

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.313

DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-6-78-88

УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ МОРСКИХ СУДОВ

Савенко А.Е., Савенко П.С.

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

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть опыт использования и провести исследование электротехнических комплексов морских судов для выяснения возможности улучшения их эксплуатационных характеристик. Получить данные об уровнях шума и вибрации элементов электротехнического комплекса. *МЕТОДЫ.* В статье произведен анализ электротехнического комплекса винторулевыми колонками типа Azipod ледокола Балтика. Рассмотрен вопрос регулирования скорости вращения гребных электродвигателей с помощью частотного регулирования на основе звена постоянного тока и параллельно включенных инверторных блоков на IGBT транзисторах. Управление двигателем со стороны преобразователя частоты может быть основано на прямом управлении крутящим моментом, скалярном и векторном управлении. Существуют режимы контроля над снижением и повышением напряжения. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Приведены типичные зависимости уровней корпусного шума главных двигателей и генераторов. Проведены замеры на различных частотах уровней звуковой мощности двигателя, выхлопных газов и вибрации генераторных установок. Получены экспериментальные осциллограммы обменных и синфазных колебаний мощности при совместно-параллельной эксплуатации дизель генераторных установок. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Предложено использовать многофазные электрические двигатели переменного тока для улучшения эксплуатационных характеристик, в том числе снижения шума и вибрации. Имеющийся опыт применения в гребных электрических установках с винторулевыми колонками Azipod частотных преобразователей на основе выпрямительного звена и инверторных блоков позволяет осуществить такое изменение. Для этого необходимо распараллелить инверторы, питающие каждую из трех фаз и обеспечить соответствующие сдвиги фаз.

Ключевые слова: электротехнический комплекс; дизель-генератор; параллельная работа; обменные колебания мощности; синфазные колебания мощности; азимутальная винторулевая колонка; многофазный электропривод.

Для цитирования: Савенко А.Е., Савенко П.С. Улучшение эксплуатационных характеристик электротехнических комплексов морских судов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 6. С. 78-88. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-78-88.

IMPROVING THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS OF MARINE VESSELS

Savenko A.E., Savenko P.S.

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

Abstract: *THE PURPOSE.* Consider the experience of use and conduct a study of the electrical power systems of sea vessels to determine the possibility of improving their operational characteristics. Obtain data on noise and vibration levels of electrical power systems elements.

METHODS. The article analyzes the electrical power systems of the Azipod type steering columns of the Baltika icebreaker. The issue of regulating the rotation speed of propulsion electric motors using frequency control based on a DC link and parallel-connected inverter units on IGBT transistors is considered. Motor control on the frequency converter side can be based on direct torque control, scalar and vector control. There are control modes for reducing and increasing voltage. **RESULTS.** Typical dependences of structure-borne noise levels of main engines and generators are given. Measurements were taken at various frequencies of engine sound power levels, exhaust gases and vibration of generator sets. Experimental oscillograms of studies of the parallel operation of diesel generator sets were obtained, on which power exchange and common-mode oscillations were recorded. **CONCLUSION.** It is proposed to use multiphase AC electric motors to improve performance characteristics, including reducing noise and vibration. The existing experience in using frequency converters based on a rectifier section and inverter units in electric rowing installations with Azipod propellers makes it possible to implement such a change. To do this, it is necessary to parallelize the inverters that supply each of the three phases and provide the appropriate phase shifts.

Keywords: electrical power system; diesel-generator; parallel operation; power exchange oscillations; power common-mode oscillations; azimuth rudder; multiphase electric drive.

For citation: Savenko A.E., Savenko P.S. Improving the operational characteristics of electrical power systems of marine vessels. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (6): 78-88. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-78-88.

Введение (Introduction)

Состав и характеристики судовых электротехнических комплексов имеют значительные отличия в зависимости от типа судна. Так в работах [1,2] исследуется применение в судовых электростанциях обратимой валогенераторной установки по схеме машины двойного питания. В статьях [3,4] представлена методика расчета расхода топлива электростанций на базе дизель-генераторной установки с регулируемой скоростью для судов с интегрированной электрической движительной установкой, что позволяет экономить топливо и, следовательно, снижать вредные выбросы в атмосферу, показана топливная эффективность унифицированной электростанции на базе регулируемой дизель-генераторной установки мощностью 1000 кВт.

Необходимо отметить также влияние времени и места постройки судов. Морские суда имеют длительный срок эксплуатации, составляющий несколько десятков лет. В связи с этим, в настоящее время находятся в эксплуатации морские суда различных поколений. Электротехнические комплексы морских судов в большинстве случаев имеют в своем составе электростанцию переменного тока, источниками электроэнергии в которой чаще всего являются параллельно работающие дизель-генераторные установки. В случае необходимости использования потребителей постоянного тока, таковые получают питание от преобразователей переменного напряжения в постоянное. Достаточно редко можно встретить на морских судах генераторы постоянного тока в качестве основных источников электроэнергии. Особый интерес с точки зрения исследования вызывают морские суда с гребной электрической установкой.

