

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского»

На правах рукописи

МихВ

Миханшин Виктор Викторович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ  
СУДОВЫХ ПРОПУЛЬСИВНЫХ УСТАНОВОК**

2.4.2. – Электротехнические комплексы и системы  
(Технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Бурков А.Ф.,  
доктор технических наук, профессор

Владивосток – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	– 5
<b>1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОПУЛЬСИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ СУДОВ.....</b>	
1.1 Основные сведения о судовых пропульсивных комплексах.....	– 10
1.2 Главные двигатели судовых пропульсивных комплексов.....	– 14
1.3 Пропульсивные установки судов с гребными винтами регулируемого шага.....	– 16
1.3.1 Особенности пропульсивных установок судов с гребными винтами регулируемого шага.....	– 16
1.3.2 Режимы работы пропульсивных комплексов с винтами регулируемого шага.....	– 18
1.4 Пропульсивные комплексы судов с гребными электрическими установками.....	– 22
1.5 Особенности ПУ с ГЭУ малотоннажных судов.....	– 33
1.6 Выводы.....	– 35
<b>2 ОБЗОР И АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ВАРИАНТОВ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ГЭУ ПРОПУЛЬСИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ..</b>	
2.1 Общая характеристика ГЭУ судов.....	– 37
2.2 Научно-технические решения схем главного тока ГЭУ.....	– 40
2.2.1 Судовых ПК с ГЭУ постоянного тока.....	– 40
2.2.2 ГЭУ переменного тока судовых ПК.....	– 49
2.2.3 Судовых ПК с ГЭУ двойного рода тока.....	– 58
2.3 Основные варианты научно-технических решений СУ ГЭУ.....	– 64
2.4 Выводы.....	– 67
<b>3 РАЗВИТИЕ ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ СУДОВЫХ ПРОПУЛЬСИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ.....</b>	
3.1 Функциональная схема электротехнических комплексов ГЭУ.....	– 69
3.2 Разработка единой классификация судовых ГЭУ.....	– 72

3.2.1	Существующие классификации ГЭУ.....	– 72
3.2.2	Разработанная классификации ГЭУ.....	– 75
3.3	Развитие судовых пропульсивных комплексов, включающих гребные электрические установки.....	– 83
3.4	Выводы.....	– 98
4	<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ СУДОВЫХ КЭУ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ.....</b>	<b>– 100</b>
4.1	Общая характеристика теории подобия и моделирования применительно к судовым КЭУ.....	– 100
4.2	Моделирование ДГ судовых КЭУ.....	– 103
4.2.1	Математическая модель ГД при функционировании в составе КЭУ.....	– 103
4.2.2	Математическое моделирование электромеханических источников ЭЭ (генераторов).....	– 106
4.3	Анализ и моделирование статических источников ЭЭ (АБ).....	– 111
4.3.1	Анализ электрохимических источников энергии.....	– 111
4.3.2	Моделирование статических источников ЭЭ – аккумуляторов.....	– 118
4.4	Модели силовых ПП для аналитических исследований судовых КЭУ..	– 123
4.4.1	Модели силовых ПП основного канала КЭУ.....	– 125
4.4.2	Модель силового модуля импульсного ПП вспомогательного канала КЭУ.....	– 128
4.5	Математическое моделирование асинхронных ГЭД трехфазного переменного тока.....	– 129
4.6	Выводы.....	– 134
5	<b>АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИЛОВОГО КАНАЛА СУДОВЫХ КЭУ.....</b>	<b>– 136</b>
5.1	Аналитические исследования режимов работы основного силового канала КЭУ.....	– 136
5.2	Экспериментальные исследования режимов работы основного силового канала КЭУ.....	– 140

5.3 Результаты исследований режимов работы КЭУ и их сравнительный анализ.....	– 144
5.4 Экономическая эффективность от внедрения КЭУ.....	– 151
5.5 Экологическая эффективность от внедрения КЭУ.....	– 155
5.6 Выводы.....	– 157
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	– 159
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	– 162
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	– 166
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	– 179
П.1.1 Системы главных судовых передаточных устройств.....	– 179
П.1.1.1 Пропульсивные установки судов с «жесткими» механическими связями главных двигателей и гребных винтов...–	179
П.1.1.2 Пропульсивные установки судов с электрическими передачами..–	182
П.1.1.3 Судовые пропульсивные установки, включающие гидравлические и комбинированные передачи.....–	185
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	– 194
П.2.1 Использование ГЭУ на судах.....	– 194
П.2.2 Общие характеристики и характерные особенности ГЭУ.....	– 198
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	– 205
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	– 211
ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....	– 213
ПРИЛОЖЕНИЕ 6.....	– 215
ПРИЛОЖЕНИЕ 7.....	– 217
ПРИЛОЖЕНИЕ 8.....	– 219
ПРИЛОЖЕНИЕ 9.....	– 221

## ВВЕДЕНИЕ

Основные направления дальнейшего развития отечественного судостроения изложены в «Стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года» (Стратегии), утвержденной распоряжением Правительства от 08.12.2010 № 2205-р, которая направлена на укрепление позиций России в мировой морской отрасли, обусловленных повышением конкурентоспособности.

Дальнейший прогресс в сфере судовой электротехники во многом зависят от достижений науки и электротехнических решений.

Начало XXI в. характеризуется повышенным интересом и интенсивным развитием теории и практики судовых гребных электрических установок (ГЭУ).

Перспективы совершенства судовых ГЭУ неразрывно связаны с совершенствованием различных отраслей промышленного производства, основными направлениями развития морской отрасли. При этом актуальными являются вопросы, связанные с необходимостью улучшения экологической обстановки.

Принятый в 1997 г. «Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата» и действующие с 2005 г. «Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов» (Приложение VI «Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов» (МАРПОЛ)) направлены на принятие необходимых мер по уменьшению вредных загрязнений, включая окислы азота, серы и углекислого газа, выбрасываемые в окружающую среду главными и вспомогательными механизмами судов.

Характерной особенностью развития морской отрасли является большое многообразие научно-технических решений ГЭУ, которые относятся к наиболее мощным электротехническим комплексам судов, электрификация. Их электрификация оценивается преимущественно на основе установленной мощности главных электрических машин (ЭМ) и имеет ряд допущений.

Дальнейшее совершенствование ГЭУ диктует необходимость разработки более наглядной и универсальной функциональной схемы, приемлемой для различных судов с электродвижением.

К отдельной категории электроходов относятся малотоннажные суда (буксиры, катера, паромы и др.), характерной особенностью функционирования которых являются переходные и долевы режимы, в которых суда работают значительную часть общего времени эксплуатации. Увеличение удельного расхода топлива в первичных двигателях при ухудшении условий его сгорания сопровождается значительным повышением концентрации вредных веществ в выхлопных газах, уменьшая время эксплуатации элементов и ГЭУ в целом.

Исходя из изложенного, тема диссертационной работы, направленная на корректно обоснованные решения научно-технических задач по совершенствованию ГЭУ малотоннажных судов, как электротехнических пропульсивных установок (ПУ), с целью повышения их энергетической и экологической эффективности, является актуальной.

К основной цели настоящей диссертации относится совершенствование электротехнических комплексов ПУ малотоннажных судов, направленное на повышение энергетической и экологической эффективности ГЭУ на основании обзора и анализа основных вариантов судовых пропульсивных комплексов (ПК) и научно-технических решений основных ГЭУ эксплуатируемых судов-электроходов, модернизации с использованием элементов полупроводниковой техники, аналитических и экспериментальных исследований, сравнительных оценок.

Достижение поставленной цели предопределяет необходимость решения задач, связанных с разработкой: функциональной схемы электротехнических комплексов ГЭУ, обладающей приемлемой универсальностью, заключающейся в возможности ее использования для судов с электродвижением различного функционального назначения; классификации ГЭУ судов, включающей необходимый и достаточный диапазон классификационных признаков, наиболее полно отражающих особенности отдельных групп ГЭУ; способа управления комбинированной энергетической установкой (КЭУ), повышающего эффективность функционирования судовых ПК; математической модели КЭУ на основе компонентов предложенной схемы приемлемого варианта силовых каналов с целью их функционирования в составе электротехнического комплекса КЭУ; имитационной модели на

основе математических выражений для выполнения аналитических исследований необходимых режимов функционирования КЭУ, обусловленных технической реализацией предложенных решений, направленных на повышение эффективности функционирования судовых ПК. Кроме того, для оценки адекватности аналитических исследований представляется целесообразным выполнение необходимых экспериментальных исследований.

Настоящее диссертационное исследование выполнено на основе и с учетом имеющихся научно-технических результатов по тематике, полученных Вольдеком А. И., Китаенко Г. И., Копыловым И. П., Костенко М. П., Полонским В. И., Романовским В. В., Хайкиным А. Б. и др.

Научная новизна заключается в следующем: разработана функциональная схема электротехнических комплексов ГЭУ, обладающая приемлемой универсальностью, заключающейся в возможности ее использования для судов с электродвижением различного функционального назначения; предложена классификация ГЭУ судов, отличающаяся от известных необходимым и достаточным диапазоном классификационных признаков, наиболее полно отражающих особенности отдельных групп ГЭУ; разработан способ управления КЭУ, повышающий энергетическую и экологическую эффективность функционирования судовых ПК, защищенный патентом на изобретение.

К практической значимости работы относятся: полученные впервые по результатам выполненного ретроспективного анализа и оценки современного состояния и перспектив развития судов Дальневосточного бассейна приемлемые для исследований варианты ГЭУ; определенные впервые с использованием функций алгебры логики (ФАЛ) и результатов анализа основных научно-технических решений схем главного тока ГЭУ, целесообразные для применения варианты ПК судов; предложенная экспериментальная установка, позволяющая выполнять физическое моделирование режимов работы КЭУ.

Методология исследований при выполнении диссертационной работы обусловлена применением для решения сформулированных задач электротехнических

и электромеханических теорий (электрических цепей, электрических машин), ФАЛ, методов математического, имитационного и физического моделирования.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту: функциональная схема электротехнических комплексов ГЭУ, обладающая приемлемой универсальностью, заключающейся в возможности ее использования для судов с электродвижением различного функционального назначения; классификация ГЭУ судов, отличающаяся от известных необходимым и достаточным диапазоном классификационных признаков, наиболее полно отражающих особенности отдельных групп ГЭУ; способ управления КЭУ, повышающий эффективность функционирования судовых ПК, защищенный патентами на изобретение.

Достоверность и апробация результатов подтверждена полученными результатами аналитических и экспериментальных исследований, их сравнительным анализом, наличием патентов, внедрением результатов работы.

Основные положения и результаты работы представлены и обсуждались на: X международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Интеллектуальный потенциал ВУЗов – на развитие Дальневосточного региона России», г. Владивосток, 2008 г.; Восьмой международной научно-практической конференции «Проблемы транспорта Дальнего Востока», г. Владивосток, 2009 г.; Международных научных чтениях «Приморские зори-2009», г. Владивосток, 2009 г.; Международной конференции, посвященной 200-летию подготовки кадров для водного транспорта России «Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление», г. Санкт-Петербург, 2009 г.; XVI международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 2010 г.; 60-й международной молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Наука. Инновации», г. Владивосток, 2012 г. и др.

К реализации результатов исследований относятся: используемая в научном и учебном процессах в Дальневосточном государственном техническом рыбохозяйственном университете, Дальневосточном федеральном университете и МГУ им. адм. Г. И. Невельского (г. Владивосток) разработанная функциональная схема



электротехнических комплексов судовых ГЭУ и предложенная единая классификация судовых ГЭУ.

Работа в полном объеме докладывалась на совместном заседании кафедр «Теоретические основы электротехники» и «Электрооборудование и автоматика судов» МГУ им. адм. Г. И. Невельского.

Содержание работы отражено в 23 основных публикациях (научных статьях, патентах и докладах на конференциях) в том числе: 4-х статьях в рецензируемых научных журналах перечня ВАК, 2-х публикациях в изданиях базы данных Scopus, одной монографии, 3-х патентах на изобретения.

# 1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОПУЛЬСИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ СУДОВ

## 1.1 Основные сведения о судовых пропульсивных комплексах

Характерной особенностью современных судовых ПК, представляющих собой гидромеханические системы, включающие корпус судна и пропульсивную установку, в которой энергия рабочего тела преобразуется в упор, сообщающий движение корпусу судна [1], является их большое конструкционное многообразие и широкий диапазон мощностей.

Научной основой для решения комплексной задачи энергоэффективности судов при их проектировании может быть принято представление о судовом ПК как о системном объекте [2].

