

УДК 621.3

Рак А.Н., кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Камчатский государственный технический университет»,

Гутаревич В.О., доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»

РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СУДОВЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы, связанные с минимизацией количества преобразователей частоты, применяемых для обеспечения заданных режимов работы при управлении различными судовыми механизмами. Показано, что при равенстве мощностей электродвигателей, применяемых для привода наиболее мощных потребителей, можно в одном преобразователе частоты реализовывать различные модели управления.

Ключевые слова: морское судно, синхронная машина, генератор, двигатель, асинхронная машина, преобразователь частоты, береговая сеть

Современные морские суда являются энергонасыщенными объектами с высоким уровнем механизации, электрификации, автоматизации и компьютеризации. Многолетний опыт эксплуатации судового оборудования показывает, что в настоящее время тема расширение функциональных возможностей отдельных узлов и приборов представляет собой интерес, как с технической точки зрения, так и с экологической. Различные типы судовых электрических машин используются для приведения в действие основных и вспомогательных механизмов. А управление и регулирование ними осуществляется с помощью различных устройств, начиная от простых реостатов и заканчивая сложными преобразовательными установками – преобразователями частоты (ПЧ).

В современной практике судоходных компаний экипажи плавсредств формируются с учетом не только эксплуатации, а и текущим техническим обслуживанием или ремонтом в экстренных случаях. Выполнение сервисных работ, как правило, остается только за предприятиями-изготовителями оборудования. Это в первую очередь связано со сложностью узлов и

механизмов, в частности ПЧ, отсутствием необходимой диагностической и наладочной аппаратуры, а иногда и недостаточного уровня квалификации обслуживающего персонала. Кроме того, ПЧ существенно отличаются как по мощности, так и конструктивно.

Цель работы – раскрыть более полно функциональные возможности судовых ПЧ.

Рассмотрим работу ПЧ на примере контейнеровоза с вместимостью 16000 тыс. контейнеров, технические характеристики которого приведены в [1]. В качестве главного двигателя (ГД) на судне установлен малооборотный дизель (МОД) типа DOOSAN-WÄRTSILÄ-SULZER RT-flex96C с электронным управлением (ЭУ), номинальной мощностью 93360 л.с. (68640 кВт) и частотой вращения 102 об/мин. Как показывает практика, во время эксплуатации ГД довольно часто работают в режимах с пониженной частотой вращения (прохождение каналов, плавание в тумане). Отсюда следует, что большое значение, с точки зрения обеспечения безопасности мореплавания, приобретает минимально устойчивая частота вращения ГД, работающего на винт. В соответствии с требованиями «Регистра...» эта величина не должна быть ниже $0,3n_{\text{ном}}$, ведь чем меньше минимально устойчивая частота вращения, тем лучше маневренные свойства судна. На некоторых современных МОД она составляет $(0,16...0,18 n_{\text{ном}})$ [2].

Особенностью рассматриваемого судна является то, что в линию гребного вала установлена синхронная машина (СМ) (рис.1), которая может использоваться в режиме генератора (Г) или двигателя (Д).

При этом, мощность в режиме генератора составляет 2,5МВт, а в режиме двигателя – 6МВт. Технические возможности и работа системы в данном режиме были досконально изложены в [2]. Поэтому здесь рационально уделить внимание только системе управления.

Все современные суда практически на 80% оборудованы ПЧ фирмы SIEMENS – Sinamics S120, и рассматриваемое судно не является исключением.

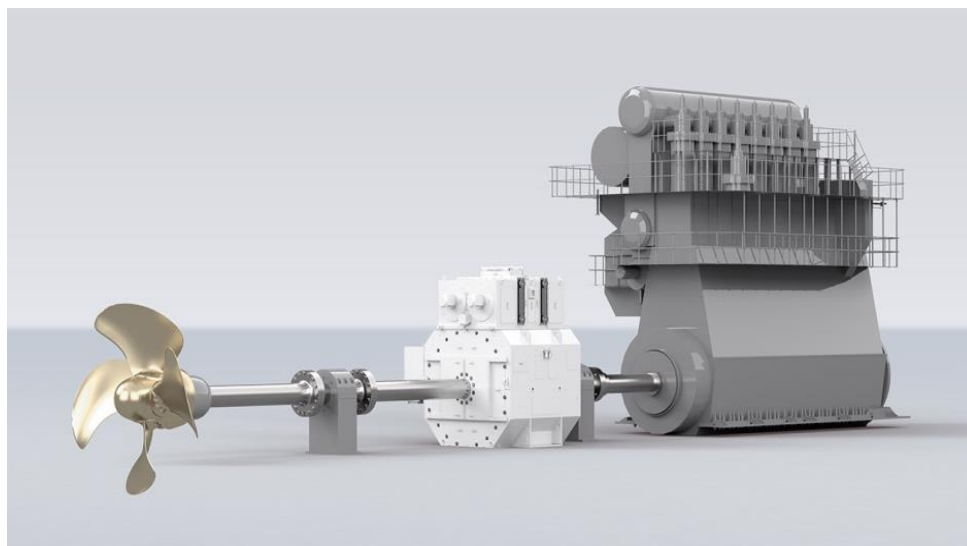


Рис.1 Главный двигатель и синхронная машинная, установленная в линию гребного вала [1]