Электротехнические комплексы морских судов постоянно совершенствуются. Настоящим открытием в области электродвижения морских судов, произошедшее в конце прошлого века, можно считать разработку концепции движения и управления судном с помощью винто-рулевых колонок. В работе [5] отмечается большая важность и ценность изобретения и широкого применения бестрансформаторных гребных установок с винторулевыми колонками Azipod в составе единых судовых электроэнергетических систем (СЭЭС). Статьи [6,7] посвящены использованию многофазных генераторов и многоуровневых инверторов напряжения в единых бестрансформаторных СЭЭС. В статьях [8,9,10] рассматривается сравнение алгоритмов расчетных методов учета потерь в низковольтных сетях с учетом основных параметров электрооборудования. Построены номограммы для определения эквивалентного сопротивления с различными параметрами оборудования, обладающие достаточной точностью и пригодные для практического применения.

В работе [11] рассмотрен асинхронный электропривод с частотным управлением, оснащенный дополнительными элементами - импульсным коммутатором и индуктивным накопителем энергии в звене постоянного тока (ПТ) преобразователя частоты (ПЧ),

обеспечивающий стабилизацию напряжения при просадке напряжения в питающей сети. Поскольку система управления типового ПЧ, выполненного на базе нерегулируемого выпрямителя и автономного инвертора напряжения, не допускает работу при пониженных напряжениях в звене ПТ, ввиду наличия соответствующих защит по уровню напряжения, создан опытный образец преобразователя частоты с расширенными функциональными возможностями, управляемый микропроцессорным устройством фирмы «Texas Instruments» марки TMDX28069, обеспечивающий нормальную работу при просадках напряжения до 48%, за счет включения в звено постоянной высокочастотной импульсной системы повышения напряжения на базе транзисторного коммутатора и индуктивного накопителя энергии. В работе [12] решается задача математического моделирования многофазного синхронного двигателя с постоянными магнитами.

В работах [13,14,15] проводится анализ судовых электротехнических комплексов с точки зрения возникновения обменных колебаний мощности (ОКМ) и синфазных колебаний мощности при совместно-параллельной эксплуатации дизель-генераторных установок в единой СЭЭС с гребными электроприводами.

Целью статьи является анализ опыта использования и исследование электротехнических комплексов морских судов для выяснения возможности улучшения их характеристик, получить данные об уровнях шума и вибрации элементов электротехнического комплекса.

Материалы и методы (Materials and methods)

Морские суда, оснащенные винторулевыми колонками (рис. 1) обладают исключительной маневренностью и отличными ледоходными качествами. Движительный модуль находится под дном судна и в нем находится электрический двигатель переменного тока. На судах с винторулевыми колонками отсутствует традиционный руль, а управление судном осуществляется рулевым модулем, который поворачивает гондолу. Мощность электрических двигателей винторулевых колонок достигает нескольких десятков МВт.

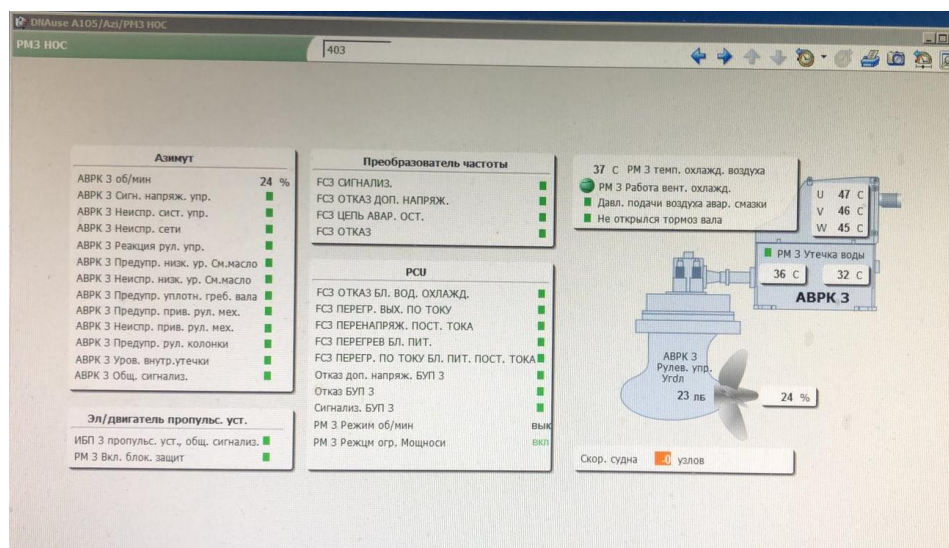


Рис. 1. Винторулевая колонка Azipod на ледоколе Балтика (интерфейс пользователя DNause)