Системная модель судового ПК, учитывающая основные взаимосвязи и взаимодействия между элементами, предложена, в частности, в [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{ГД}(n_{ГД}) \Leftrightarrow (N_{ГД}(n_{ГД})\eta_n\eta_{\text{вн}} = N_{ГВ}(n_{ГВ})); \\ \left( N_{ГВ}(n_{ГВ}) = \frac{P_{ГВ}(v_p n_{ГВ})v_p}{\eta_{ГВ}} \right) \Leftrightarrow \left( \frac{P_{ГВe}(v_c n_{ГВ})v_c}{\eta_{np}} = \frac{R_{\text{с}}(v_c)v_c}{z\eta_{np}} \right). \end{array} \right. \quad (1.1)$$

В (1.1)  $N_{ГД}$ ,  $n_{ГД}$  – мощность и частота вращения главного двигателя (ГД);  $\eta_n$  – коэффициент полезного действия (КПД) передачи;  $\eta_{\text{вн}}$  – КПД валопровода;  $N_{ГВ}$ ,  $n_{ГВ}$  – мощность на гребном винте (ГВ) и частота его вращения;  $P_{ГВ}$  – упор ГВ;  $v_p$  – скорость воды в диске ГВ;  $\eta_{ГВ}$  – КПД ГВ;  $P_{ГВe}$  – полезная тяга ГВ;  $v_c$  – скорость судна;  $\eta_{np}$  – пропульсивный коэффициент ( $\eta_{np} = \eta_{ГВ}\eta_{\text{кв}}$ ;  $\eta_{\text{кв}}$  – коэффициент, учитывающий влияние корпуса судна на КПД ГВ);  $R_{\text{с}}$  – сопротивление воды движению судна;  $z$  – число ГВ.

Судовые ПУ, входящие в состав ПК, являются исполнительными частями главных энергетических установок. В наиболее общем случае ПУ состоит из движителей (ГВ фиксированного или регулируемого шага), валопроводов, главных судовых передач и ГД.

По принципу действия движители подразделяются на активные, создающие упор за счет изменения скоростей внешних сред (паруса, роторы Флеттнера и др.), и реактивные, упор которых создается за счет отбрасывания струй сред (воды, воздуха и пр.) [4].

Наиболее широкое распространение в настоящее время получили реактивные движители, действие которых не зависит от внешних условий (ГВ, гребные колеса, крыльчатые и водометные движители).

Взаимодействие элементов ПК может включать различные виды прямых и обратных связей: механических (например, между главной передачей, валопроводом и ГВ), гидродинамических (между ГВ и корпусом судна) и др. Эти связи, как правило, имеют достаточно сложные закономерности и существенно зависят от условий плавания (волнения, встречного или бокового ветра, ледовой обстановки, режимов буксировок и т. д.).

ГВ являются эффективными современными судовыми движителями, преобразующими подводимую к ним от ГД механическую энергию в упор и полезную тягу, которые передаются через главные упорные подшипники корпусу судна, обеспечивая его движение по курсу с заданной скоростью.

На рисунке 1.1 приведены статические универсальные механические характеристики ГВ  $M_{ГВ}^* = f(n_{ГВ}^*)$  для основных режимов работы судовых ПК, где  $M_{ГВ}$  – статический момент сопротивления ГВ [5]. Зависимость 1 (рисунок 1.1) соответствует работе ГВ в чистой воде, 2 – в швартовных режимах, 3 – в режимах реверса.

Статическая зависимость момента сопротивления  $M_{ГВ}$  ГВ от его частоты вращения  $n_{ГВ}$  при переднем ходе судна имеет форму квадратичной параболы (рисунок 1.1) и подчиняется выражению

$$M_{ГВ} = k_1 n_{ГВ}^2, \quad (1.2)$$

где  $k_1$  – коэффициент пропорциональности.

Поглощаемая винтом мощность  $N_{ГВ}$  при известных условиях подчиняется закону кубической параболы:

$$N_{ГВ} = k_2 M_{ГВ} n_{ГВ} = k_1 k_2 n_{ГВ}^3, \quad (1.3)$$

где  $k_2$  – коэффициент пропорциональности.

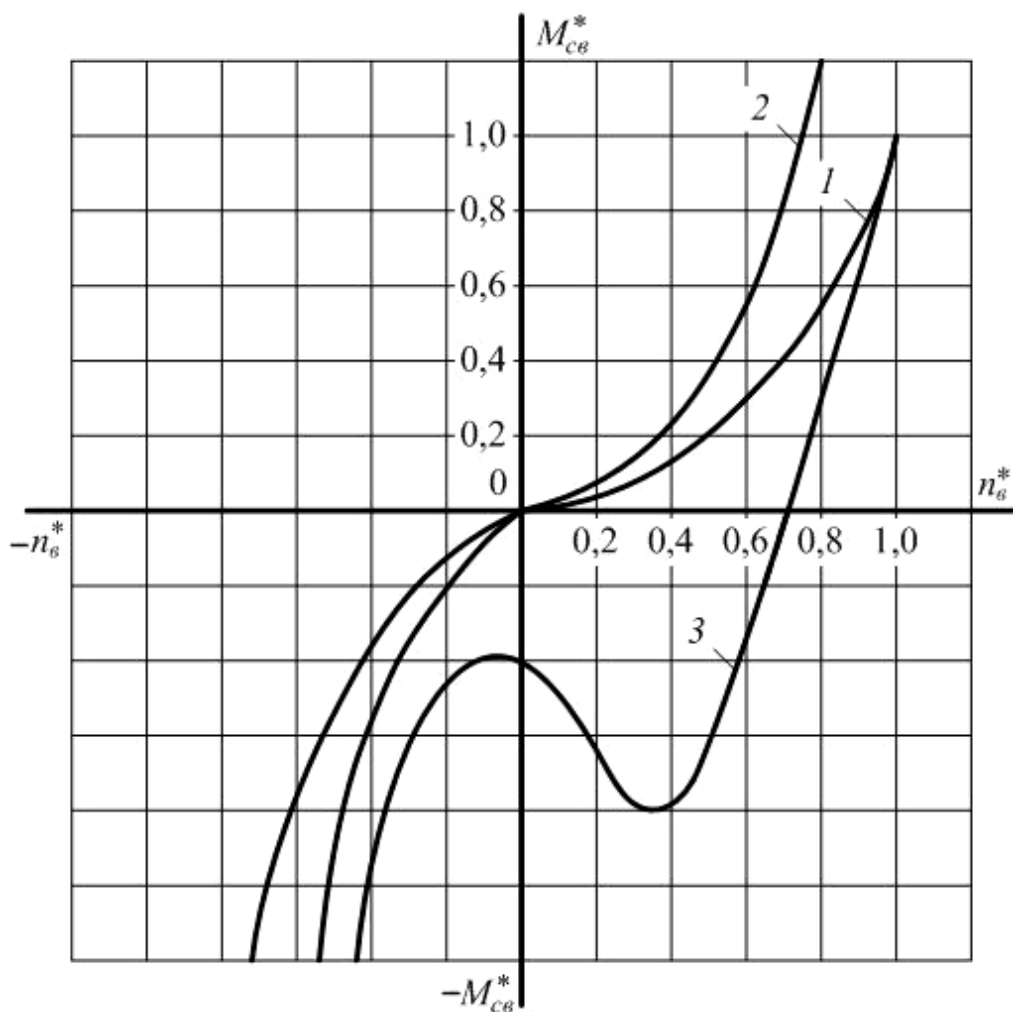


Рисунок 1.1 – Статические универсальные механические характеристики судовых ГВ

$$M_{ce}^* = f(n_e^*) \text{ для основных режимов работы ПК } (n_e^* \rightarrow n_{ГВ}^*; M_{ce}^* \rightarrow M_{ГВ}^*)$$

КПД современных судовых ГВ достигает 80 %, диаметр – до 10 м, а масса – ориентировочно 70 т [6]. ГВ не предъявляют обособленных требований к обводам и основным размерностям корпусов судов и органично сочетаются с ГД, оси вращения валов которых в большинстве случаев, как и оси вращения винтов, являются горизонтальными.

Конструктивно ГВ имеют фиксированный шаг (винты фиксированного шага (ВФШ)) или регулируемый (винты регулируемого шага (ВРШ)).

В отличие от ВФШ ВРШ обеспечивают реверс судна при нереверсивных ГД и позволяют более эффективно использовать мощности ГД в различных условиях плавания. В случае применения ВРШ в состав ПУ судна дополнительно входит механизм изменения шага винта.

На судах относительно малого водоизмещения (прибрежного плавания, портовых буксирах и некоторых других) иногда применяют водометные движители, а на сравнительно небольших скоростных судах с динамическими принципами поддержания их на плаву (на подводных крыльях и на воздушных подушках) – воздушные винты и реактивные устройства (сопла).

Для согласования частот вращения ГД и ГВ ( $n_{ГД}$  и  $n_{ГВ}$ , соответственно) применяются главные передачи с передаточным числом  $i_n$

$$i_{nj} = n_{ГДj} / n_{ГВj}, \quad (1.4)$$

где  $j$  – порядковый номер ПУ судна.

Главные судовые передачи, входящие в состав ПУ судов, в зависимости от трансформации вращающих моментов и преобразования видов энергий подразделяются на следующие группы: прямые (непосредственные), с  $i_n = 1$ ; механические (редукторные), имеющие  $i_n > 1$ ; электрические (с использованием различных электрических машин), у которых  $i_n = \text{var}$ ; гидравлические (основанные на гидродинамических и гидростатических принципах), с  $i_n = \text{var}$ ; комбинированные (сочетающие разные типы передач).

В современном судостроении выбор типа ПУ осуществляется с учетом предъявляемых требований, к которым в первую очередь относится высокая надежность, повышенная экономичность и ресурс, необходимая скорость судна, высокая энергоэффективность. Происходит переход от частных случаев повышения КПД отдельных элементов к интегральной оценке всех аспектов влияния на энергетические показатели судна.

Одной из основных целей технических решений в настоящее время является улучшение энергетической эффективности строящихся судов путем внедрения требований по конструктивному индексу  $\text{CO}_2$ , характеризующему выброс с судов в атмосферу основного из парниковых газов – диоксида углерода.

Основные системы главных судовых передаточных устройств приведены в приложении 1.

## 1.2 Главные двигатели судовых пропульсивных комплексов

В настоящее время к основным ГД судовых ПК относятся газотурбинные, дизельные, паротурбинные и ядерные установки.

Использование в качестве ГД судовых ПУ газовых или паровых турбин с паровыми котлами целесообразно при условиях необходимости относительно высоких значений мощностей, ограниченных размеров машинных отделений (МО), где устанавливаются ГД. Для газовых турбин в качестве ГД требуется минимальный занимаемый ими объем судового пространства, но требуется высококачественное и относительно дорогое топливо при его большом удельном расходе.

На судах гражданского флота отечественной и зарубежной постройки наибольшее распространение получили малооборотные дизельные судовые установки, к основным достоинствам которых следует отнести их относительно высокую экономичность, обусловленную низким удельным расходом сравнительно дешевого дизельного топлива, высокие значения КПД ресурса установок. При ограниченных объемах МО целесообразно использование среднеоборотных главных дизелей, размеры которых значительно меньше, однако для передачи их мощностей на ГВ, необходимо наличие дополнительных передаточных устройств (редукторов, муфт и др.).

К перспективным направлениям развития судовых ГД следует отнести атомные силовые установки на основании их очевидных преимуществ [13]. Определенные недостатки атомных ПК обусловлены сравнительно большими удельными массами ПУ, низкими значениями КПД, необходимостями утилизации отработанного ядерного топлива. Кроме того, суда с атомными силовыми установками представляют собой объекты повышенной экологической опасности.

Техническое совершенство ПК определяется их способностью преобразовывать механическую энергию ГД в движение судов с наименьшими потерями независимо от условий их плавания. Основным показателем при этом является КПД судовых ПУ.

Реальные условия плавания судов могут изменяться в широких диапазонах, существенно отклоняясь от номинальных и других режимов расчетных винтовых характеристик. Однако при этом существуют двоякого рода ограничения:

- естественные, определяемые конструктивными параметрами судов, их пропульсивными установками и возможными изменениями условий плавания;
- специально предусмотренные в установках ограничительные устройства для защиты двигателей от выхода на неблагоприятные и аварийные режимы.

Область рабочих режимов ГД, связанная с изменениями внешних условий, ограничивается винтовыми характеристиками: «тяжелой» и «легкой» [7, 8].