Предлагаемый вариант силовой схемы с активным выпрямителем, обеспечивающим движение энергии в обоих направлениях, значительно улучшит эксплуатационные характеристики ПЧ (рис.2). Наличие активного выпрямителя позволяет обеспечить работу ВГ/Д на частотах, не превышающих 30 об/мин.

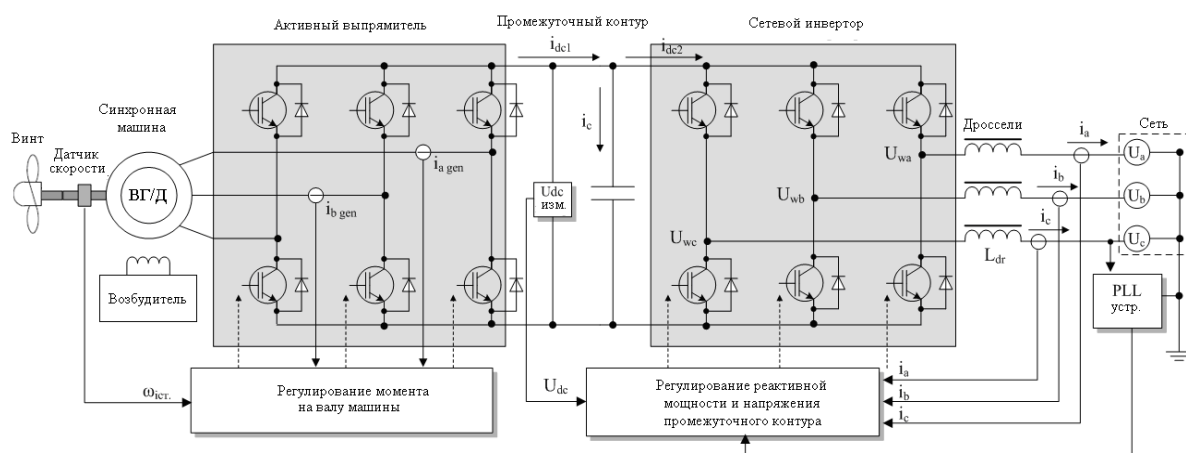


Рис.2. Силовая схема для работы синхронной машины в режиме генератора/двигателя с судовой сетью

Представленная схема-решение реализуема в указанном выше типе ПЧ. Ее преимущество – возможность корректировки момента за счет применения принципов векторного управления.

При работе с постоянным потоком, основные уравнения явнополюсного ГД, позволяют составить структурную схему машины, представленную на рис.3. Важное условие – уравнения должны быть записаны для вращающейся системы координат d - q , ориентированной по потоку ротора.