Fig. 1. Rudder column Azipod on the Baltika icebreaker (DNAuse user interface)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Даже по сравнению с винторулевой колонкой типа «Z» винторулевые колонки с электродвигателем внутри типа Azipod обладают полным перечнем преимуществ. Azipod изначально предназначены для работы на ледоколе, они имеют механически более простую конструкцию, механические потери составляют всего 0,5 %, вибрация и шум даже при высокой скорости низкие, выдерживаемая перегрузка по крутящему моменту высокая, более высокая устойчивость частоты вращения, меньшая вероятность остановки гребного винта. Также электрические винторулевые колонки не имеют зубчатых колес, требуют небольшое количество смазочного масла, их валопровод крепится всего на двух подшипниках, а зазор между кромкой лопасти намного больше. По мере развития технологий винторулевые колонки стали оснащаться синхронными двигателями с постоянными магнитами. Изначально скорость вращения двигателя управлялась

преобразователями частоты, в качестве которых применялись циклоконверторы. Сейчас им на смену пришли цифровые ПЧ со звеном ПТ (рис. 2).

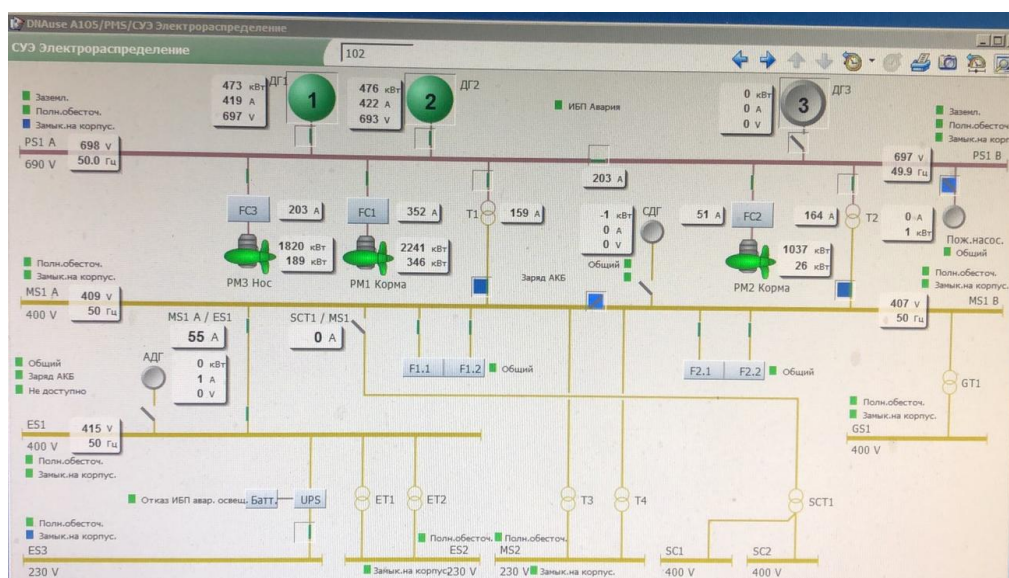


Рис. 2. Схема электротехнического комплекса ледокола «Балтика» (интерфейс пользователя DNause)

Fig. 2. Diagram of the electrical power system of the icebreaker “Baltika” (DNause user interface)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Основным узлом блока управления приводом DSU является диодный выпрямитель. Он преобразует трехфазный переменный ток в постоянный ток, который далее поступает в звено ПТ электропривода. Звено ПТ затем подает питание на инвертор, который управляет электродвигателем. К промежуточной цепи могут быть подключены только один инвертор (одиночный привод) или несколько инверторов (мультидрайв).

DSU имеет два режима: рабочий режим и режим запуска. В рабочем режиме диоды соединяют фазы переменного тока с шиной постоянного тока в циклической последовательности. В режиме запуска DSU находится лишь несколько секунд после подачи команды запуска пользователем.

На рисунке 3 показана типичная зарядка шины постоянного тока.