В качестве наиболее «тяжелой» может быть принята швартовная характеристика, соответствующая работе двигателей при неподвижном судне: во время швартовных испытаний и в условиях, когда судно застряло во льдах или село на мель. В качестве «легкой» принимается винтовая характеристика порожнего судна. Область рабочих режимов между указанными характеристиками является областью возможных рабочих режимов ГД (рисунок 1.2).

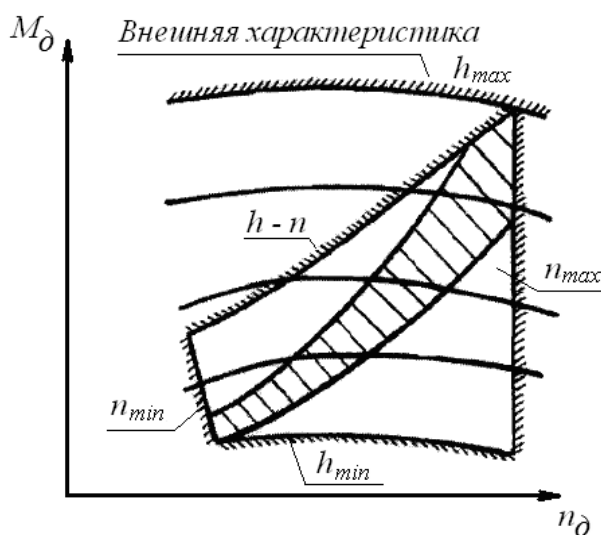


Рисунок 1.2 – Область возможных рабочих режимов ГД в системе координат  $n_{ГД}$  ( $n_{\partial}$ ),  $M_{ГД}$  ( $M_{\partial}$ ) [8]

Область рабочих режимов, ограниченная характеристиками, обеспеченными специальными ограничительными устройствами, является областью допустимых режимов работы двигателя ПК. Эти ограничения осуществляются по следующим параметрам:

- максимально допустимой топливоподаче  $h_{ГД\max}$  ГД, которая обеспечивает защиту от перегрузки;
- максимально допустимой частоте вращения  $n_{ГД\max}$  ГД, обеспечивающей защиту от разноса;
- минимально допустимой топливоподаче  $h_{ГД\min}$  ГД, которая обеспечивает защиту от самопроизвольной остановки двигателя;
- минимально допустимой частоте вращения  $n_{ГД\min}$  ГД, обеспечивающей защиту от самопроизвольной остановки двигателя;
- нормальным соотношением между топливоподачей и частотой вращения ГД ( $x_{ГДрн} / n_{ГД}$ ), а также топливоподачей и количеством воздуха, подаваемого в двигатель ( $x_{ГДрн} / p_{ГДв}$ ) ( $x_{ГДрн}$  – положение рейки топливных насосов, которое обуславливает количество подаваемого в двигатель топлива).

### **1.3 Пропульсивные установки судов с гребными винтами регулируемого шага**

#### **1.3.1 Особенности пропульсивных установок судов с гребными винтами регулируемого шага**

Для расширения рабочих областей ГД применяются ВРШ (п. 1.1). Возможности дополнительного изменения нагрузок ГД путем воздействия на шаг ГВ значительно расширяет область эксплуатационных режимов, улучшает использование мощностей и маневренные качества судов, компенсирует влияние внешних факторов на характеристики винтов и исключает режимы работы в областях «тяжелых» винтов, при которых ГД не могут развивать номинальные мощности.

На рисунке 1.3 приведены сравнительные характеристики рабочих областей ГД с ВФШ и ВРШ [14].



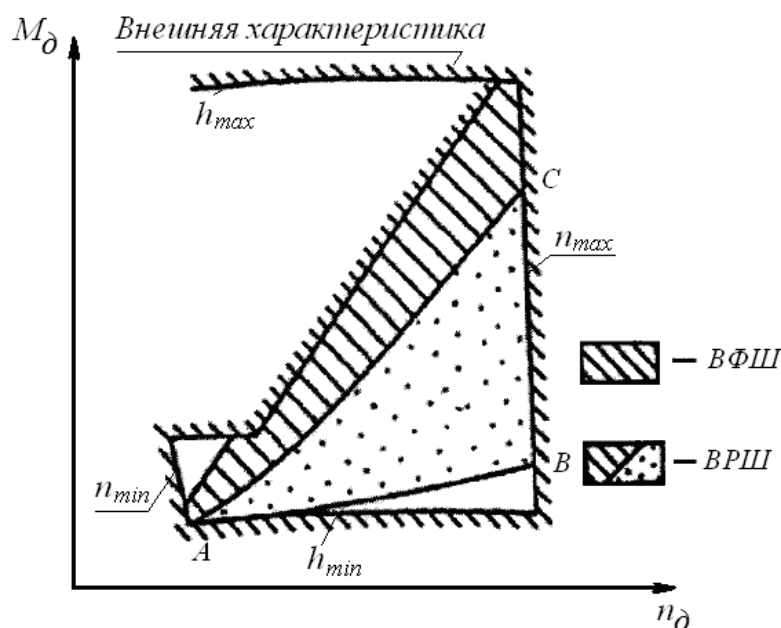


Рисунок 1.3 – Сравнительные характеристики рабочих областей главных дизельных энергоустановок с ВФШ и ВРШ ( $n_{\delta} \rightarrow n_{ГД}$ ;  $M_{\delta} \rightarrow M_{ГД}$ )

Эти основные обстоятельства выдвигают ряд специфических требований к системам управления и защиты, к формированию режимов работы. Диапазон возможного смещения винтовых характеристик при изменении шага винта значительно превышает диапазон их смещения, вызываемого изменением внешних условий, а также изменением загрузки судна, состояния корпуса и пропульсивной установки. Поэтому изменения режимов в нежелательном направлении, вызванные этими факторами, как правило, могут быть скомпенсированы изменением шага и частоты вращения винта.

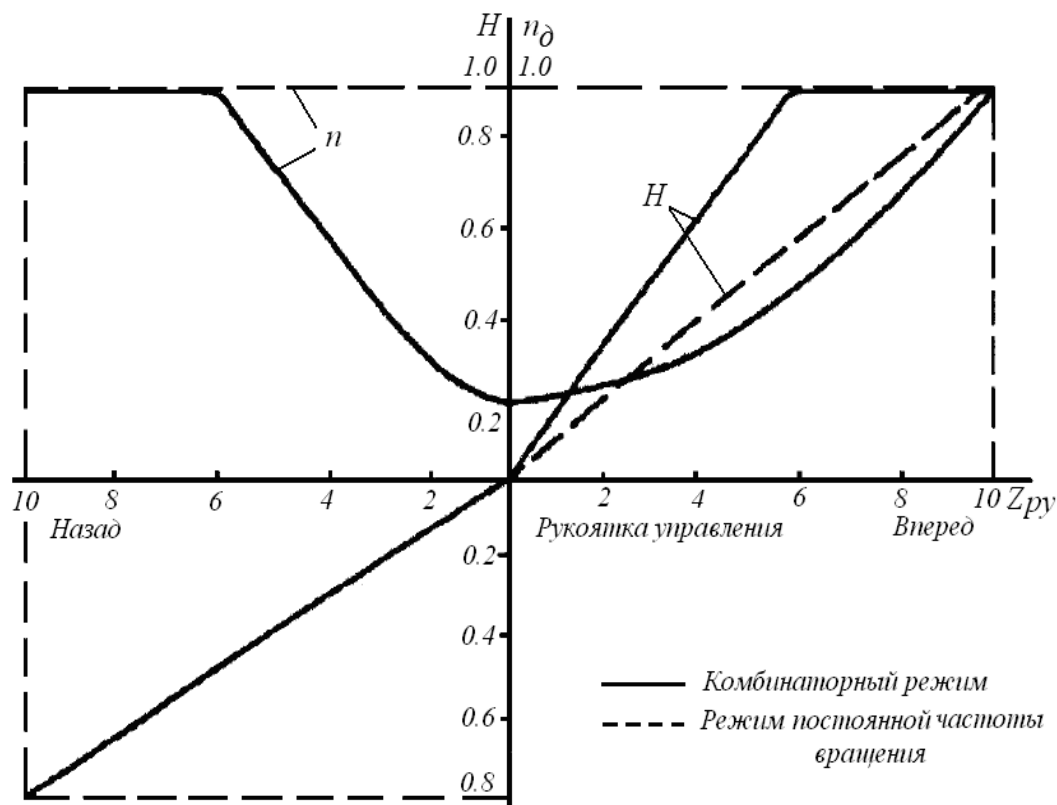
Возможность задания требуемого режима с помощью двух независимых параметров (шага и частоты вращения ГВ) существенно расширяет возможности пропульсивной установки, так как при этом могут быть обеспечены работа двигателя по любой регуляторной, винтовой и ограничительной характеристике и сохранение оптимального режима при изменении внешних условий. Кроме того, установки ВРШ позволяют: осуществлять реверс при неизменном направлении вращения коленчатого вала двигателя (применять нереверсивные ГД); производить пуск двигателей в режиме холостого хода; начинать движение судов с места при номинальной мощности и частоте вращения коленчатых валов ГД, а, следова-

тельно, с максимальной тягой ГВ без каких-либо перегрузок ГД при более плавном и быстром чем у судов с ВФШ повышении скорости; достигать любой скорости судна, и даже его остановки при номинальной частоте вращения коленчатого вала ГД, что исключается при ВФШ.

Таким образом, использование гребных ВРШ позволяет значительно улучшить маневренные качества судов и повысить в целом эффективность их эксплуатационных характеристик.

### 1.3.2 Режимы работы пропульсивных комплексов с винтами регулируемого шага

Работа ГД на ВРШ имеет характерные особенности. В таких установках предусматриваются, как правило, два способа управления (рисунок 1.4): комбинаторный (комбинированный) режим и режим управления при постоянной (номинальной) частоте вращения [9, 11].



$H \rightarrow H_{ГВ}$  – шаг ГВ

Рисунок 1.4 – Режимы управления установкой с ВРШ [14] ( $Z_{ру} \rightarrow h_{ГД}$ ;  $n_{\partial} \rightarrow n_{ГД}$ ;  $M_{\partial} \rightarrow M_{ГД}$ )

При комбинаторном режиме управления изменение ходового режима судна осуществляется одновременным изменением шага винта  $H$  и частоты вращения двигателя  $n_{ГД}$  в соответствии с программой задания  $H/D_{ГВ}$  и  $n_{ГД}$  ( $D_{ГВ}$  – диаметр ГВ).

При управлении в режиме постоянной частоты вращения гребного вала скорость судна задается только шагом винта [13].

Каждый из представленных способов управления скоростью движения судна имеет свои достоинства и недостатки. При управлении в режиме постоянной частоты вращения возможно применение ВГ, с помощью которых можно производить отбор мощности от ГД в частичных (долевых) режимах работы. Но при этом не представляется возможным обеспечить оптимизацию работы установки на различных режимах. При комбинаторном управлении создается противоположная ситуация: возможна оптимизация работы установки, но ВГ должны быть отключены [14].

При работе ГД в условиях стационарных режимов полного хода судна выполняется условие  $n_{ГД} = \text{const}$ . На переменных ходах повышенную экономичность обеспечивает задание режимов по комбинированной схеме [15].

