1, Т 2 (таблица 5) изготовлены и испытаны в соответствии с ИЕС 60076-11 и применимыми правилами классификационного общества.

Таблица 5

Данные силовых трансформаторов

Тип	Сухой тип
Количество	2
Номинальная мощность	1250 кВА
Номинальное первичное напряжение	690 В при нагрузке
Номинальное вторичное напряжение	400 В при нагрузке
Частота	50 Гц
Сопротивление короткого замыкания от первичной обмотки к вторичному	Прибл. 6%
Потери холостого хода при 75 ° C	2,5 кВт
Потери нагрузки при 75 ° C	15 кВт
Исполнение	IP23

Результаты

Наиболее часто на ледоколе «Балтика» используется режим, когда параллельно работают два главных генератора и три электрические винторулевые колонки Azipod

(рис. 4). Остальные судовые потребители значительно уступают по мощности гребным электродвигателям и они также включены в работу. Экспериментальные исследования, проведенные в таких режимах работы, выявили существование обменных (рис. 5) и синфазных (рис. 6) колебаний мощности [11]. Такие колебания отрицательно сказываются на работе всего электротехнического комплекса ледокола, так как ограничивают мощность используемых электроприводов, вызывают пульсации напряжений и токов, приводят к некорректной работе систем автоматики и повышенному износу регуляторов частоты вращения главных двигателей, а также могут являться причиной выпадения генератора из синхронизма в результате чего ледокол обесточится. В качестве защитной превентивной меры устройство главного распределительного щита позволяет рассоединить секции так, чтобы при работе двух генераторов, они раздельно износу регуляторов частоты вращения главных двигателей, а также могут явиться причиной выпадения генератора из синхронизма в результате чего ледокол обесточится. В качестве защитной превентивной меры устройство главного распределительного щита позволяет рассоединить секции так, чтобы при работе двух генераторов, они раздельно питали по одной (две) винторулевой колонке, то есть в этом случае исключается параллельная работа дизель-генераторных агрегатов. Однако, такой режим работы может рассматриваться как экстренный в сложных условиях, так как серьезно ограничивается использование по мощности пропульсивной установки ледокола, существенно снижается маневренность, увеличивается расход топлива. Преобразователи частоты позволяют осуществлять реверс гребных двигателей без разворота винторулевых колонок на 180 градусов, что является колоссальным преимуществом ледокола. Однако, такая уникальная возможность изменения направления движения требует отсутствия всяких колебаний мощности в судовой сети. Вышедшее из строя плечо инвертора позволяло использовать винторулевую колонку, но ее мощность снижалась почти на 20 процентов. Выход из строя двух и более плеч инверторов сделает использование винторулевой колонки еще менее эффективным или невозможным. Одной из причин выхода из строя элементов преобразователей частоты, которые управляют гребными двигателями винторулевых колонок, может являться существование обменных и синфазных колебаний мощности в электроэнергетической системе ледокола.