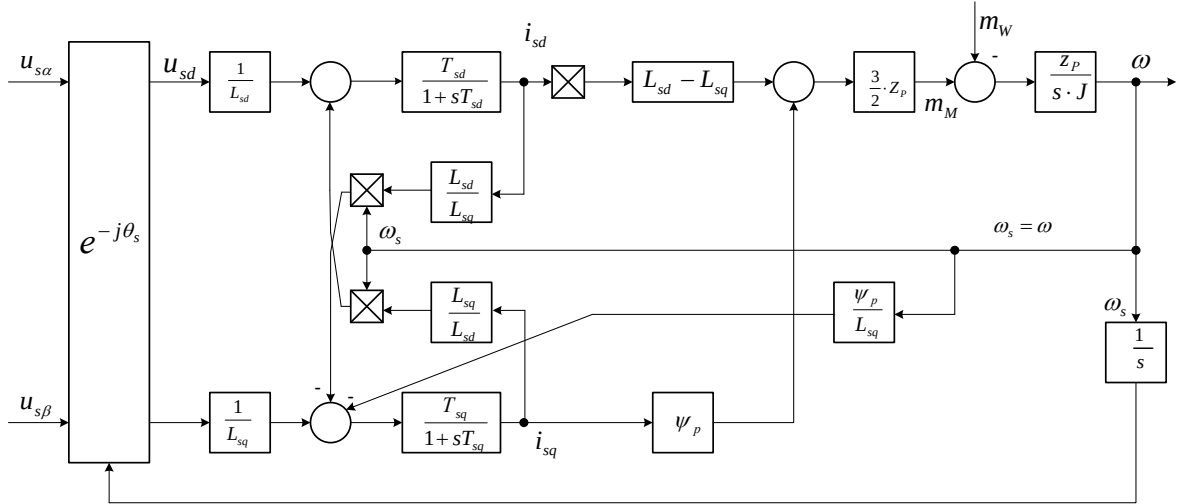


Рис. 3. Структурная схема синхронной машины в системе координат d - q

Поскольку принципы векторного регулирования позволяют реализовать свободную ориентацию вектора тока статора во вращающейся системе координат d - q , значение электромагнитного момента можно определить, в соответствии с выражением:

$$M_{БГ} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{sd} \cdot i_{sq} - \Psi_{sq} \cdot i_{sd}), \quad (1)$$

Для структурной схемы (рис.3) в соответствии с (1):

$$M_{БГ} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot (\Psi_p \cdot i_{sq} + i_{sd} \cdot i_{sq} \cdot (L_{sd} - L_{sq})), \quad (2)$$

где $M_{БГ}$ – момент на валу ВГ/Д; z_p – количество пар полюсов машины; Ψ_p – поток возбуждения; L_{sd} , L_{sq} – индуктивности статора по оси d и q ; i_{sd} , i_{sq} – проекции тока статора на оси d и q , соответственно.

Исключительно при строго перпендикулярном расположении тока статора по отношению к потоку его проекции на ось d - i_{sd} момент ВГ/Д равен нулю. Тогда его можно определить, применив выражение:

$$M_{БГ} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \Psi_p \cdot i_{sq}. \quad (3)$$

Отсюда видно, что для регулирования момента достаточным является влияние на проекцию тока статора на ось q - i_{sq} .

В этом случае система регулирования приобретает вид, указанный на рис.4. В ней полярность сигнала задания на момент будет определять режим работы ГД, например, при положительном задании ГД будет работать двигателем, а при отрицательном – генератором. Быстродействие контуров тока обеспечивают ПИ-регуляторы совместно с блоком компенсации ЭДС. Процесс корректировки осуществляется во вращающейся системе координат d - q , ориентированной по потоку ротора. За необходимую ориентацию вектора напряжения в пространстве отвечает модулятор, функционирующий на частоте 8кГц. При этом гарантируется качественная форма тока Г/Д и обеспечиваются все основные режимы ГД в составе с судовым ПЧ.