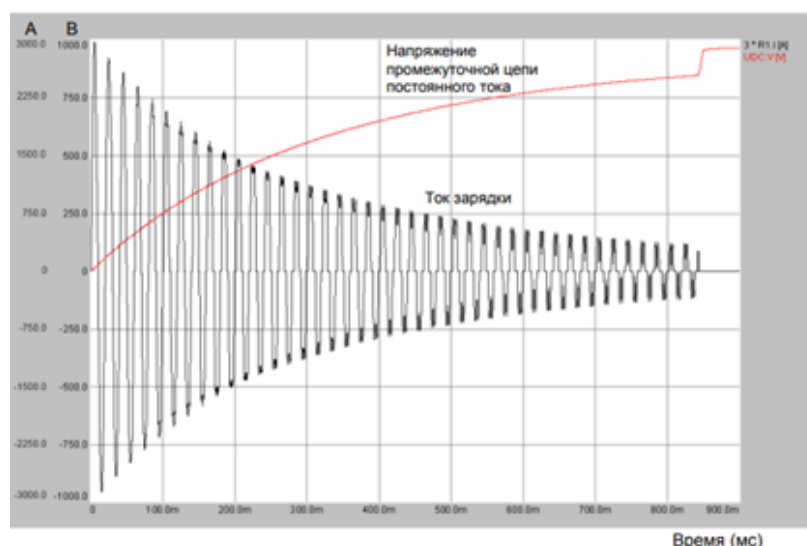


Рис. 3. Зарядка шины постоянного тока

Fig. 3. DC Bus Charging

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При снижении или исчезновении питающего напряжения двигатель снабжает привод энергией за счет своего вращения, сохраняя таким образом работоспособность привода (рис. 4). Если контактор за время отсутствия питания не разомкнулся, то после возобновления подачи питания система продолжит работу. Также возможна установка

источника бесперебойного питания в качестве схемы удержания главного контактора если напряжение звена ПТ не ниже $0,82 \cdot 1,35 \cdot U_{1min}$, где U_{1min} - минимальное значение напряжения. Таким образом, краткосрочные исчезновения питания не нарушают работу привода. Также существует защита от увеличения напряжения выше установленного предела $1,24 \times 1,35 \times U_{1max}$, где U_{1max} - максимальное значение входного напряжения.

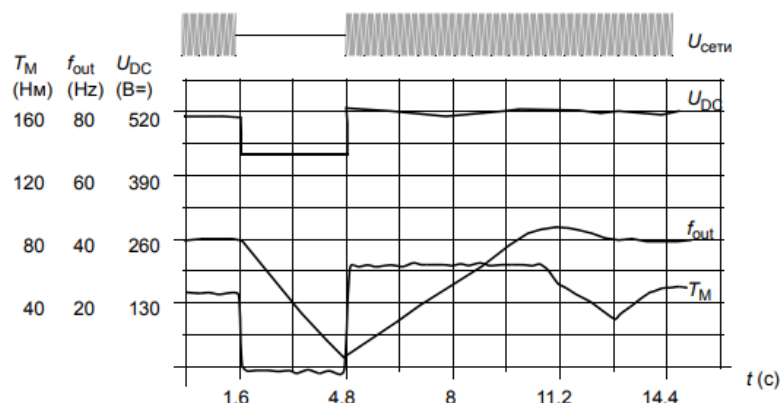


Рис. 4. Управление низким напряжением U_- – напряжение звена ПТ привода, f_{out} – частота привода на выходе, T_M – вращающий момент

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

DTC управление двигателем со стороны преобразователя частоты основано на прямом управлении моментом вращения. Также существует режим скалярного управления гребным электродвигателем.

Для питания переменным током каждой из трех фаз гребного двигателя предусмотрена параллельная работа от 2 до 12 инверторов (рис. 5). Таким образом обеспечивается номинальная мощность.

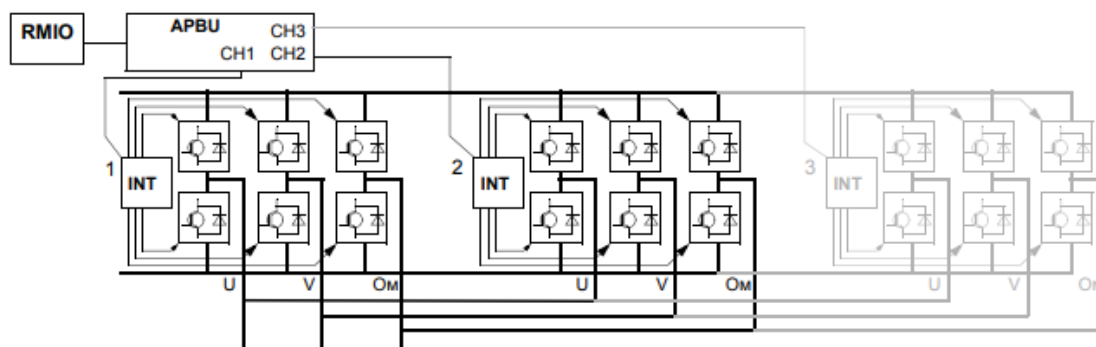


Рисунок 5 – Блок-схема инвертора (2 – 12 параллельных инверторов) RMIO - блок управления, AINT – интерфейсный блок, APBU – блок разветвления

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Предусмотрена возможность продолжения работы схемы в случае выхода из строя одного или нескольких инверторов. При этом неисправный модуль удаляется и производится перепрограммирование параметра. Если продолжается работа с ограниченным током, то необходимо установить число имеющихся инверторных модулей. Происходит автоматическое изменение конфигурации линии связи RPCS, и максимальный ток ограничивается внутренним образом в соответствии с новой конфигурацией инверторов и номинальным током инверторов.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

На ледоколе Балтика проведены исследования, направленные на выяснение уровней шума и вибрации при работе судового электротехнического комплекса. Типичные уровни структурного шума выше и ниже упругих опор дизель-генераторных установок представлены как скорость вибрации в дБ, отсчет 1×10^{-6} мм/с, на октавную полосу (рис. 6 и 7).