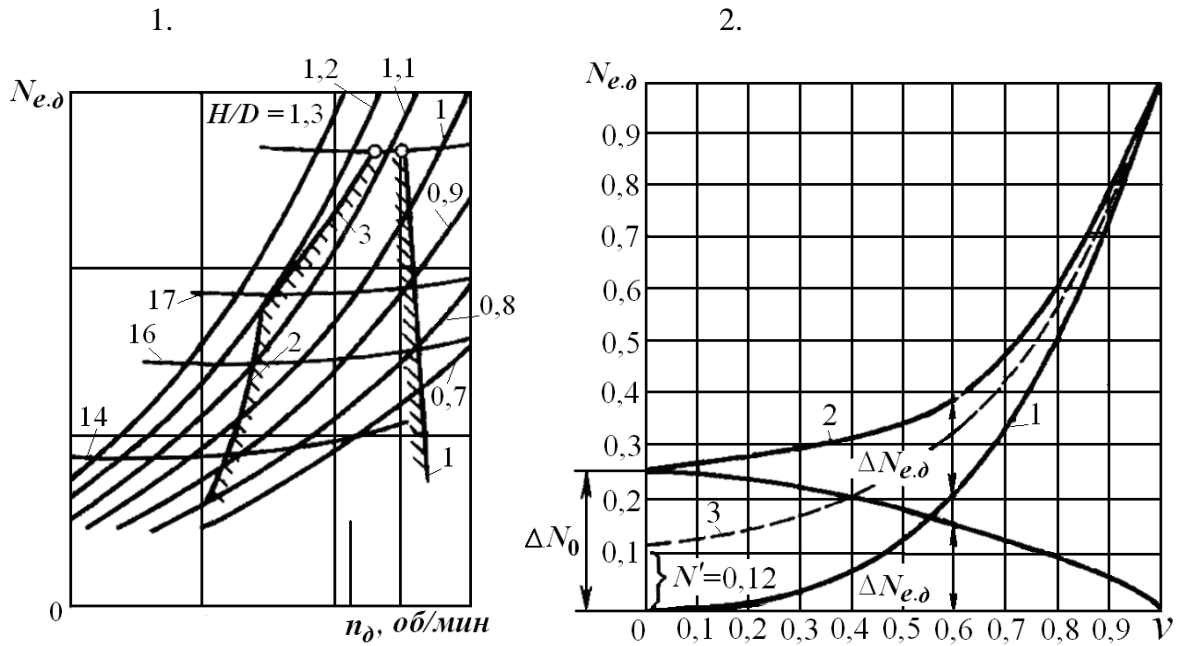
Анализ ПК в ходовых режимах тесно связан с использованием безразмерной величины  $\lambda_p$  – относительной поступи ГВ, которая в общем случае определяется как [4]

$$\lambda_p = \frac{v_{ГВ}}{D_{ГВ} n_{ГД}}, \quad (1.5)$$

где  $v_{ГВ}$  – поступательная скорость ГВ.

При оценке эффективности ПК с ВРШ необходимо учитывать, что вследствие зависимости гидродинамических характеристик ВРШ от изменения шага на долевых режимах не выполняется условие  $\lambda_p = \text{const}$ , и в отличие от ВФШ при  $H_{ГВ} / D_{ГВ} < (H_{ГВ} / D_{ГВ})_0$  КПД ГВ  $\eta_{ГВ}$  и пропульсивный КПД  $\eta_{пр}$  уменьшаются.

На рисунке 1.5 изображены зависимости эффективной мощности  $N_{ГДе}$  ГД от типа винта и варианта управления [1], где  $\Delta N_{e,d}$  – разность развиваемых ГД мощностей при его работе на ВРШ и ВФШ, соответственно (рисунок 1.5.2).



1 – диаграммы «эффективная мощность на валу  $N_{ГДе}$  ( $N_{e,d}$ ) – частота вращения  $n_{ГД}$  ( $n_d$ )» ПК с ВРШ; 2 – характеристики  $N_{ГДе}$  ( $N_{e,d}$ ) =  $f(v_{ГВ}(v))$  (1 – ВФШ; 2 – ВРШ при  $n_{ГВ} = \text{const}$ ; 3 – ВРШ при комбинаторном управлении)

Рисунок 1.5 – Зависимости эффективной мощности  $N_{ГДе}$  ( $N_{e,d}$ ) ГД от типа винта и варианта управления

Повышенные гидродинамические потери при скоростях хода судна  $v_c < v_{сн}$ , ( $v_{сн}$  – номинальная скорость судна) вызывают увеличение мощности и расхода топлива ГД. Наибольшее снижение отношения  $H_{ГВ}/D_{ГВ}$ , КПД винта и увеличение мощности по сравнению с ВФШ будет на режимах  $n_{ГВ} = \text{const}$  (при  $v_c = 0$  мощность нулевого упора  $P_{ГВ0}$  составляет 0,25...0,30 от номинального). На режимах комбинированного задания частоты и шага потери на ВРШ и затраты мощности уменьшаются (при  $v_c = 0$   $P_{ГВ0} = 0,12...0,15$ ) [1].

Для повышения экономических показателей в диапазоне режимов полного хода иногда предусматривается сохранение шага лопастей. Следовательно, на участке  $H_{ГВ}/D_{ГВ} = \text{const}$  ВРШ работает по характеристике

$$N_{ГДе} = k_n n_{ГВ}^3, \quad (1.6)$$

где  $k_n$  – коэффициент пропорциональности.

Дополнительные потери при этом, согласно [2], практически исключаются.

Разности мощностей  $\Delta N_{e,d}$  (рисунок 1.10.2) представляются выражением

$$\Delta N_{e.d} = (N_{ГДe})_{ВРШ} - (N_{ГДe})_{ВФШ}, \quad (1.7)$$

где  $(N_{e.d})_{ВРШ}$ ,  $(N_{e.d})_{ВФШ}$  – эффективная мощность на валу ГД при его работе на ВРШ и ВФШ, соответственно, в функции скорости судна можно аппроксимировать уравнением параболы

$$\Delta N_{e.d} = \Delta N_0 (1 - v_c^2), \quad (1.8)$$

где  $\Delta N_0$  – разность мощностей, развиваемых ГД при работе на ВРШ при  $n_{ГВ} = \text{const}$  и ВФШ при неподвижном судне (мощность нулевого упора).

Зависимость  $\Delta N_{e.d} = f(v_c)$  может быть представлена в следующем виде:

$$(N_{ГДe})_{ВРШ} = (N_{ГДe})_{ВФШ} + \Delta N_{e.d} = k_3 v_c^3 + P(1 - v_c^2), \quad (1.9)$$

где  $k_3$  – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, ВРШ позволяют более эффективно решать задачи обеспечения экономичности работы судовых энергоустановок, определяемой их КПД.

При постоянной скорости судна ( $v_c = \text{const}$ ) по мере увеличения шага винта  $H_{ГВ}$  и уменьшения частоты вращения  $n_{ГВ}$  повышается КПД пропульсивной установки, достигая наибольшего значения при конструктивном шаге вблизи ограничительной характеристики. Пропульсивный КПД  $\eta_{np}$  и КПД винта  $\eta_{ГВ}$  (п. 1.1) также возрастают при увеличении скорости судна  $v_c$ . Таким образом, наиболее экономичные и предельно допустимые режимы, как правило, относительно близки друг к другу. Это обстоятельство облегчает поиск оптимальных режимов, но даже небольшое отклонение в сторону «утяжеления» условий плавания выводит установку на границу предельно допустимых режимов.

Для судов, работающих с частыми переходными и маневренными режимами, характерно наличие в нагрузочной диаграмме ГД непродолжительных участков, составляющих единицы или десятки минут, в которых энергоустановка работает практически в режиме холостого хода. В таких режимах установка ВРШ не позволяет обеспечить ГД номинальной нагрузкой. Так как мощность ВГ составляет примерно 10 % от мощности ГД, то с его помощью обеспечить номинальную нагрузку ГД в таких режимах не представляется возможным.

К основным недостаткам ВРШ относится их высокая стоимость, превышающая в три и более раз стоимость ВФШ, и относительно меньшая надежность.

## 1.4 Пропульсивные комплексы судов с гребными электрическими установками

Исходя из выполненного анализа ПК судов, представляется целесообразным более детальное исследование вопросов, связанных с использованием ПУ, включающих ГЭУ на малотоннажных судах, используемых, как правило, для прибрежного и внутривортового плавания.

Суда различного назначения (ледоколы, рефрижераторы, танкеры и др.), оснащенные ПУ системы «ГД–ГГ–ГЭД–ГВ» представляют собой электроходы, схемы главного тока, возбуждения, защиты и др. которых отличаются определенным многообразием и включают, в том числе, главные ВРК и крыльчатые движители.

ПУ с ГЭУ (п. 1.2) применяются на судах морского торгового, промыслового, технического и вспомогательного, а также речного флота благодаря ряду достоинств, к основным из которых относятся [16]: возможность выбора оптимальных параметров ПД и судовых движителей; применение относительно легких быстроходных нереверсивных ПД; повышенная надежность и живучесть СЭУ, обусловленная дроблением ее на отдельные агрегаты; экономичность ГЭУ в частичных (долевых) режимах по сравнению с установками с прямой передачей энергии от ПД к гребным валам; возможность создания на судне единых ЭЭС; улучшенные маневренные и тяговые качества судов; хорошие экологические показатели работы энергетической установки; относительная быстрота реверса.

К недостаткам судовых ГЭУ следует отнести их высокую стоимость, меньшую экономичность на полном ходу по сравнению с прямой передачей энергии на ГВ, повышенные эксплуатационные расходы, включая большее количество штатного персонала, обслуживающего установку.

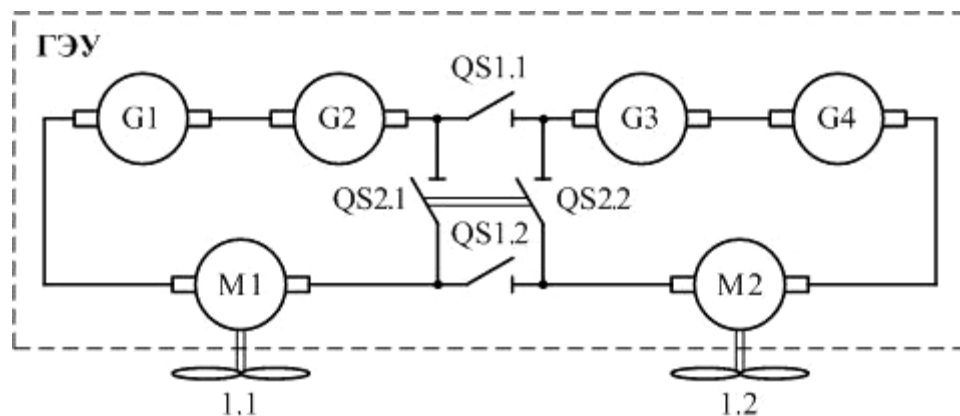
Электродвижение используется на буксирах, паромах, круизных судах, рефрижераторах, кабелеукладчиках, плавкранах, судах научно исследовательского флота, ледоколах и др. (приложение П.1.1). Диапазон мощностей главных энергетических установок ГЭУ лежит в ориентировочных пределах от десятков кВт (у нефтемусоросборщиков) до МВт (у ледоколов) [17, 18].

По роду тока схемы главного тока ГЭУ в настоящее время классифицируются следующим образом: постоянного тока; переменного тока; двойного рода тока.

В дизель-электрических гребных установках (ДЭГУ) постоянного тока используются все главные ЭМ (генераторы и двигатели) постоянного тока. Несмотря на то, что установки постоянного тока вследствие их невысокой надежности считаются устаревшими, большинство электроходов в России работают на постоянном токе. Питание ГЭД в ДЭГУ постоянного тока производится по системе «генератор – двигатель» (Г–Д), обеспечивающей широкое и плавное регулирование частоты вращения ГВ при неизменной частоте вращения ПД.

В ГЭУ постоянного тока существует большое разнообразие решений относительно схем главного тока, обусловленное тем фактором, что на судне, как правило, используется несколько ГГ и может быть установлено от одного до трех одно- или двухъякорных ГЭД [19], которые могут быть соединены между собой последовательно или параллельно. При отключении части работающих генераторов их ПД получают долевые режимы работы ГЭУ. Количество отключаемых ПД определяется исходя из условия, чтобы оставшиеся в работе машины были загружены номинальной или близкой к этому значению мощностью.

На рисунке 1.6 изображен пример схемы главной цепи ГЭУ постоянного тока.



G1...G4 – ГГ; M1, M2 – одноякорные ГЭД; 1.1, 1.2 – ГВ

Рисунок 1.6 – Пример схемы главного тока ГЭУ постоянного тока [20]

При замкнутых контактах 1 и 2 разъединителя QS1 и одновременно разомкнутых контактах 1 и 2 разъединителя QS2 формируется одноконтурная схема

главного тока ГЭУ, а при разомкнутых контактах 1 и 2 разъединителя QS1 и разомкнутых контактах 1 и 2 разъединителя QS2 обеспечивается раздельная работа двух контуров установки (двухконтурная схема главного тока ГЭУ).

Основным недостатком описанного выше способа регулировки степени загрузки ГД является то, что он применим только для судов с мощными ГЭУ, в которых установлено несколько (не менее трех) ПД, как правило, дизелей.

ПУ с ГЭУ постоянного тока установлены в частности на приемно-транспортных рефрижераторах типа «Сибирь» проекта 569А (СССР, 1962 г.), килекторных судах проекта 419 (ГДР, 1965 г.), накатных пассажирских паромов отечественной постройки типа «Сахалин» проекта 1809 (1973 г.), ледоколах типа «Ермак» проекта Р-1039 (Финляндия, 1974 г.), морских спасательных буксирах типа «Напористый» проекта 1454 (СССР, 1974 г.) и многих др.