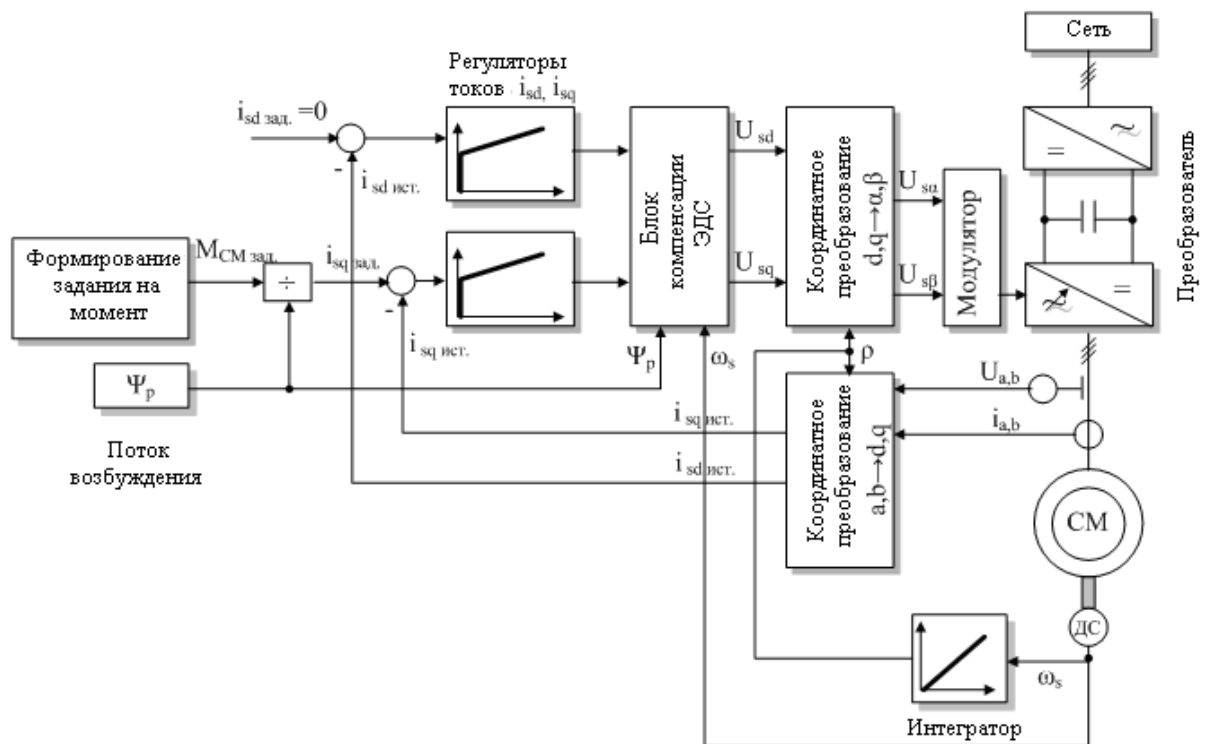


Рис.4. Структура системы регулирования момента синхронной машины

Схема системы регулирования и результаты ее моделирования в программной среде MathLAB (в относительных единицах) приведены на рис.5 и рис.6, соответственно.

Высокая энергоэффективность, но, в то же время, ограниченная мощность – еще одна особенность современных морских судов. С повышением

мощности ГД, соответственно, будет увеличиваться и сила генераторов судовых электростанций.

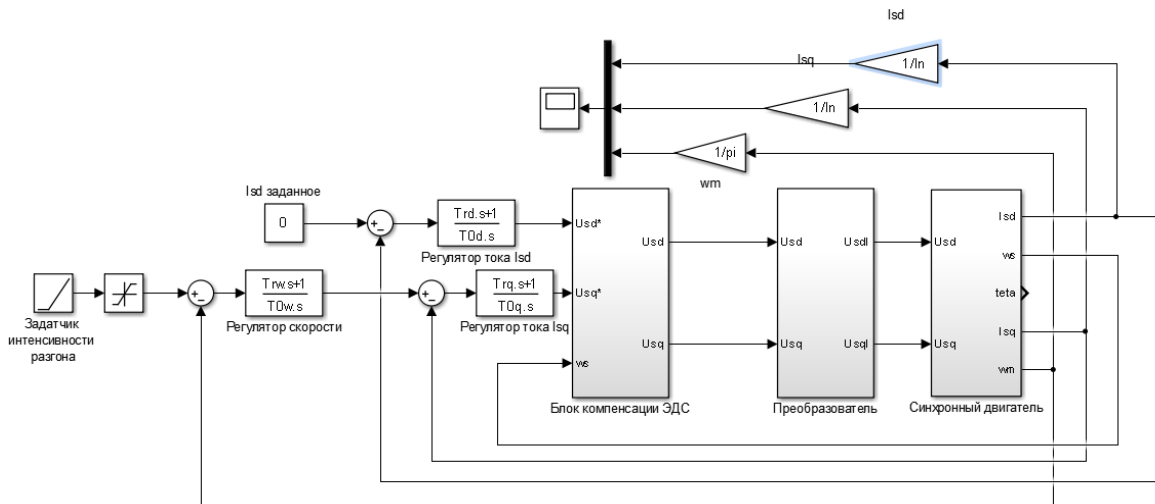


Рис. 5. Схема системы регулирования Г/Д

При использовании на судах напряжения до 1000 В это вызывает увеличение массогабаритных показателей электромеханического оборудования и токовых нагрузок.