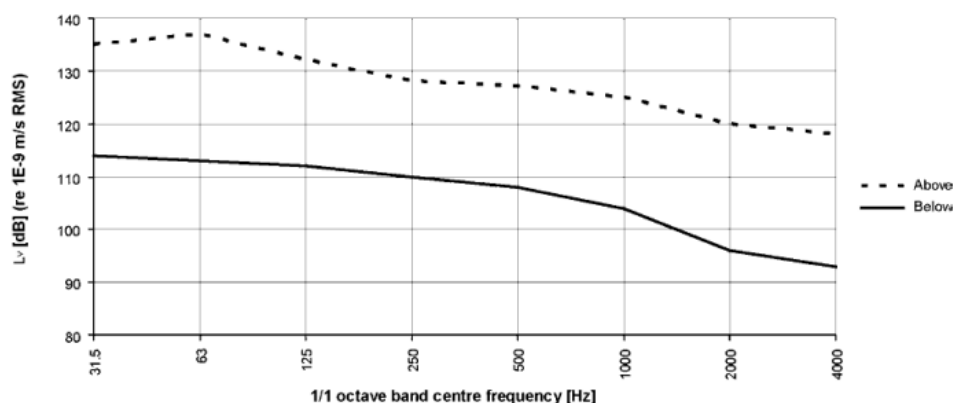


Рис. 6. Главные двигатели, типичные уровни корпусного шума выше и ниже упругого крепления

Fig. 6. Main engines, typical structure-borne noise levels above and below elastic mounting

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

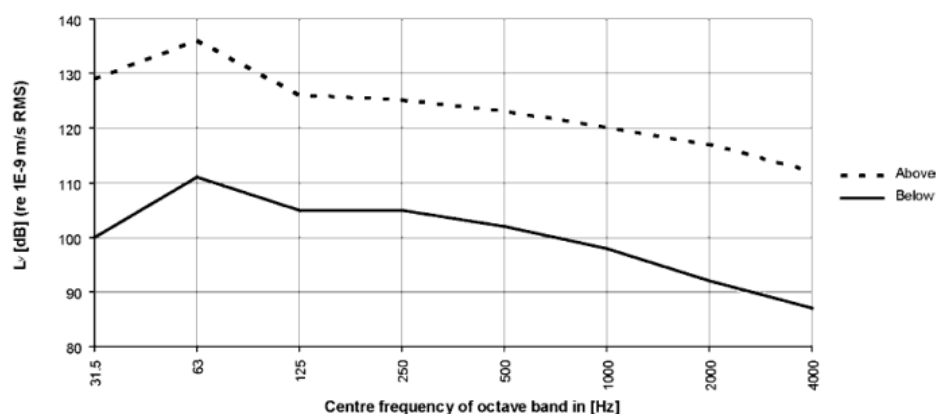


Рис. 7. Генераторные установки, типичные уровни структурного шума выше и ниже устойчивого крепления

Fig. 7. Generator sets, typical structure-borne noise levels above and below stable mounting

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Воздушный шум двигателей измеряется как уровень звуковой мощности в соответствии со стандартом ISO 9614-2. Результаты для каждой дизель-генераторной установки представляют собой уровень звуковой мощности двигателя, взвешенный по шкале А, при полной нагрузке и номинальном режиме скорости (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Уровень звуковой мощности двигателя W20 по шкале А в октавном диапазоне частот (дБ, по отношению к 1 пВт)

Sound power level of the W20 engine on the A scale in the octave frequency range (dB, ref. 1 pW)

Гц	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Общий
8L	84	98	109	111	111	115	105	118
9L	97	97	106	110	113	113	111	120

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты в таблице 2 представляют собой типичный уровень звуковой мощности выхлопных газов, излучаемый из выпускного отверстия турбонагнетателя в свободное поле при полной нагрузке двигателя и номинальной частоте вращения. Строки 8L в таблицах 1 и 2 соответствует 8 цилиндровому рядному дизель-генераторному агрегату Wärtsilä 8L20, а строки 9L соответствует 9 цилиндровому рядному дизель-генераторному агрегату Wärtsilä 9L20. Wärtsilä 9L20 и 8L20 четырехтактные, нереверсивные, дизельные двигатели с турбонаддувом и промежуточным охлаждением, с прямым впрыском топлива.