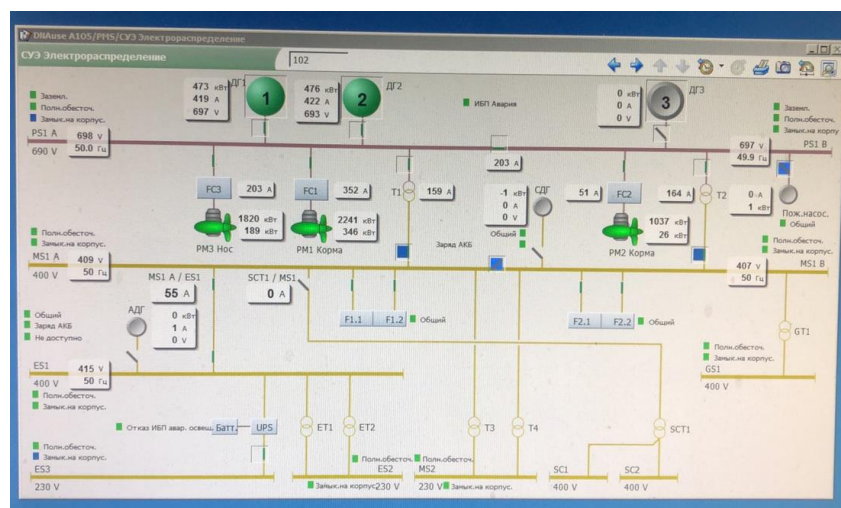


Рис. 4. Экран мониторинга работы ЕСЭЭС

Fig. 4. The ECES operation monitoring screen

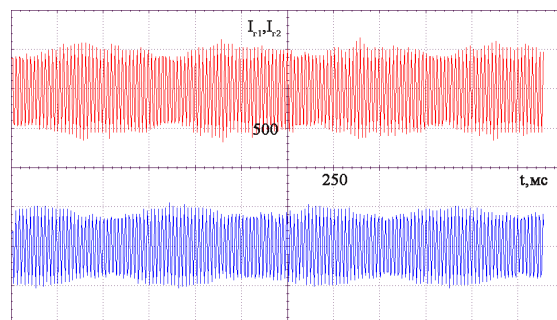


Рис. 5. Токи параллельно работающих генераторов в квазиустановившемся режиме

Fig. 5. Currents of parallel generators in quasi-steady-state mode

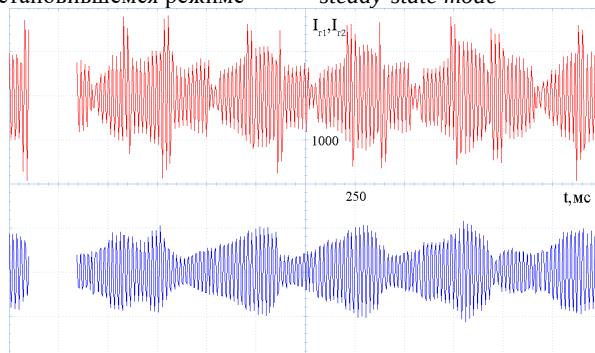


Рис. 6. Токи параллельно работающих генераторов при работающих гребных двигателях

Fig. 6. Currents of parallel generators with rowing engines running

Проведенный тест на внезапное короткое замыкание также подтвердил существование колебаний мощности. Форма кривых тока главного статора при испытании на внезапное короткое замыкание показана на рисунке 7. При внезапном стабильном периоде короткого замыкания, действующие значения токов главных статоров составляют 10015А, 10653А, 10904А (номинальный ток 2761А). Действующее значение вспомогательного напряжения составляет 250 В, ток возбудителя - 6,27 А. Ток во время теста на внезапное короткое замыкание превышает $3I_n$ и длится 2 секунды.

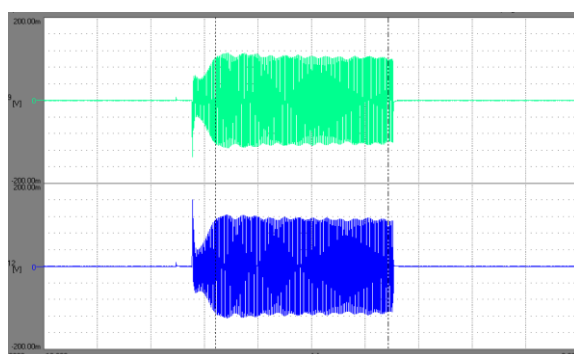


Рис. 7. Токи короткого замыкания генераторов

Fig. 7. Short-circuit currents of generators

Обсуждение

Ледокол «Балтика» в настоящее время эксплуатируется Морспасслужбой РФ для обеспечения работы морской ледостойкой нефтедобывающей платформы «Приразломная» на шельфе Арктики. Это единственный действующий проект Российской Федерации по добыче углеводородов в сложных и суровых условиях арктических широт. Ледокол обеспечивает непрерывную работу платформы и подходящих танкеров ПАО «Совкомфлот» круглый год. Поэтому обеспечение качественной работы единой электроэнергетической системы ледокола «Балтика» имеет большое значение как с экономической стороны, так и с точки зрения обеспечения безопасности плавучих объектов и жизни экипажей этих судов. Установлено, что причиной возникновения обменных колебаний мощности являются зазоры люфтов в контурах управления частотой