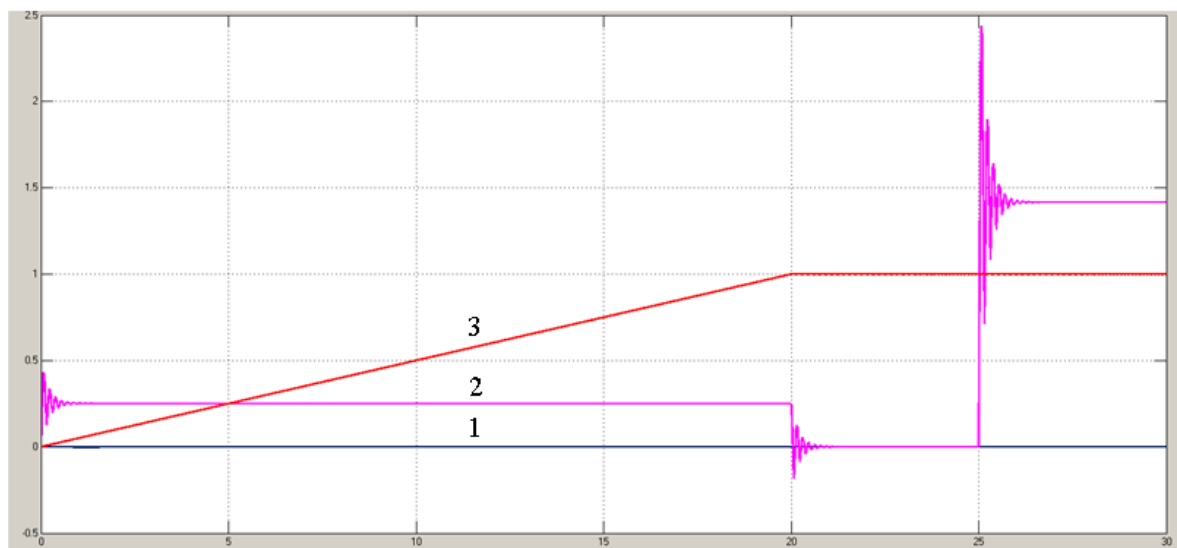


Рис. 6. Результаты моделирования системы регулирования Г/Д: 1 – потокообразующая компонента статора; 2 – моментобразующая компонента статора (пропорциональна моменту); 3 – частота вращения

Поэтому, во избежание данной проблемы, на судах рекомендовано использование электрических генераторов с напряжением выше 1000 В, а

именно 6000 В (50 Гц) или 6600 В (60 Гц). Для приведения в действие различных механизмов, асинхронные машины получили на судах широкое распространение. Их главное преимущество – простота конструкции и, в следствие этого, надежность. Но режим пуска мощных потребителей может негативно повлиять на работу всей электроэнергетической системы, и даже вызвать отключение некоторых узлов. К таковым потребителям относятся асинхронные двигатели (АД) подруливающих устройств (ПУ) (рис.7), относящихся к системе активного управления и маневрирования плавсредством. Его технические характеристики представлены в [1] и табл.1.

Таблица 1 – Технические характеристики приводного асинхронного двигателя

Тип	U_n , В	I_n , А	$I_{п}$, А	I_o , А	$\cos\varphi$	η , %	λ_n	λ_{max}
ABB AMB 560L8A VAMH	6600	241	1277,3	59	0,89	0,92	1,8	2,0

Об особенностях их пуска, достаточно подробно изложено в [4]. Для обеспечения плавности пуска показано применение ПЧ, которые обеспечивают заданный режим работы (рис.8). Построение механических характеристик приводного АД осуществляется по формуле Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_{max}}{\frac{s}{s_{KP}} + \frac{s_{KP}}{s}}, \quad (5)$$

где M_{max} – максимальный (критический) момент электродвигателя, Н·м; s – текущее значение скольжения, о.е.; s_{KP} – значение критического скольжения, о.е.

Моментная характеристика механизма (винта) определяется в соответствии с выражением:

$$M = k_M \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^5, \quad (6)$$

где k_M – коэффициент момента винта; ρ – плотность морской воды, кг/м³; n – частота вращения двигателя, об/мин; D – диаметр винта, м.

Пересечение механических характеристик приводного асинхронного двигателя с характеристикой винтового механизма в определенных точках будет соответствовать заданным режимам работы.

В соответствии с правилами технической эксплуатации продолжительность работы ПУ должна составлять не более 30 мин. После чего двигатель подлежит отключению, чтобы не допустить его перегрева [4]. Естественно, что эксплуатация такого ПЧ будет не рациональна, поскольку большую часть времени механизм будет простаивать.

Поскольку установленный на судне ПЧ имеет определенную мощность, то в периоды, когда СМ не используется, его применение для управления АД ПУ будет рациональным. Для этого достаточно будет переключить модель управления.

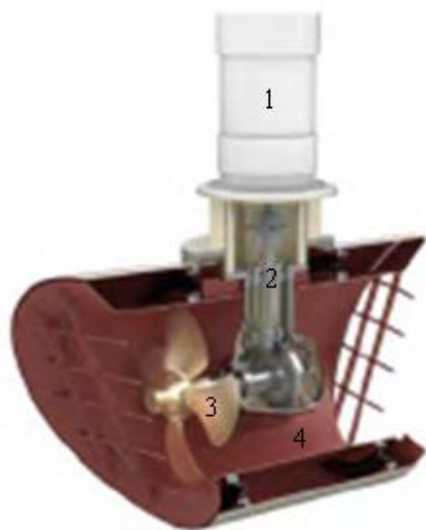


Рис. 7. Подруливающее устройство: 1 – двигатель; 2 – редуктор; 3 – винт; 4 – труба