Таблица 2

Table 2

Уровень звуковой мощности выхлопных газов в свободном поле в октавном диапазоне частот (дБ, по отношению к 1 пВт)

Sound power level of exhaust gases in a free field in the octave frequency range (dB, ref. to 1 pW)

Гц	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	Общий
8L	135	141	143	135	137	122	118	112	146
9L	142	152	151	141	132	122	116	114	155

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исследования зафиксировали для дизель-генераторных установок уровни вибрации, приведенные в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Измерение вибрации при самовозбуждении, $r = 1000$ об/мин, $U_1 = 690$ В

Vibration measurement during self-excitation, $r = 1000$ rpm, $U_1 = 690$ V

Край со стороны дизеля	Горизонтальная	Вертикальная	Осевая	
	0,4	0,7	1,4	мм/с
Противоположный край	Горизонтальная	Вертикальная	Осевая	
	0,7	0,7	0,4	мм/с

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Оптимизация магнитного потока электродвигателей винторулевых колонок ограничивает динамические характеристики управления приводом, поскольку при малом задании магнитного потока крутящий момент привода не может быстро увеличиваться. Это способствует уменьшению потребления электроэнергии и уменьшает уровень шума до 10 процентов.

Измерение формы сигнала напряжения дало следующие результаты - коэффициент нелинейного искажения формы линейного напряжения 4,21 % а коэффициент нелинейного искажения формы сигнала фазного напряжения 5,27 %.

Проведенные исследования выявили существование ОКМ (рис. 8) и синфазных (рис. 9) колебаний мощности при совместно параллельной работе главных дизель-генераторных установок.

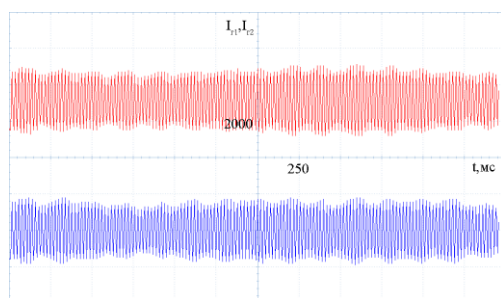


Рис. 8. Осциллограммы обменных колебаний мощности при совместно-параллельной работе генераторов судового электротехнического комплекса

Fig. 8 - Oscillograms of power exchange oscillations during joint-parallel operation of ship electrical power system generators

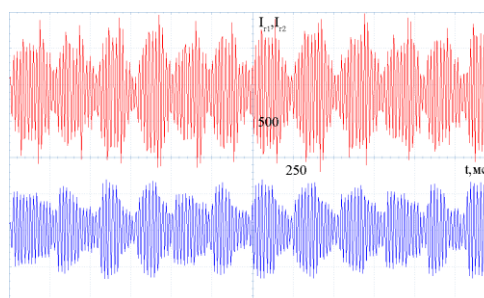


Рис. 9 - Осциллограммы синфазных колебаний мощности при совместно-параллельной работе генераторов судового электротехнического комплекса

Fig. 9 - Oscillograms of common-mode power oscillations during joint-parallel operation of ship electrical power system generators

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Такой режим работы используется постоянно для питания судовых потребителей, в том числе винторулевых колонок Azipod, например, на ледоколе Балтика. Такие колебания мощности приводят к ухудшению эксплуатационных характеристик судового электротехнического комплекса. Одним из последствий, вызываемых обменными и синфазными колебаниями мощности, является повышенные вибрации и шум.

Обсуждение (discussions)

Проведенные на ледоколе Балтика исследования выявили наличие шумов и вибраций элементов судового электротехнического комплекса. Наиболее существенный вклад в уровень шума и вибрации на судне вносят дизель-генераторные установки и гребные электрические двигатели, размещенные в винторулевых колонках. Наличие на судне вибрации вызывает появление усталостных повреждений. Также происходит ослабление резьбовых и клепанных соединений. Технологические зазоры меняют свои конструктивные значения и не могут выполнить на заданном уровне свою технологическую функцию. Вибрация увеличивает ошибку измерения приборов с подвижными элементами. Особенно чувствительны к вибрационным повреждениям электронные приборы и устройства, в которых могут образовываться трещины на платах и в местах пайки. Вибрация и шум оказывают вредное воздействие на людей, находящихся в зоне их действия. Как было отмечено выше обменные и синфазные колебания мощности усиливают вибрацию и шум при работе электроприводов, входящих в состав электротехнического комплекса судна, в том числе гребных электродвигателей системы Azipod. Однако, основной причиной существования таких колебаний мощности является наличие технологических зазоров люфта в системах управления частотой дизель-генераторных установок, на изменение которого оказывает влияние вибрация. Таким образом, между вибрацией и колебаниями мощности между параллельно работающими генераторами электротехнического комплекса существует взаимное влияние. Внедрение блока устранения ОКМ позволит уменьшить амплитуду колебаний мощности, что в свою очередь уменьшит вибрацию.

Значительного снижения шумов и вибраций электрических двигателей винторулевых колонок *Azipod* можно достичь влиянием на конфигурацию магнитного поля увеличением количества фаз обмоток. Таким образом, целесообразным является применение многофазных электрических машин переменного тока.

Увеличение числа фаз статорной обмотки асинхронного двигателя способствует исключению асинхронных гармоник из состава магнитного поля, что значительно улучшает виброшумовые характеристики.