При их сравнении с ГЭУ переменного тока ГЭУ постоянного тока имеют ряд недостатков, наиболее существенными из которых являются: меньшая надежность, повышенный вес, более высокая стоимость и меньшие значения величины КПД [19, 20].

В ДЭГУ переменного тока применяются главные СГ и ГЭД переменного тока. На рисунке 1.7 представлены основные варианты упрощенных схем главного переменного тока.

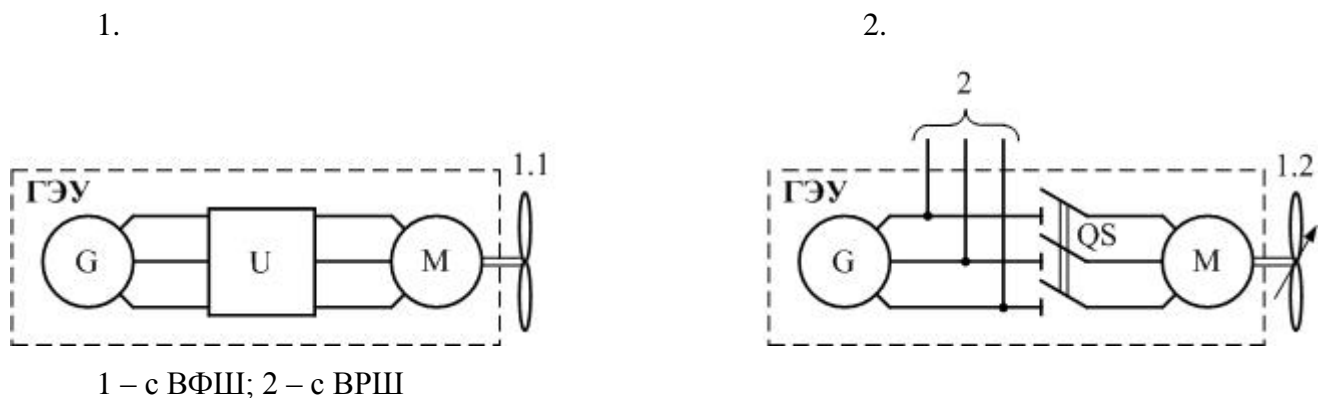


Рисунок 1.7 – Основные варианты судовых ПУ, включающих ГЭУ переменного тока

На рисунке 1.7: G – синхронные ГГ трехфазного переменного тока; U – СМ преобразователя ЭЭ; M – ГЭД трехфазного переменного тока; 1 – ГВ (1.1. –



ВФШ; 1.2 - ВРШ); QS – главные контакты разъединителя; 2 – фидеры общесудовых потребителей.

ГЭУ ПУ, представленная на рисунке 1.7.1, включает в свой состав СМ преобразователя ЭЭ. Регулирование скорости  $v_c$  и направления движения судна осуществляется посредством функционирования преобразователя ЭЭ, изменяющего частоту и величину переменного напряжения, подводимого к ГЭД при практически неизменной частоте вращения ДГ.

У ГЭУ переменного тока, вариант которой приведен на рисунке 1.7.2 регулирование скорости  $v_c$  и направления движения судна осуществляется ВРШ при неизменной частоте вращения гребного вала (неизменной угловой скорости вала ГЭД переменного тока  $\omega_{ГЭД}$ ). В этом случае, как правило, кроме питания ГЭД часть ЭЭ, вырабатываемой ГГ, используется для общесудовых нужд, а ЭЭС конструктивно выполняются как единые.

Сравнительный анализ представленных схем ГЭУ с ВФШ и ВРШ позволяет сделать следующие основные выводы.

У судов с едиными ЭЭС для питания ГЭД и других судовых потребителей (рисунок 1.7.1) необходима и используется защита ДГ от перегрузок, обусловленная тем, что мощность ДГ, как правило, не рассчитана на одновременно максимальную нагрузку судовых потребителей и наибольшую скорость судна. При возникновении таких случаев происходит автоматическое отключение второстепенных потребителей ЭЭ.

В ПУ с ГЭУ переменного тока и ВФШ (рисунок 1.7.1) используются, как правило, инверторные ПП частоты, которые преобразуют ЭЭ питающей сети с одними значениями напряжения, тока и частоты, вырабатываемыми ГГ переменного тока, в ЭЭ с требуемыми для ГЭД значениями напряжения, тока и частоты в два этапа. На первом этапе с помощью выпрямителя производится преобразование переменного тока и напряжения сети в постоянные значения тока и напряжения. На втором этапе постоянные ток и напряжение преобразуются с помощью автономного инвертора в необходимые для ГЭД переменные (ток, напряжение и частоту), требуемые для обеспечения заданных режимов работы ПУ.

Использование на электроходах ВРШ позволяет избавиться от необходимости регулировать частоту вращения ГВ для изменения скорости судна  $v_c$ . Следовательно, отсутствует потребность в преобразователях ЭЭ и, соответственно, в дополнительных устройствах фильтрации гармоник. Таким образом, результирующий КПД энергоустановки электроходов с ВРШ выше, чем электроходов с ВФШ, схемы главного тока которых дополнительно включают СМ, как правило, в виде двухзвенных ПП частоты – рисунок 1.7.2.

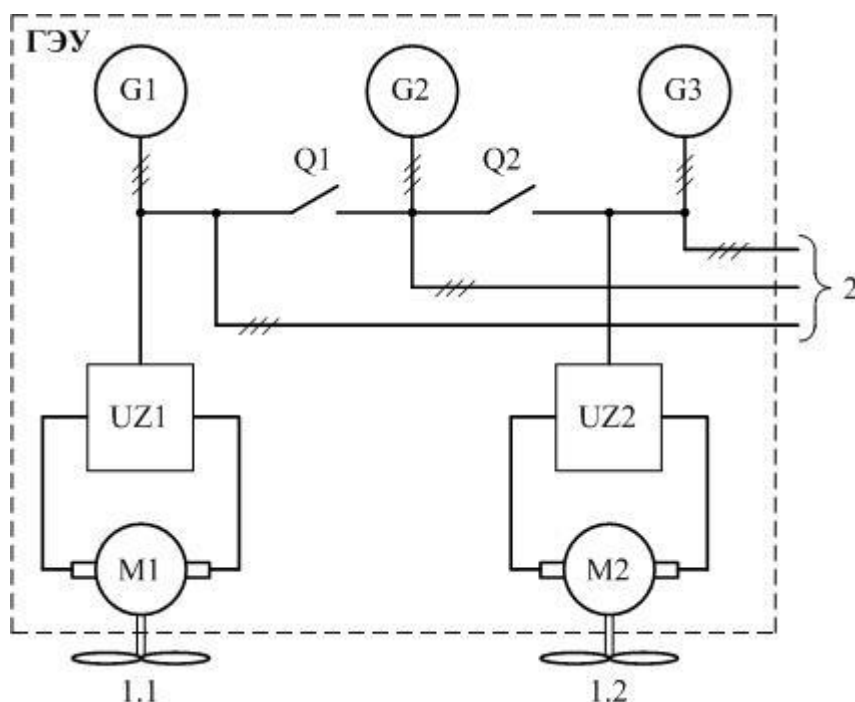
Особенностью ПУ, включающей ГЭУ переменного тока с ВРШ (рисунок 1.7.2), является необходимость ограничения пусковых токов ГЭД, достигающих семикратных и более значений относительно номинального тока. Соответственно во столько же раз возрастает и пусковая мощность, потребляемая ГЭД. Так как мощности ДГ и ГЭД соизмеримы, то при пуске последнего без принятия ограничительных мер ДГ остановится. Существует несколько способов ограничения пусковых токов ГЭД: переключение на время пуска обмоток статора гребного двигателя со «звезды» (Y) на «треугольник» ( $\Delta$ ), пуск через регулятор напряжения, частотный преобразователь и др.

ГЭУ переменного тока используются на ледоколе «Henry Larsen» (Канада, 1987 г.), лайнерах «Queen Mary 2» (Франция, 2004 г.), «Sapphire Princess» (Япония, 2004 г.) серии судов «Grand», «Majestic Princess» (Италия, 2017 г.) класса «Royal Princess» и др.

В ДЭГУ переменного-постоянного тока (двойного рода тока) ГЭД постоянного тока получают питание от СГ через управляемые выпрямители. Такие ГЭУ обладают достоинствами как ГЭУ постоянного тока (высокая маневренность и отличные тяговые качества), так и достоинствами ГЭУ переменного тока (высокая экономичность и надежность генераторных агрегатов).

На рисунке 1.8 изображена упрощенная комбинированная схема главного тока ГЭУ двойного рода тока (переменно-постоянного) накатных пассажирских паромов типа «Вохилайд» (проект 10380).

Схемой (рисунок 1.8) предусмотрены режимы работы двух или трех синхронных генераторов  $G1 \dots G3$  через управляемые реверсивные выпрямители  $UZ1$



Q1, Q2 – секционные выключатели; 1.1, 1.2 – ВФШ; 2 – фидеры общесудовых потребителей ЭЭ

Рисунок 1.8 – Комбинированная схема главного тока ГЭУ переменного-постоянного тока накатных пассажирских паромов типа «Вохилайд»

и UZ2 на гребные электродвигатели (ЭД) постоянного тока M1 и M2. Переход с одного режима на другой осуществляется без перерыва в работе ГЭУ. Изменением подаваемого на якоря ГЭД напряжения посредством управляемых выпрямителей UZ1 и UZ2 обеспечивается необходимая скорость движения судна  $v_c$ . ПД генераторов G1...G3 работают с квазипостоянной частотой вращения валов.

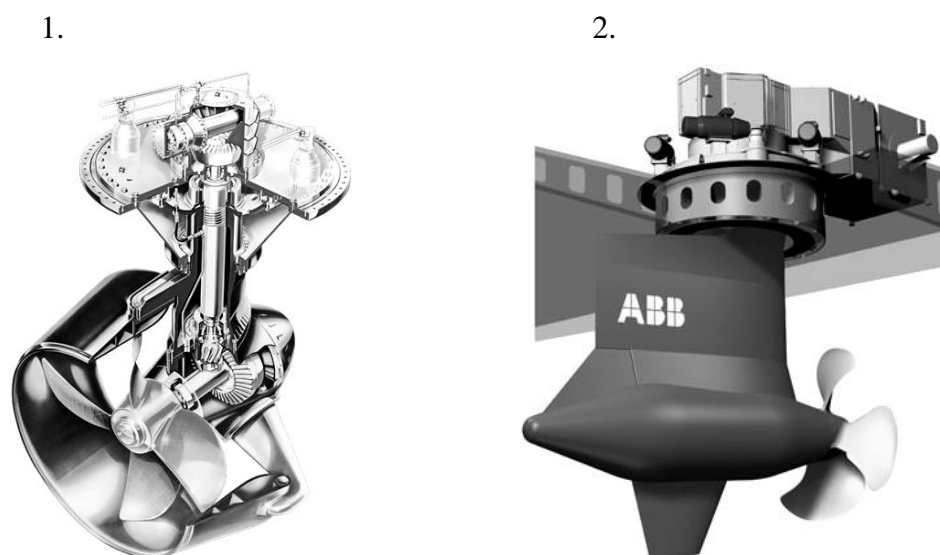
В представленной ДЭГУ двойного рода тока (переменно-постоянного), как и в ДЭГУ постоянного тока (рисунок 1.11), степень загрузки приводных ГД регулируется за счет изменения их работающего числа в ГЭУ. Аналогичными ДЭГУ постоянного тока являются и основные недостатки ДЭГУ двойного рода тока.

ГЭУ двойного тока установлены на ледоколах серии «Арктика» (СССР, 1975–2007 гг.), «Россия» (СССР, 1985 г.), кабельных судах типа «Бирюса» проекта 1275 (Финляндия, 1986 г.), паромах «Бригадир Ришко» (СССР, 1990 г.) и др.

Наряду с традиционными стационарно установленными ГВ в настоящее время в мировом судостроении все большее распространение получают принципиально новые технические решения ПК, включающие в качестве движителей глав-

ные ВРК, соединяющие в себе функции движителя и рулевого устройства активного типа. В традиционных ПУ, включающих ГЭУ, ГЭД расположены внутри корпусов судов. Вращение их валов передается на движители (ГВ) посредством промежуточных валов, иногда через редукторы. У ПК, включающих главные ВРК, ГЭД расположены внутри корпусов судов или в отдельных корпусах (гондолах), вертикально поворачивающихся относительно корпусов судов на угол до  $360^\circ$ , что позволяет обеспечить повышенную по сравнению с обычными движительными установками маневренность судов. Кроме того, при использовании главных ВРК с ГЭД преимущественно в отдельных гондолах сокращается объем МО судов, повышая тем самым их полезные объемы.