вращения дизель генераторов. Причиной же синфазных колебаний мощности служит разница в настройках коэффициентов передачи и уставок регуляторов частоты параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов. Существование зазоров люфтов, как и некоторые различия в настройках регуляторов частоты неизбежны и могут изменять свои значения в процессе эксплуатации. Результаты исследований позволили разработать методы и средства, которые позволяют устранить, либо уменьшить амплитуду колебаний мощности до безопасных значений [11-13]. Необходимо установить блок устранения обменных колебаний мощности, который контролирует превышение их амплитуды допустимого значения. В случае обнаружения такого превышения блок адаптивно уменьшает коэффициенты передачи регуляторов частоты генераторных агрегатов и увеличивает значение уставки частоты вращения для компенсации уменьшения частоты сети. В алгоритме работы блока предусмотрено поддержание равенства настроек регуляторов частоты после описанной их подстройки и адаптации, что позволяет ограничить, либо устранить также и синфазные колебания мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов ледокола [11-14]. Работоспособность и эффективность предложенных мер и средств подтверждено разработанной компьютерной программой.

Дальнейшие исследования показали, что на уменьшение амплитуды обменных колебаний оказывают влияние значения постоянных времени регуляторов частоты вращения [15]. Необходимо отметить, что эта зависимость имеет меньшие возможности и диапазоны, чем изменение коэффициентов передачи регуляторов частоты. Однако, первичную коррекцию целесообразно осуществлять регулировкой постоянных времени регуляторов частоты параллельно работающих генераторов, а в случае необходимости продолжения уменьшения амплитуды колебаний переходить к изменению коэффициентов передачи регуляторов частоты. Такой подход позволит сократить время переходных процессов при устранении колебаний мощности и повысить запас устойчивости единой электроэнергетической системы ледокола.

Заключение

Морской флот имеет решающую роль в освоении арктических территорий, добычи углеводородов и их транспортировки. В связи с преобладанием ледового покрова на водной поверхности суда и плавучие объекты, которые используются в северных широтах, являются ледокольными. Наилучшим способом обеспечения движения морских судов, их маневренности и одновременно ледокольных способностей является использование пропульсивных установок на основе электрических винторулевых колонок. Наиболее надежными и эффективными для таких судов зарекомендовали себя единые электроэнергетические системы, как, например, на ледоколе «Балтика». Очевидно, что обменные и синфазные колебания мощности, возникающие в таких электротехнических комплексах, снижают их надежность и эффективность. Поэтому, необходимо предусмотреть блок, изменяющий настройки регуляторов частоты вращения дизель-генераторов, для контроля и уменьшения колебаний мощности в судовых единых электроэнергетических системах с гребными электрическими установками.

Литература

1. Хватов О.С., Тарпанов И.А., Кузнецов П.В. Судовая электроэнергетическая система с обратимой валогенераторной установкой по схеме машины двойного питания и дизель-генератором переменной частоты вращения. Вестник Астраханского государственного технического университета, 2021. № 3. С. 93–100.
2. Dar'Enkov A.B., Samoyavchev I., Khvatov O.S., et al. Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion. MATEC Web of Conferences. 2017.108.14002.
3. Sen'kov A.P., Dmitriev B.F., Kalmykov A.N., Tokarev L.N. Ship unified electric-power systems. Russian Electrical Engineering, 2017. 88(5). С. 253–258.
4. Губанов Ю.А., Калинин И.М., Корнев А.С., и др. Направления совершенствования судовых единых электроэнергетических систем. Морские интеллектуальные технологии. 2019. №1-1(43). С. 103–109.
5. Zhu, Sipeng; Ma, Zetai ; Zhang, Kun ; Deng, Kangyao. Energy and exergy analysis of the combined cycle power plant recovering waste heat from the marine two-stroke engine under design and off-design conditions. Energy, 2020. Т. 210.
6. Грачева Е.И., Ильясов И.И., Алимова А.Н. Сравнительный анализ и исследование методов расчета потерь электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т.20 № 3-4. С. 62–71.