На рисунке 10 изображены экспериментальные графики изменения относительных виброскоростей (по отношению к ее максимальному значению при $f=50$ Гц) в функции числа фаз [16].

При рассмотрении проекций напряжения статора, приведенного к первой пространственной гармонической для трех- и девятифазного АД (рис.11) очевидно, что несинусоидальность напряжения при увеличении числа фаз существенно уменьшается [16]. Эта особенность приводит к уменьшению величины пульсаций электромагнитного момента двигателя.

$$\Delta M_{\text{ЭМ}} \equiv \frac{1}{m^2}.$$

Частоту пульсаций можно найти умножив частоты питающего напряжения f на число фиксированных положений вектора напряжения на комплексной плоскости n .

Если пульсации момента изменяются по синусоидальному закону:

$$\Delta M_{\text{ЭМ}}(t) = \Delta M_{\text{max}} \sin(2\pi fnt + \phi_{M0}),$$

то пульсации скорости будут изменяться в соответствии с формулой

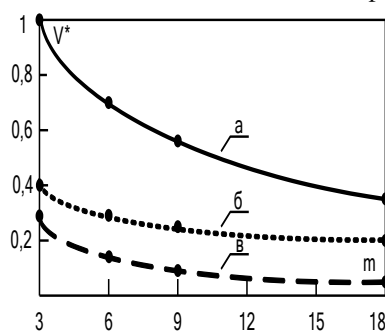


Рис. 10 - Графики относительных виброскоростей при а – 50 Гц; б – 30 Гц; в – 2,5 Гц

Fig.10 - Graphs of relative vibration velocities at a – 50 Hz; b – 30 Hz; c – 2.5 Hz

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

$$\Delta\Omega(t) = \frac{1}{J_{\Sigma}} \int \Delta M_{\Sigma M}(t) dt = \frac{\Delta M_{\max}}{2\pi f n J_{\Sigma}} \sin\left(2\pi f n t + \varphi_{M0} - \frac{\pi}{2}\right) = \Delta\Omega_{\max} \sin\left(2\pi f n t + \varphi_{M0} - \frac{\pi}{2}\right),$$

где $\Delta\Omega_{\max} = \frac{\Delta M_{\max}}{2\pi f n J_{\Sigma}} \equiv \frac{1}{m^3} \frac{1}{f}$ - величина пульсаций скорости АД,

(J_{Σ} – приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции).

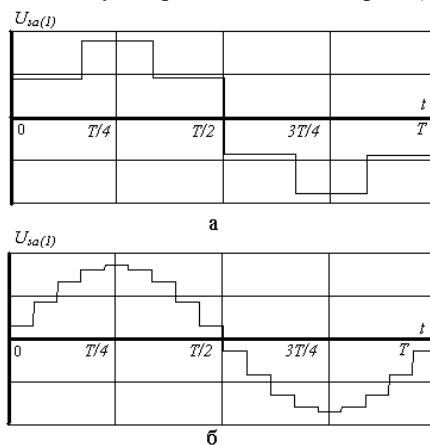


Рис. 11 - Напряжение статора, а – для трехфазного АД, б – для девятифазного асинхронного двигателя

Fig. 11 - Stator voltage, a – for three-phase asynchronous motor, b – for nine-phase for three-phase asynchronous motor

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таким образом, величина пульсаций скорости вращения двигателя обратно пропорциональна кубу числа фаз статора и частоте питающего АД напряжения.

Использование синхронных двигателей с увеличенным числом фаз также позволяет получить существенные преимущества в снижении шума и вибрации и улучшает технико-экономические показатели. Многофазный электропривод обладает большим диапазоном регулирования скоростей, лучшей перегрузочной способностью и КПД, выше быстродействие и надежность.

В судовом электротехническом комплексе, например, на рассмотренном на ледоколе Балтика, можно распараллелить инверторы, питающие каждую из трех фаз и подключить их индивидуально или попарно на каждую отдельную фазу многофазного электродвигателя. Кроме этого, при таком подключении необходимо обеспечить соответствующие сдвиги фаз.

Заключение (Conclusion)

Проведенный анализ и исследования работы электротехнических комплексов морских судов показал существование в них шумов, вибраций и колебаний мощности между параллельно работающими генераторными установками. В результате исследований, проведенных на примере электротехнического комплекса с винторулевыми колонками на ледоколе Балтика, предложено использовать многофазные электрические двигатели переменного тока для улучшения эксплуатационных характеристик, в том числе снижения шума и вибрации. Имеющийся опыт применения в гребных электрических установках с винторулевыми колонками Azipod частотных преобразователей на основе выпрямительного звена и инверторных блоков позволяет осуществить такое изменение в электротехнических комплексах.