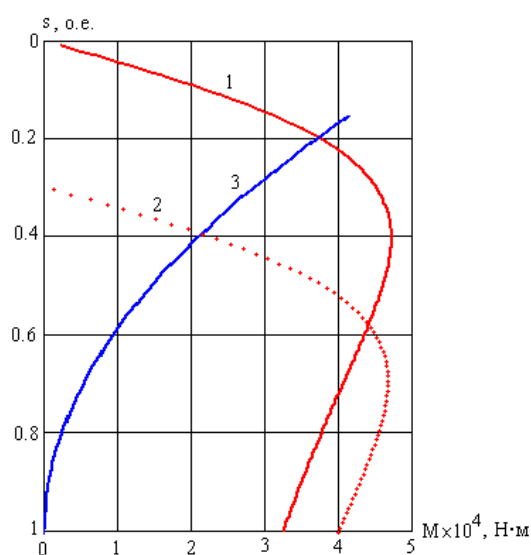


Рис. 8. Характеристики подруливающего устройства: механические: 1 – естественная; 2 – искусственная; 3 – механизма

В настоящее время вопросы экологической безопасности в мировой судоходной отрасли требуют большого внимания. В 2005 г. вступило в силу приложение VI к Международной конвенции по предотвращению загрязнения атмосферы (МАРПОЛ), принятое Международной морской организацией (ИМО) в 1997г. Этот документ обязывает судовладельцев или операторов провести мероприятия по сокращению вредных выбросов в атмосферу при эксплуатации морских транспортных судов. К вредным веществам относят окислы серы и азота, а также летучие органические соединения и

озоноразрушающие вещества (фреоны) [3, 4, 5]. Но из всего перечня нормирование выбросов установлено только для окислов серы и азота.

Для повышения энергоэффективности плавсредств различного водоизмещения, в 2010 г. в приложение было введено требование, выполнение которого напрямую связано с количеством используемого топлива и выбросами углекислого газа - CO_2 . Формально он не относится к загрязнителям, но является парниковым (ПГ), и контроль количества его выбросов подпадает под требования Рамочной конвенции ООН и Парижского соглашения об изменении климата. Протоколом установлено, что меры по снижению выбросов ПГ судами, занятыми в международной торговле, должны разрабатываться ИМО. В дальнейшем, ИМО планирует ввести ограничения на выбросы сажи и летучих органических веществ (летучих паров нефти и нефтепродуктов).

Количество выбросов окислов серы рекомендовано нормировать в соответствии с содержанием серы в топливе, а выбросы окислов азота – исходя из типа судового дизеля. При этом возникло предложение по установлению в ряде районов мирового океана более строгих ограничений, присвоив данным участкам статусы «Район контроля выбросов окислов серы» и/или «Район контроля выбросов окислов азота».

Правилами установлено, что допустимое содержание серы в топливе, используемом для судовых нужд, не должно превышать 3,5%. В районах контроля выбросов содержание серы в топливе не должно быть свыше 0,1 % (с 1 января 2015 г.), а до этой даты - 1,0 %. К таким районам на сегодня отнесены отдельные части акватории Балтийского, Северного и Карибского морей, а также Североамериканский регион [4]. К настоящему времени, правительство Японии также заявило о желании обладать таким статусом, применимым к своей акватории.

Следует отметить, что проблемы охраны окружающей среды все чаще фигурируют в государствах Евросоюза при принятии политических решений и используются в конкурентной борьбе с другими странами. Происходит навязывание не только новых стандартов по выбросам, но и оборудования для

очистки выхлопных газов от европейского производителя. Это делается не столько в целях защиты экологии, сколько для обеспечения специализированных предприятий стран Евросоюза рынка сбыта их экологического оборудования. Здесь сформировался крупнейший в мире рынок продукции «Экопрома». Этот комплекс отраслей с соответствующим технологическим и производственным потенциалом обеспечивает значительную часть (около 1 трлн. долл.) мирового оборота очистного и иного оборудования экологической направленности. Введение новых стандартов даст дополнительный толчок его развитию, но и увеличит себестоимость морских перевозок.

Правительства, власти портов, судовладельцы изучали возможные пути, чтобы решить вопрос уменьшения вредных выбросов во время нахождения судов у причала. Результатом изысканий стало присоединение находящихся на приколе судов к береговой сети (источнику бесконечной мощности). Существует вероятность, что практическое воплощение такого решения, поможет портовым властям и владельцам судов снизить вредные выбросы в районе порта, прилегающей к нему территории и акватории.

При этом следует принимать во внимание, что экологические характеристики электричества, вырабатываемого электростанциями на берегу по сравнению с двигателями судов, работающих на дизельном топливе, являются одним из основных преимуществ данной технологии. Также появляется возможность решить ряд проблем местного характера и снизить негативные показатели, возникающие от шума, загрязнения и вибрации, производимых пришвартованными плавсредствами.