На рисунке 1.9 в качестве примеров приведены некоторые варианты главных ВРК, используемых на современных судах.



1 – «Schottel»; 2 – «Azipod»

Рисунок 1.9 – Варианты главных ВРК судов [21]

При наличии на судах с электродвижением главных ВРК группы компаний «Schottel» (рисунок 1.9.1) ГЭД расположены внутри корпусов судов, а механическая мощность от ГЭД на ГВ передается посредством механических ПУ. Главные ВРК «Schottel» выпускаются для судовых ПУ с входной мощностью преимущественно от 150 до 6500 кВт, однако диапазон мощностей на этом не ограничивается, так как фирмы могут изготовить практически любую ВРК по желанию за-

казчика [22]. Колонки данного типа бывают с винтами фиксированного и регулируемого шага. Такие ВРК могут быть установлены непосредственно в корпусе или в контейнере подъемного, или выдвигающегося типа. Аналогично главным ВРК других производителей, ВРК фирмы «Schottel» позволяют экономить место установки, обеспечивают необходимое управление на  $360^\circ$  и позиционирование, характеризуются относительно низким уровнем шума и вибрации. Установка в ПУ с главными ВРК ВРШ позволяет использовать нереверсивные ГД. Повышенная экономичность ПК обеспечивает их быструю окупаемость за счет экономии топлива.

ПУ торговой марки «Azipod» шведско-швейцарской компании Asea Brown Boveri (ABB) (рисунок 1.9.2) с ГЭД представляют собой движительно-двигательные комплексы с погружными высокомоментными ГЭД, позволяющие регулировать частоты вращения ГВ от 0 до номинальных значений, которые, по данным, приведенным в [22], обеспечивают мощности до 14 МВт. ГЭД у главных ВРК «Azipod» расположены как правило в отдельных гондолах. ГВ ПУ устанавливаются непосредственно на валах ГЭД, что позволяет передавать вращающие моменты двигателей непосредственно на винты, минуя промежуточные валы или редукторы. Отказ от промежуточных элементов ПУ исключает потери энергии, возникающие в них при передаче энергии с валов ГЭД на ГВ. Высокая маневренность обеспечивается поворотом колонки на  $180^\circ$ . В отличие от обычных рулей, главные ВРК обеспечивают хорошую управляемость при заднем ходе судна.

ПУ с главными ВРК обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными ПУ. При использовании ВРК длина МО может быть сокращена до 30 % [23]. Это достигается за счет относительно коротких валопроводов, отсутствия дополнительных редукторов (роль редукторов выполняют главные ВРК), а также вследствие того, что ГВ могут быть расположены в кормовой части судов в необходимом месте ввиду отсутствия отдельных рулевых устройств.

В отличие от традиционных гребных валов и дейдвудных устройств, ремонты и периодические освидетельствования которых требуют постановки судов в доки, демонтажи и монтажи главных ВРК для выполнения этих мероприятий могут выполняться на плаву судов без вывода их из эксплуатации.

Так как главные ВРК позволяют направлять упоры практически в любых направлениях, обеспечивая необходимую управляемость на всех режимах, включая режимы малого и заднего хода, значительно повышается эксплуатационная безопасность судов. Суда с главными ВРК способны разворачиваться на месте, а при развороте колонок на  $180^\circ$  с полного хода «вперёд» до остановки суда проходят примерно (1,5...2,0) длины их корпусов [23].

Основные недостатки, присущие ПУ с главными ВРК, аналогичны недостаткам традиционных судовых ГЭУ. Кроме того, в процессе их эксплуатации выявились дополнительные, к которым необходимо отнести повышенную конструктивную и технологическую сложность их изготовления и технического обслуживания, ограничение агрегатной мощности по сравнению с традиционными ПК, относительно сложные условия работы ГЭД и др. [22].

Судовые ПУ с двумя главными ВРК «Azipod» мощностью по 6500 кВт каждая установлены на дизель-электроходе, судне-снабженце ледокольного типа «FESCO Sakhalin» (Финляндия, 2005 г.).

Две главные ВРК типа «ЗК-400 ПАРКАНО» с ВФШ используются на бортовых буксирах толкачах системы «Дунай–море» проекта 626 (Финляндия, 1986 г.). Главные ВРК с винтами в поворотной насадке используются на буксире-толкаче проекта 201 (Социалистическая Федеративная Республика Югославия (СФРЮ), 1989 г.), с ВРШ в насадке – на ледокольно-транспортных сухогрузных судах серии «Иван Папанин» проекта 10621 (СССР, 1990 г.) и на других судах различного назначения (буксирах, круизных судах, плавкранах, танкерах и т. д.).

В общем случае режимы работы главной энергетической установки судна определяются положением органов управления и внешними условиями плавания (температурой воздуха и забортной воды, состоянием поверхности моря, наличием течения, помех и т. д.).

Основными режимами работы судов с ГЭУ являются ходовые режимы (на самом малом, малом, среднем, полном и самом полном ходу при движении вперед и назад) и маневренные режимы (включение и пуск функциональных элементов ГЭУ (ПД, ГГ, ГЭД), разгон судна (изменение координат функционирования эле-

ментов ГЭУ), торможение судна, реверсирование ГЭД с целью изменения направления или более быстрой остановки движения судна, остановка функциональных элементов ГЭУ).

Маневренные режимы сопровождаются динамическими (переходными) электромагнитными, электромеханическими и гидродинамическими процессами, характерной особенностью которых в большинстве случаев является их относительная кратковременность.

Режимы работы ГЭУ определяются схемами главного тока, содержащими различное количество главных ДГ и якорей ГЭД. Чем больше в ГЭУ ДГ и ГЭД, тем больше вариантов работы СЭУ возможно реализовать. При этом увеличивается общая живучесть судов.

При внедрении в ГЭУ многих перспективных научно-технических решений затруднено использование единых ЭЭС, обусловленное наличием в схемах главного тока нелинейных элементов – силовых полупроводниковых приборов преобразовательных устройств, которые вносят основные искажения в сети переменного тока [24].

Для оценки искажения формы кривой напряжения судовых ЭЭС активно используется коэффициент несинусоидальной кривой напряжения  $K_u$ , определяемый по формуле [25]

$$K_u = \frac{1}{U_c} \sqrt{\sum_{n=2}^{200} U_n^2} 100, \% \quad (1.10)$$

где  $U_c$  – действующее значение напряжения сети;  $U_n$  – напряжение гармонической составляющей  $n$ -го порядка ( $n$  – порядковый номер высшей гармоники).

Значение коэффициента  $K_u$  должно быть не более 10 %. Для питания мощных источников гармонических составляющих напряжения, к которым относятся и силовые преобразовательные устройства с нелинейными элементами в схемах главного тока ГЭУ, по согласованию с Российским морским регистром судоходства (РМРС) допускается использование отдельных шин с  $K_u > 10 \%$ , при условии, что указанные шины подключаются к основным сетям через развязывающие устройства (вращающиеся преобразователи, специальные трансформаторы и пр.).

В частности, спектр гармоник тока 6-пульсных выпрямителей включает кроме первой гармоники также гармоники с номерами  $6n \pm 1$ , где  $n$  – любое положительное целое число. Амплитуды гармоник пропорциональны обратной величине гармонического порядка и составляют 20 % для 5-й гармоники, 14 % для 7-й, 9-й, 11-й и т. д. Существует несколько способов уменьшения гармонических искажений до допустимых пределов. К ним относятся [26]: отделение судовых потребителей с помощью разделительных трансформаторов; применение активных и пассивных фильтров гармоник; увеличение количества импульсов выпрямителей за счет использования двух мостов выпрямителей или фазосдвигающих трансформаторов.

Отделение судовых потребителей с помощью разделительных трансформаторов в настоящее время достаточно активно используется в судовой электроэнергетике.

Активные фильтры параллельного типа выделяют гармонические составляющие в сети питания и компенсируют их при помощи добавления таких же по амплитуде гармоник, но в противофазе к выделенным. Такие устройства относительно сложны, имеют повышенную стоимость и не позволяют произвести полное подавление гармоник.

Применение пассивных фильтров гармоник затруднено в связи с тем, что их сопротивление на основной частоте носит емкостной характер, а включение ДГ на емкостные нагрузки противопоказано, т. к. в момент подключения выходное напряжение генераторов может резко возрасти и вызвать, тем самым, срабатывание аварийных защит. Пассивные фильтры представляют собой последовательные резонансные фильтры и подключаются в разрыв цепи между источниками и потребителями. Такие фильтры громоздки, и, как правило, настраиваются на одну из многих гармонических составляющих, что требует применения нескольких секций фильтра для основных гармоник. Кроме того, реактивные элементы пассивных фильтров генерируют нежелательную реактивную энергию.

Использование выпрямителей двухзвенных преобразователей частоты с IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) транзисторами в качестве ключей позволя-



ет получить коэффициент гармоник входного напряжения и тока в пределах 5 % и коэффициент мощности порядка 0,99 % практически во всем диапазоне рабочей загрузки преобразователя. Выпрямление переменного тока с помощью транзисторов с изолированным раствором IGBT снижает уровень нелинейных искажений, устраняя, таким образом, потребность в дополнительных фильтрах и конденсаторных батареях. Основным недостатком таких выпрямительных устройств по сравнению с тиристорными является более низкие значения КПД и относительно высокая стоимость.

К перспективным направлениям развития силовой полупроводниковой техники для судовых ГЭУ относится внедрение матричных преобразователей частоты (МПЧ), осуществляющих непосредственную связь между источниками (ГГ) и нагрузками (ГЭД), обеспечивающих при необходимости режимы рекуперации и относительно высокое качество ЭЭ. Возможности двунаправленного обмена энергии и формирования синусоидальных входных токов с единичным коэффициентом сдвига, отсутствие в СМ конденсаторов, относящихся к элементам невысокой надежности традиционных двухзвенных инверторных ПП частоты, высокие значения КПД и показателей электромагнитной совместимости относятся к неоспоримым преимуществам МПЧ по сравнению с другими типами преобразователей. Кроме того, относительно двухзвенных ПП частоты с активными выпрямителями и инверторами напряжения МПЧ более компактны и обладают повышенной надежностью. МПЧ обеспечивают практически синусоидальное выходное напряжение при его изменении в пределах (0...0,87) относительно уровня напряжения питающей сети [27]. При бóльшем значении выходного напряжения качественные характеристики ЭЭ имеют незначительные отклонения от синусоидальных.

### **1.5 Особенности ПУ с ГЭУ малотоннажных судов**

ЭЭС многих малотоннажных судов, к которым относятся, в том числе, суда прибрежного и внутрипортового плавания (буксиры, катера, паромы и др.), зна-

чительную часть общего времени эксплуатации работают в переходных и доле-вых режимах, что снижает эффективность технической эксплуатации СЭУ таких судов по следующим основным причинам: увеличивается удельный расход топлива ПД; ухудшаются условия сгорания топлива, многократно увеличивая содержание вредных веществ в выхлопных газах; уменьшается эксплуатационный ресурс компонентов ПУ.

Использование на таких судах ПК с ГЭУ переменного или двойного рода тока позволяет несколько повысить их экономические и экологические показатели, т. к. ПД ГЭУ работают с постоянной частотой вращения независимо от скорости судна [28, 29, 30 и др.].

При этом необходимо решение задачи обеспечения работы ГД с постоянными нагрузками при неизменных частотах вращения.

В настоящее время строятся также небольшие суда с питанием ГЭД от аккумуляторных батарей (АБ), электрохимических генераторов (топливных элементов), солнечных элементов и др. [31, 32].

Несмотря на то, что электрохимические АБ с начала своего развития претерпели существенные изменения, их технико-экономические показатели (удельная энергия, продолжительность работы и др.) до настоящего времени не достигли своего совершенства. Можно выделить несколько типов малотоннажных судов, на которых при рациональном учете всех факторов (конструктивных, социальных, экологических и пр.) применение ГЭУ с использованием электрохимических АБ будет технико-экономически целесообразно.

Одним из наиболее ярких географических районов возможного использования аккумуляторных электроходов представляется город Владивосток. Изрезанная береговая линия, включающая бухты и заливы, способствуют широкому применению малотоннажного флота.