7. Ившин И.В., Низамиев М.Ф., Владимиров О.В., Ваньков Ю.В. Измерительно-диагностический комплекс для диагностики энергетических установок. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 3-4. С. 109-114.
8. Zhu, Sipeng; Zhang, Kun; Deng, Kangyao. A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles. Renewable & sustainable energy reviews. 2020, T. 120.
9. Geertsma R.D. Visser K., Negenborn R.R. Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion. Applied energy. 2018. T. 228. С. 2490-2509
10. Mondejar M.E.; Andreasen, J.G.; Pierobon, L., et al. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications. Renewable & sustainable energy reviews. 2018. T. 97. С.126-151.
11. Савенко А.Е., Голубев А.Н. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах. Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. Иваново. 2016. 172 с.
12. Савенко А.Е., Савенко П.С. Влияние люфта на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 5-6. С. 46-54.
13. Savenko A.E., Savenko P.S. Analysis of Power Oscillations Parameters in Autonomous Electrical Complexes Using the Method of Customization Charts Designing. Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020, Proc. 2020 Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering. С. 400–405.
14. Алейников А.В., Голубев А.Н., Мартынов В.А. Разработка уточненной математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами для расчетов в реальном времени // Вестник ИГЭУ. 2017. №. 5. С. 37-43.
15. Савенко А.Е., Савенко П.С. Влияние постоянных времени регуляторов частоты на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных дизельных электростанциях. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Казань, 2020. № 1. С. 136–144.

Авторы публикации

Савенко Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры Электрооборудования судов и автоматизации производства, Керченский государственный морской технологический университет. Email: Savenko-70@mail.ru.

Савенко Павел Станиславович – курсант морского факультета Керченского государственного морского технологического университета.

References

1. Khvatov OS, Tarpanov IA, Kuznecov PV. Ship power plant with reversible shaft generator unit operating by dual-power machine scheme and variable speed diesel generator. Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universitet. 2021;3:93–100.
2. Dar'Enkov AB, Samoyavchev I, Khvatov OS, et al. Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion. MATEC Web of Conferences, 2017, 108, 14002.
3. Sen'kov AP, Dmitriev BF, Kalmykov AN, et al. Ship unified electric-power systems. Russian Electrical Engineering. 2017;88(5):253–258.
4. Gubanov YA, Kalinin IM, Kornev AS, et al. Directions of improvement for ship unified power systems. Marine Intelligent Technology. 2019;1-1(43):103–109.
5. Zhu, Sipeng Ma, Zetai Zhang, et al. Energy and exergy analysis of the combined cycle power plant recovering waste heat from the marine two-stroke engine under design and off-design conditions. Energy. 2020, Book: 210, 118558. doi: 10.1016/j.energy.2020.118558.
6. Gracheva EI, Il'jasov I, Alimova AN. The comparative analysis and research of methods of calculation of losses of the electric power in the systems of electrical power supply of the industrial enterprises. Power engineering: research, equipment, technology. 2018;20(3-4):62-71.
7. Ivshin IV, Nizamiev MF, Vladimirov OV. Measuring-diagnostic complex for the diagnosis of power plants. Power engineering: research, equipment, technology. 2014;3-4:109-114.
8. Zhu, Sipeng Zhang, Kun Deng, Kangyao. A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles. Renewable & sustainable energy reviews. 2020, Book: 120, 109611, doi: 10.1016/j.rser.2019.109611.

9. Geertsma RD, Visser K, Negenborn RR. Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion. *Applied energy*. 2018;228:2490-2509. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.07.080
10. Mondejar ME, Andreasen JG, Pierobon L, et al. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications. *Renewable & sustainable energy reviews*. 2018;91:126-151. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.074.
11. Savenko AE, Golubev A.N. Exchange power fluctuations in ship electrotechnical complexes. *Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V.I. Lenina*. Ivanovo, 2016. 172 p.
12. Savenko AE, Savenko PS. Influence of backlash on amplitude of exchange power fluctuations in autonomous electric power equipment. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(5-6):46-54.
13. Savenko AE, Savenko PS. *Analysis of Power Oscillations Parameters in Autonomous Electrical Complexes Using the Method of Customization Charts Designing. Proceedings*. 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020, Proc. 2020 Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering, pp. 400–405.
14. Aleynikov AV, Golubev AN, Martynov VA. Development of a mathematical model of synchronous permanent magnet motor for real-time calculations. *Vestnik IGEU*. 2017;5:37-43.
15. Savenko AE, Savenko PS. Influence of time constants of frequency regulators on the amplitude of power exchange fluctuations in autonomous diesel power plants. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(1):136-144.

Authors of the publication

Alexandr E. Savenko – Kerch State Maritime Technological University. Email: Savenko70@mail.ru.

Pavel S. Savenko – Kerch State Maritime Technological University.

Получено 24.10.2021г.

Отредактировано 31.10.2021г.

Принято 31.10.2021г.