Электроснабжение в порту, как правило, идентично электроснабжению промышленного предприятия (рис.9).

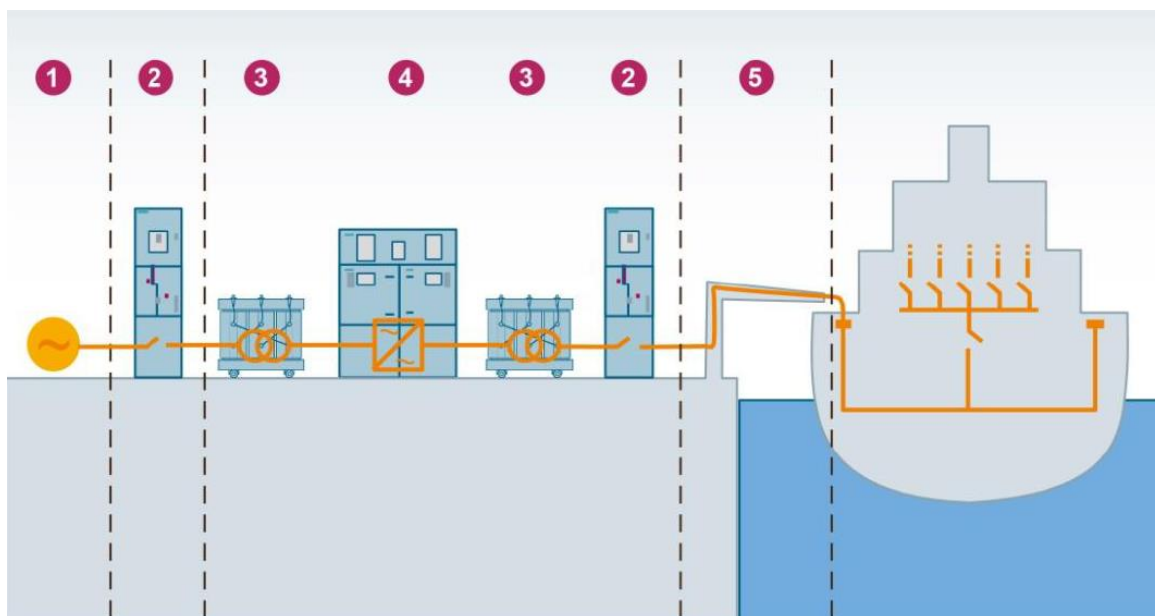


Рис.9. Общий вид электроснабжения судна от береговой электроэнергетической системы: 1 – генератор; 2 – высоковольтный выключатель; 3 – трансформатор; 4 – преобразователь частоты (50/60Гц) и система контроля SIPLINK (система преобразователя SIPLINK, адаптированная для сетевых решений, позволяющая соединять две или более сети переменного тока среднего напряжения с различными напряжениями, фазовыми углами и частотами); 5 – соединительный кабель

В связи с тем, что характеристики созданных морских судов разнятся в соответствии с требованиями различных классификационных обществ, это предполагает наличие на судне электрооборудования с частотой сети 50 или 60Гц, а также соответствующих уровней напряжений. Поэтому энергетические решения с использованием береговой инфраструктуры включают всю цепочку: трансформаторы, ПЧ для согласования уровней напряжений, частот судовой и береговой сети. Такой подход к решению проблемы позволяет осуществить одновременное подключение нескольких плавучих средств с частотой 50 и 60Гц независимо от частоты местной сети.

В зависимости от расположения портовых сооружений, централизованное решение с одним ПЧ может обслуживать множество судов, пришвартованных к причалам и пирсам. Кроме того, ПЧ улучшают общее качество электроэнергии, получаемой из портовой электрической сети. Это становится возможным при помощи повышения коэффициента мощности, стабилизации напряжения и

частоты. При отсутствии в береговой инфраструктуре ПЧ, можно воспользоваться данным судовым механизмом (рис.10).