Литература

1. Хватов О.С., Тарпанов И.А., Кузнецов П.В. Судовая электроэнергетическая система с обратной валогенераторной установкой по схеме машины двойного питания и дизель-генератором переменной частоты вращения. Вестник Астраханского государственного технического университета, 2021, № 3. С. 93–100.
2. 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, Том: 120, Номер статьи: 109611 DOI: 10.1016/j.rser.2019.109611.
3. Dar'Enkov A.B., Samoyavchev I., Khvatov O.S., Sugakov V. Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion. MATEC Web of Conferences, 2017, 108, 14002.
4. 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, Том: 210, Номер статьи: 118558 DOI: 10.1016/j.energy.2020.118558.

5. Sen'kov A.P., Dmitriev B.F., Kalmykov A.N., Tokarev L.N. Ship unified electric-power systems. Russian Electrical Engineering, 2017, 88(5), стр. 253–258.
6. Губанов Ю. А., Калинин И. М., Корнев А. С., Кузнецов В. И., Сеньков А. П. Направления совершенствования судовых единых электроэнергетических систем. Морские интеллектуальные технологии, 2019, №1-1(43), стр. 103–109.
7. Авдеев, Б. А. Интеллектуальные энергоэффективные системы морских судов. Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2021. – № 4. – С. 99–113.
8. 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.
9. Gracheva E. I., Alimova A.N. Calculating Methods and Comparative Analysis of Losses of Active and Electric Energy in Low Voltage Devices . International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019. 361-367.
10. Грачева Е.И., Алимова А.Н., Абдуллазянов Р.Э. Анализ и способы расчета потерь активной мощности и электроэнергии в низковольтных цеховых сетях. Вестник КГЭУ.2018;4(40):53-65.
11. Мещеряков В.Н., Черкасова В.С., Мещерякова О.В. Коррекция системы векторного управления асинхронным электроприводом / Системы управления и информационные технологии, 2015. №3(61). С. 36-38.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Ананьев, С. С., Голубев А. Н. Асинхронный электропривод с улучшенными виброшумовыми характеристиками. Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2009. – 160 с.

Авторы публикации

Савенко Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры Электрооборудования судов и автоматизации производства Керченского государственного морского технологического университета. E-mail: Savenko-70@mail.ru.

Савенко Павел Станиславович – аспирант кафедры Электрооборудования судов и автоматизации производства Керченского государственного морского технологического университета.

References

1. Khvatov O. S., Tarpanov I. A., Kuznecov P. V., Ship power plant with reversible shaft generator unit operating by dual-power machine scheme and variable speed diesel generator. Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta , 2021, № 3. С. 93–100.
2. 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, Book: 210, 118558, DOI: 10.1016/j.energy.2020.118558.
3. Dar'Enkov A.B., Samoyavchev I., Khvatov O.S., Sugakov V. Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion. MATEC Web of Conferences, 2017, 108, 14002.
4. 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.
5. Sen'kov A.P., Dmitriev B.F., Kalmykov A.N., Tokarev L.N. Ship unified electric-power systems. Russian Electrical Engineering, 2017, 88(5), pp. 253–258.
6. Gubanov Y. A., Kalinin I. M., Kornev A. S., Kuznetsov V. I., Sen'kov A. P. Directions of improvement for ship unified power systems. Marine Intelligent Technology, 2019, №1-1(43), pp. 103–109.
7. Avdeyev B. A. Intelligent energy-efficient systems of marine vessels. Bulletin of the Kerch State Maritime Technological University. 2021; 4: 99-113.
8. 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.

9. Gracheva E. I., Alimova A.N. Calculating Methods and Comparative Analysis of Losses of Active and Electric Energy in Low Voltage Devices. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019. 361-367.
10. Gracheva E.I., Alimova A.N., Abdullazjanov R.Je. Analiz i sposoby rascheta poter' aktivnoj moshhnosti i jelektroenergii v nizkovol'nyh cehovyh setjah. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta. 2018;4(40):53–65.
11. Meshherjakov VN, Cherkasova VS, Meshherjakova OV. Korrekcija sistemy vektornogo upravlenija asinhronnym jelektroprivodom. Sistemy upravlenija i informacionny etehnologii. 2015;3(61): 36-38.
12. Aleynikov A.V, Golubev A.N, Martynov V.A. Development of a mathematical model of synchronous permanent magnet motor for real-time calculations. Vestnik IGEU. 2017;5:37- 43.
13. Savenko A.E, Golubev A.N. Exchange power fluctuations in ship electrotechnical complexes. Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskij universitet imeni V.I. Lenina. Ivanovo, 2016. 172 p.
14. Savenko A.E, Savenko P.S. 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.
15. 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, pp. 400–405.
16. Ananyev S. S. Golubev A.N. Asynchronous electric drive with improved vibration and noise characteristics. Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskij universitet imeni V.I. Lenina. Ivanovo, 2009. 160 p.

Authors of the publication

Alexandr E. Savenko - Kerch State Maritime Technological University. Savenko-70@mail.ru

Pavel S. Savenko - Kerch State Maritime Technological University.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено **10.12.2023 г.**

Отредактировано **15.12.2023 г.**

Принято **22.12.2023 г.**