Ввод в эксплуатацию в 2012 г. двух высоководных мостов во Владивостоке позволил решить транспортную проблему для «магистральных» пассажиров. Однако при этом осуществить перемещение с одного близлежащего берега на другой при отсутствии малотоннажного морского пассажирского транспорта

становится довольно продолжительной по времени процедурой. Использование мостов не должно исключать для сообщений водный транспорт. За рубежом (в Пенанге (Малайзия), Стамбуле (Турция) и в других местах) несмотря на наличие мостов имеется достаточное количество паромов, которые совершают челночные и прочие рейсы.

К одному из вариантов увеличения автономности малотоннажных судов с аккумуляторными энергоустановками относится возможность использования КЭУ (гибридных), включающих АБ и дизель-генераторные агрегаты, позволяющих улучшить экологические и экономические показатели [33, 34, 35]. При этом необходимо решение актуальных задач, связанных с отдельной и совместной работой ДГ и АБ в различных режимах работы ГЭУ.

## 1.6 Выводы

1. Выполнен обзор и анализ основных вариантов ПК судов. Определено, что несмотря на выявленные недостатки, доминирующее положение в транспортном флоте занимают ПУ с «жесткими» механическими связями и ВФШ.

2. Установлено, что в настоящее время определенное устойчивое применение на морском транспорте имеет электродвижение. К судам-электроходам относятся ледоколы, суда активного ледового плавания, буксиры и другие типы судов.

3. Рассмотрены выявленные особенности судов с ГЭУ, к которым относятся более высокие маневренные качества, обусловленные меньшим временем перехода с одного режима на другой в сочетании с дистанционным управлением работой всей ПУ. Энергоэффективность электроходов повышается при работе ГЭУ в долевых (частичных) режимах.

4. Подтверждено, что у судов-электроходов в наличии широкие возможности отбора мощности от ГГ ГЭУ для питания общесудовых потребителей ЭЭ. Квалифицированное применение на судах-электроходах единых ЭЭС позволяет сократить расход топлива в среднем на 25 %. Наиболее эффективен отбор мощности на электроходах переменного тока.

5. Приведены особенности выбора типа ПУ с учетом предъявляемых требований. Научной основой для решения комплексной задачи энергоэффективности судов при их проектировании может быть принято представление о судовом ПК как о системном объекте. Современный этап развития электродвижения характерен расширяющимся применением главных ВРК.

6. Отмечено, что использование ГЭУ с нетрадиционными источниками ЭЭ (аккумуляторами различного типа, электрохимическими генераторами, солнечными элементами и т. п.) позволяет расширить область применения судов-электроходов и улучшить экологическую обстановку.

К одному из вариантов увеличения автономности малотоннажных судов с аккумуляторными энергоустановками относится возможность использования КЭУ, включающих АБ и дизель-генераторные агрегаты, позволяющая улучшить экологические и экономические показатели.

В пределах решения поставленных задач разработки методов и средств повышения энергетической, экономической и экологической эффективности ГЭУ пропульсивных установок малотоннажных судов прибрежного плавания необходимо выполнить обзор и анализ научно-технических решений основных ГЭУ эксплуатируемых судов-электроходов.

## 2 ОБЗОР И АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ВАРИАНТОВ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ГЭУ ПРОПУЛЬСИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ

### 2.1 Общая характеристика ГЭУ судов

Развитие судостроения и модернизации эксплуатируемых судов сопровождаются изменением их электрификации.

В общем случае ГЭУ относятся к самым мощным ЭП. Использование ГЭУ на судах приведено в приложении П.2.1.

Согласно РМРС [25] ГЭУ представляет комплекс оборудования для распределения и преобразования ЭЭ в механическую энергию с целью воспроизведения заданного упора одним гребным движителем.

При решении поставленной задачи представляется целесообразным рассматривать ПУ с ГЭУ как многокомпонентные электротехнические комплексы, включающие ПД, ГГ, преобразователи электрической энергии (ПЭЭ), ГЭД, судовые движители, СУ (системы возбуждения (СВ) главных ЭМ, защит, блокировок, сигнализаций и контроля), электрические и механические связи.

Компоненты ГЭУ рассмотрены в приложении П.2.2.

В настоящее время электрификацию судов принято оценивать коэффициентами (степенями) электровооруженности (электрификации)  $\gamma$ ,  $\gamma_1$  [36] и  $\beta$  [37].

Коэффициент  $\gamma$  характеризуется отношением активной мощности судовых ЭС [38]  $P_{\Sigma СЭС}$  (установленной суммарной активной мощности общесудовых генераторов) к водоизмещению  $D$  судна и не является достаточно объективным при оценке электрификации судов, так как при опережающем увеличении водоизмещений  $D$  строящихся судов увеличения мощностей судовых генераторов  $P_{\Sigma СЭС}$ , он уменьшается несмотря на увеличение мощности судовых ЭС.

Более убедительным является коэффициент электрификации  $\gamma_1$ , количественный анализ которого представлен в [39]. Основным недостатком коэффициента  $\gamma_1$ , используемого для сравнительной оценки степени электрификации судов различного назначения, представляется следующее. К исходным данным при рас-

чете мощности судовых ЭС относится установленная мощность судового электрического оборудования (ЭО), режимы работы судна и т. д. Так как расчет и выбор числа и мощности генераторов судовых ЭС на стадии проектирования или модернизации судов представляет достаточно сложный процесс, то при этом вводятся допущения. В связи с этим мощность генераторов судовых ЭС, а, следовательно, и коэффициенты степени электровооруженности  $\gamma$  и  $\gamma_1$  рассчитываются с погрешностями, величины которых зависят от корректности и количества вводимых допущений.

Погрешности результатов расчетов мощности судовых ЭС исключает предложенный в [39] показатель (коэффициент)  $\beta$ .

До настоящего времени электрификация судов ГЭУ оценивается, как правило, установленной мощностью главных ЭМ, что представляется упрощенным вариантом.

Исходя из изложенного, для оценки степени электрификации судов ГЭУ представляется целесообразным введение показателя (коэффициента) электрификации ГЭУ  $k_{ГЭУ}$ , определяемого по формуле

$$k_{ГЭУ} = \frac{P_{\Sigma ГЭД}}{D_э}, \text{ кВт/т.} \quad (2.1)$$

В формуле (2.1)  $P_{\Sigma ГЭД}$  – суммарная установленная активная мощность гребных ЭД, кВт;  $D_э$  – водоизмещение судна-электрохода, т.

С целью количественного определения коэффициента электрификации ГЭУ  $k_{ГЭУ}$  и выявления тенденций его изменения в функции времени постройки и сдачи судов-электроходов в эксплуатацию, собран и обработан статистический материал по судам-электроходам Дальневосточного бассейна, охватывающий временной диапазон с начала постройки первых судов с электродвижением до настоящего времени. Источниками статистических материалов являлась научно-техническая и учебная литература, судовая документация и каталоги [40, 41]. Результаты исследований приведены в приложении 3.

Согласно данным таблицы П.3 (приложение 3) коэффициент электрификации ГЭУ  $k_{ГЭУ}$  кабельных судов имеет значения (0,45...0,67) кВт/т, килекторных

судов – (0,36...0,41) кВт/т, ледоколов – (0,19...2,04) кВт/т, паромов – (1,18...1,96) кВт/т, плавучих кранов – (0,25...1,20) кВт/т, промысловых судов – (0,37...2,43) кВт/т, рефрижераторных судов – (0,50...0,57) кВт/т, спасательных судов – (1,14...1,70) кВт/т, иных – (0,33...1,25) кВт/т.

Таким образом, электрификация ГЭУ основных серий эксплуатируемых судов отечественной и зарубежной постройки сопровождается изменением коэффициента  $k_{ГЭУ}$  при отсутствии общих тенденций и закономерностей его изменения в функции времени постройки. Минимальное значение коэффициента электрификации  $k_{ГЭУ}$  отмечено у транспортных ледокольных судов типа «Амгуэма» проекта 550 и составляет 0,19, а максимальное 2,43 – у китобойных судов типа «Мирный» проекта 393. Наименьший диапазон изменения коэффициента электрификации ГЭУ отмечен у килекторных судов ( $\Delta k_{ГЭУ} = 0,05$  кВт/т), а наибольший – у промысловых судов ( $\Delta k_{ГЭУ} = 2,06$  кВт/т).

С целью решения научно-технических задач, направленных на разработку ГЭУ малотоннажных судов с улучшенными экологическими и экономическими характеристиками, в гл. 1 обоснована необходимость обзора и анализа в пределах поставленных задач основных вариантов ГЭУ судовых ПУ на примере Дальневосточного бассейна.

В общем случае технико-экономические показатели ПК судов-электроходов связаны с тенденциями развития судовой электротехники и во многом определяются характеристиками двигателей (ГВ) и схем главного тока, включающих: род тока, номинальные единичные мощности и напряжения, общее количество ГЭД и их конструктивные особенности; род тока, допустимое число, номинальные мощности и напряжения ГГ, работающих на один ГЭД и суммарное количество ГГ; схемные решения цепей главного тока для различных режимов работы ГЭУ; возможности подключения к схемам главного тока общесудовых потребителей ЭЭ.

Механические характеристики ГВ ( $M_{ГВ} = f(n_{ГВ})$ ), используемых в качестве двигателей в ПУ судов (рисунок 1.1, п. 1.1, гл. 1), определяются из выражения (2.2), представленного в [44]:

$$M_{ГВ} = M_{c0} + (M_{ГВн} - M_{c0}) \left( \frac{\omega_{ГВ}}{\omega_{ГВн}} \right)^x, \quad (2.2)$$

где  $M_{c0}$  – реактивный момент, обусловленный в первую очередь силами трения;  $M_{ГВн}$  – номинальный статический момент сопротивления ГВ, соответствующий его номинальной угловой скорости  $\omega_{ГВн}$  (в общем случае  $\omega_{ГВ} = k_{\omega} n_{ГВ}$  ( $k_{\omega} = \pi / 30$ ));  $x$  – показатель степени (для ГВ  $x = 2$ ).

С учетом зависимостей (1.2) и (1.3) (гл. 1, п. 1.1)

$$\begin{cases} N_{ГВ} = k_2 M_{ГВ} n_{ГВ} = k_4 \omega_{ГВ}^3; \\ P_{ГЭД} = M_{ГЭД} \omega_{ГЭД}. \end{cases} \quad (2.3)$$

В (2.3)  $k_4$  – результирующий коэффициент приведения;  $P_{ГЭД}$ ,  $M_{ГЭД}$  – мощность и момент на валу ГЭД, соответственно.

## 2.2 Научно-технические решения схем главного тока ГЭУ

### 2.2.1 Судовых ПК с ГЭУ постоянного тока

На рисунке 2.1 приведены судовые ПУ с некоторыми основными возможными вариантами схем соединения главных ЭМ  $G_i$  и  $M_i$  в ГЭУ постоянного тока.

К наиболее простым относится схема главного тока при наличии одного ГГ  $G$  и одного ГЭД  $M$  (рисунок 2.1.1), когда  $U_{ГГ} \approx U_{ГЭД}$  ( $U_{ГГ}$ ,  $U_{ГЭД}$  – напряжение ГГ и якоря ГЭД), которая достаточно подробно описана в литературе [45, 46 и др.].

При параллельном соединении якорей части установленных ГГ (( $G_1$  и  $G_2$ ) рисунок 2.1.2) ток якоря ГЭД  $I_{ГЭДн}$  выражается зависимостью

$$I_{ГЭД} = k_{ГГ} I_{ГЭДн}, \quad (2.4)$$

где  $k_{ГГ}$  – коэффициент использования ГГ;  $I_{ГЭДн}$  – номинальный ток якорной цепи.