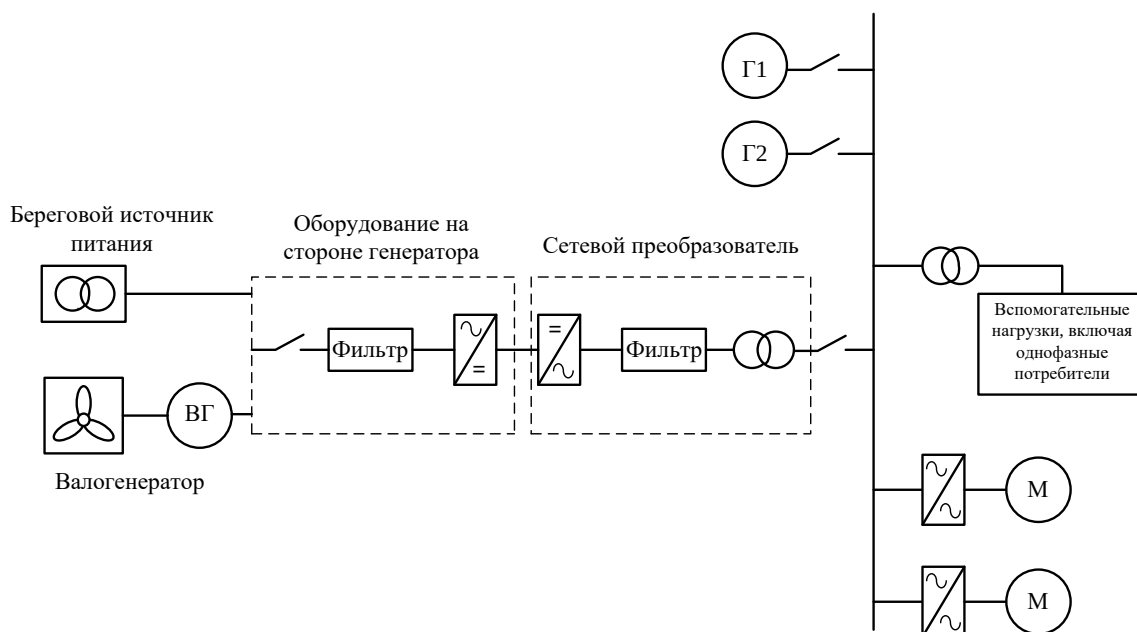


Рис. 10. Стандартизованные конфигурации для применения береговой сети и судового ПЧ

Подводя итог, можно сделать следующие выводы:

1. Учитывая, что ряд типовых электрических машин, используемых каждым судном для приведения в действие всех рассматриваемых узлов, механизмов и потребителей, примерно одинаковой мощности, их можно заменить одним преобразователем.

2. Для получения с берега электроэнергии, плавсредства должны быть оснащены оборудованием, позволяющим осуществлять соединение с портовой электросетью, синхронизирующим передачу энергии с берега на судно и подсоединяющим входящую электроэнергию к силовой сети вспомогательных механизмов судна. Данные работы проводятся исключительно во время постройки или капитальной модернизации плавсредства на верфях или судоремонтных заводах.

Список использованных источников

1. 'M' class container ship. Operating manual lindo new building L/216/ m/s «Mathilde Maersk» [Электронный ресурс]/ Odense Steel Shipyard Ltd. – 2008. – 561 p.

2. Труднев С.Ю., Рак А.Н. Электрическое движение на морских судах: [Электронный ресурс] // Новокузнецк: Издательство «Знание-М», 2022. – 1 электрон. опт. диск (CD-R) – Сист. требования: IBM PC, любой более 1GHz; 512 Мб RAM; 10 Мб HDD; MS Windows XP и выше; CD/DVD-ROM дисковод, мышь; Adobe Reader 8.0 и выше. – 350 с.
3. МАРПОЛ. Книга III, пересмотренное Приложение VI к МАРПОЛ «Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов», Издание ЗАО «ЦНИИМФ», 2012. [Электронный ресурс] – URL: <http://docs.cntrd.ru/document/499014496>. (дата обращения: 30.03.2020).
4. Руководство по применению положений Международной конвенции МАРПОЛ 73/78. НД №2-030101-026/ ФАУ «Российский морской регистр судоходства». Санкт-Петербург. – 2017. – 163 с.
5. Рак А.Н., Гутаревич В.О. Анализ эффективных систем для сокращения выбросов в атмосферу NO_x, SO_x и CO_x с морских судов // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития : Материалы Пятой международной научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский, 18–21 октября 2022 года. – Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет, 2022. – С. 108-112.

Rak A.N., candidate of technical Sciences, associated professor, Kamchatka State Technical University

Gutarevich V.O., doctor of technical Sciences, associated professor, Donetsk National Technical University.

EXPANDING THE FUNCTIONALITY OF MARINE HIGH-VOLTAGE FREQUENCY CONVERTERS

Abstract. The article deals with issues related to minimizing the number of frequency converters used to ensure the specified operating modes when controlling various ship mechanisms. It is shown that with equal power of electric motors used to drive the most powerful consumers, it is possible to implement different control models in one frequency converter.

Keywords: marine vessel, synchronous machine, generator, motor, asynchronous machine, frequency converter, coastal network