Коэффициент использования ГГ  $k_{ГГ}$  в формуле (2.4) определяется как

$$k_{ГГ} = \frac{M_{ГГ} - m_{ГГ}}{M_{ГГ}} = \frac{l_{ГГ}}{M_{ГГ}}. \quad (2.5)$$



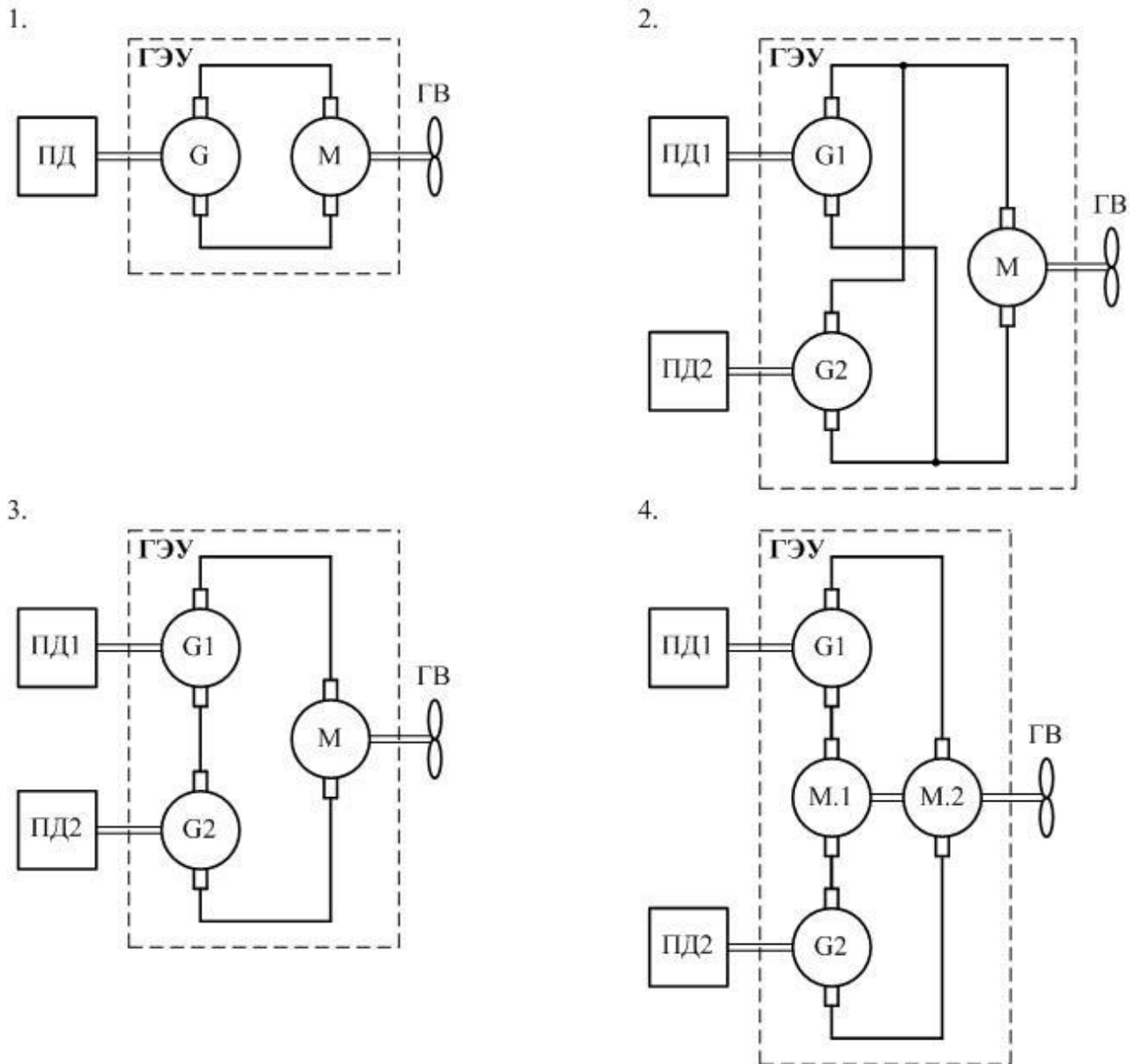


Рисунок 2.1 – Судовые ПУ с основными возможными вариантами схем соединения главных ЭМ в ГЭУ постоянного тока (без главных коммутационных аппаратов)

В формуле (2.5)  $M_{ГГ}$  – суммарное количество ГГ в схеме ГЭУ;  $m_{ГГ}$  – число отключенных ГГ;  $l_{ГГ}$  – число работающих ГГ в режиме.

Номинальный ток ГЭД  $I_{ГЭДн}$  режима в (2.4) имеет значение

$$I_{ГЭДн} = M_{ГГ} I_{ГГн}, \quad (2.6)$$

где  $I_{ГГн}$  – номинальный ток якоря одного ГГ.

Исходя из выражений (2.4) и (2.5), с изменением числа параллельно работающих ГГ для ограничения токов  $I_{ГЭДн}$  в пределах допустимых норм необходи-

мо в прямой зависимости изменять и напряжение ГГ  $U_{ГГ}$  ( $U_{ГЭД} = U_{ГГ} - \Delta U_{\kappa}$  ( $\Delta U_{\kappa}$  – падение напряжения в рабочих кабелях схемы главного тока)), так как

$$\frac{P_{ГЭД}}{P_{ГЭДн}} = \frac{U_{ГЭД} I_{ГЭД}}{U_{ГЭДн} I_{ГЭДн}} = \frac{\left(\frac{l_{ГГ}}{M_{ГГ}}\right) U_{ГЭД}}{U_{ГЭДн}}. \quad (2.7)$$

При этом будет меняться и угловая скорость вала ГЭД  $\omega_{ГЭД}$  ( $\omega_{ГЭД} = \omega_{ГВ}$ ).

С учетом (2.3) (кубической зависимости для ГВ потребляемой ГЭД мощности  $P_{ГЭД}$  от  $\omega_{ГВ}$ )

$$\frac{P_{ГЭД}}{P_{ГЭДн}} = k_5 \left(\frac{\omega_{ГВ}}{\omega_{ГВн}}\right)^3 = k_6 \left(\frac{U_{ГЭД}}{U_{ГЭДн}}\right)^3, \quad (2.8)$$

где  $k_5$  и  $k_6$  – коэффициенты приведения.

Из выражений (2.7) и (2.8) следует, что

$$\frac{l_{ГГ}}{M_{ГГ}} = \left(\frac{U_{ГЭД}}{U_{ГЭДн}}\right)^2. \quad (2.9)$$

Таким образом,

$$U_{ГЭД} = \sqrt{\left(\frac{l_{ГГ}}{M_{ГГ}}\right)} U_{ГЭДн}. \quad (2.10)$$

В отличие от параллельного при последовательном соединении якорей части установленных ГГ (G1 и G2 – рисунки 2.1.3 и 2.1.4 (M.1 и M.2 – якоря двухъякорных ГЭД)) номинальный ток якоря ГЭД  $I_{ГЭДн}$  режима имеет значение

$$I_{ГЭДн} = I_{ГГн}. \quad (2.11)$$

При этом напряжение, подводимое к якорю ГЭД

$$U_{ГЭДн} = M_{ГГ} U_{ГГн}; \quad U_{ГЭД} = \left(\frac{l_{ГГ}}{M_{ГГ}}\right) U_{ГЭДн}. \quad (2.12)$$

Величины напряжений главных ЭМ судовых ГЭУ оказывают непосредственное влияние на их экономические показатели, В частности, при использовании ГГ и ГЭД с повышенными значениями напряжений их якорей сечения электрических кабелей схем главного тока, включающих в некоторых случаях более десяти параллельных ветвей (до 12 у ледоколов проекта Р-1039 типа «Ермак»

[16]), определяемые величинами токов, имеют меньшие значения, обуславливая меньший расход материала токопроводящих жил, как правило меди.

При дальнейшем анализе схем главного тока, в случае параллельного соединения работающих в режиме ГГ (рисунок 2.1.2), их суммарная мощность  $P_{\Sigma ГГ}$  с учетом (2.4)...(2.10) определяется как

$$P_{\Sigma ГГ} = \sqrt{\left(\frac{l_{ГГ}}{M_{ГГ}}\right)} U_{ГЭДн} \left(\frac{l_{ГГ}}{M_{ГГ}}\right) I_{ГЭДн} = M_{ГГ} \sqrt{\left(\frac{l_{ГГ}}{M_{ГГ}}\right)^3} P_{ГГн}. \quad (2.13)$$

Соответственно единичная мощность  $P_{ГГ}$  параллельно работающих ГГ

$$P_{ГГ} = \frac{P_{\Sigma ГГ}}{l_{ГГ}} = M_{ГГ} \sqrt{\left(\frac{l_{ГГ}}{M_{ГГ}}\right)^3} \frac{P_{ГГн}}{l_{ГГ}} = \left(\frac{l_{ГГ}}{M_{ГГ}}\right) P_{ГГн}. \quad (2.14)$$

В случае последовательного соединения работающих в режиме ГГ (рисунки 2.1.3 и 2.1.4), с учетом (2.11) и (2.12)  $P_{\Sigma ГГ}$  определяется как

$$P_{\Sigma ГГ} = \left(\frac{l_{ГГ}}{M_{ГГ}}\right) U_{ГГн} I_{ГГн} = \left(\frac{l_{ГГ}}{M_{ГГ}}\right) P_{\Sigma ГГн}, \quad (2.15)$$

а мощность одного работающего в режиме ГГ составляет

$$P_{ГГ} = \left(\frac{l_{ГГ}}{M_{ГГ}}\right) \frac{U_{ГГн} I_{ГГн}}{l_{ГГ}} = \frac{P_{\Sigma ГГн}}{l_{ГГ}} = P_{ГГн}. \quad (2.16)$$

Таким образом, согласно (2.14) при параллельном соединении частично работающих ГГ они вырабатывают мощность  $P_{ГГ}$ , значение которой меньше номинальной единичной мощности  $P_{ГГн}$ , т. е. работают в недогруженных режимах. Это обстоятельство относится к основным причинам исключения использования в схемах ГЭУ параллельного соединения главных ЭМ – рисунок 2.1.2.

В статических режимах работы ГЭУ судовых пропульсивных комплексов  $P_{ГЭД} = N_{ГВ}$ ;  $\omega_{ГЭД} = \omega_{ГВ}$ .

Из известных уравнений электромеханической  $\omega_{ГЭД} = f(I_{ГЭД})$  и механической  $\omega_{ГЭД} = f(M_{ГЭД})$  характеристик ЭД постоянного тока (за исключением двигателей последовательного возбуждения, при анализе функционирования которых используются универсальные характеристики серий ЭД)

$$\omega_{ГЭД} = \frac{U_{ГЭД} - I_{ГЭД} R_{\Sigma ЯГЭД}}{k_{ГЭД} \Phi_{ГЭД}}; \quad (2.17)$$

$$\omega_{ГЭД} = \frac{U_{ГЭД}}{k_{ГЭД} \Phi_{ГЭД}} - \frac{M_{ГЭД} R_{\Sigma ЯГЭД}}{(k_{ГЭД} \Phi_{ГЭД})^2}. \quad (2.18)$$

где  $R_{\Sigma ЯГЭД}$  – суммарное сопротивление якорной цепи ГЭД;  $k_{ГЭД}$  – конструктивный коэффициент ЭД;  $\Phi_{ГЭД}$  – магнитный поток ЭД.

Анализ уравнения статической механической характеристики (2.18) позволяет сделать вывод о том, что у рассматриваемых ЭД постоянного тока возможны следующие варианты (способы) регулирования угловой скорости вала двигателя: изменением напряжения  $U_{ГЭД}$ , подводимого к якорной цепи; введением добавочного сопротивления  $R_{ЯГЭД}$  последовательно в якорную цепь; изменением магнитного потока  $\Phi_{ГЭД}$ .

В судовых ГЭУ постоянного тока для регулирования скорости валов ГЭД изменяется напряжение  $U_{ГЭД}$  и магнитный поток  $\Phi_{ГЭД}$ .

Основные принципы формирования схем главного тока ГЭУ и их наиболее типичные примеры достаточно подробно рассмотрены в литературных источниках [46, 47 и др.]. Расчет и проектирование схем главного тока представляет собой комплексный процесс, учитывающий надежность, маневренность, экономичность и другие показатели.

Число якорей ГЭД зависит от схем главного тока, величин напряжений и количества ГГ. К характерным конструктивным особенностям двухъякорных ГЭД в отличие от одноякорных относятся их меньшие диаметры при больших длинах.

Надежность схем главного тока определяется количеством и надежностью ее отдельных компонентов (ГГ, ГЭД, коммутационных аппаратов и др.), их резервированием.

К особенностям научно-технических решений схем главного тока ГЭУ постоянного тока пропульсивных комплексов ряда основных типов дальневосточных судов с электродвижением следует отнести коммутацию цепей главного тока в обесточенном состоянии, когда главные ЭМ находятся в невозбужденном

состоянии, или при небольших токах в цепях главного тока, имеющих место при остаточной намагниченности полюсов главных ЭМ.

Из ГЭУ постоянного тока на рисунке 2.2 в качестве примера представлен вариант ПУ дизель-электроходов – накатных пассажирских паромов типа «Сахалин» проекта 1809, включающий схему главного постоянного тока.

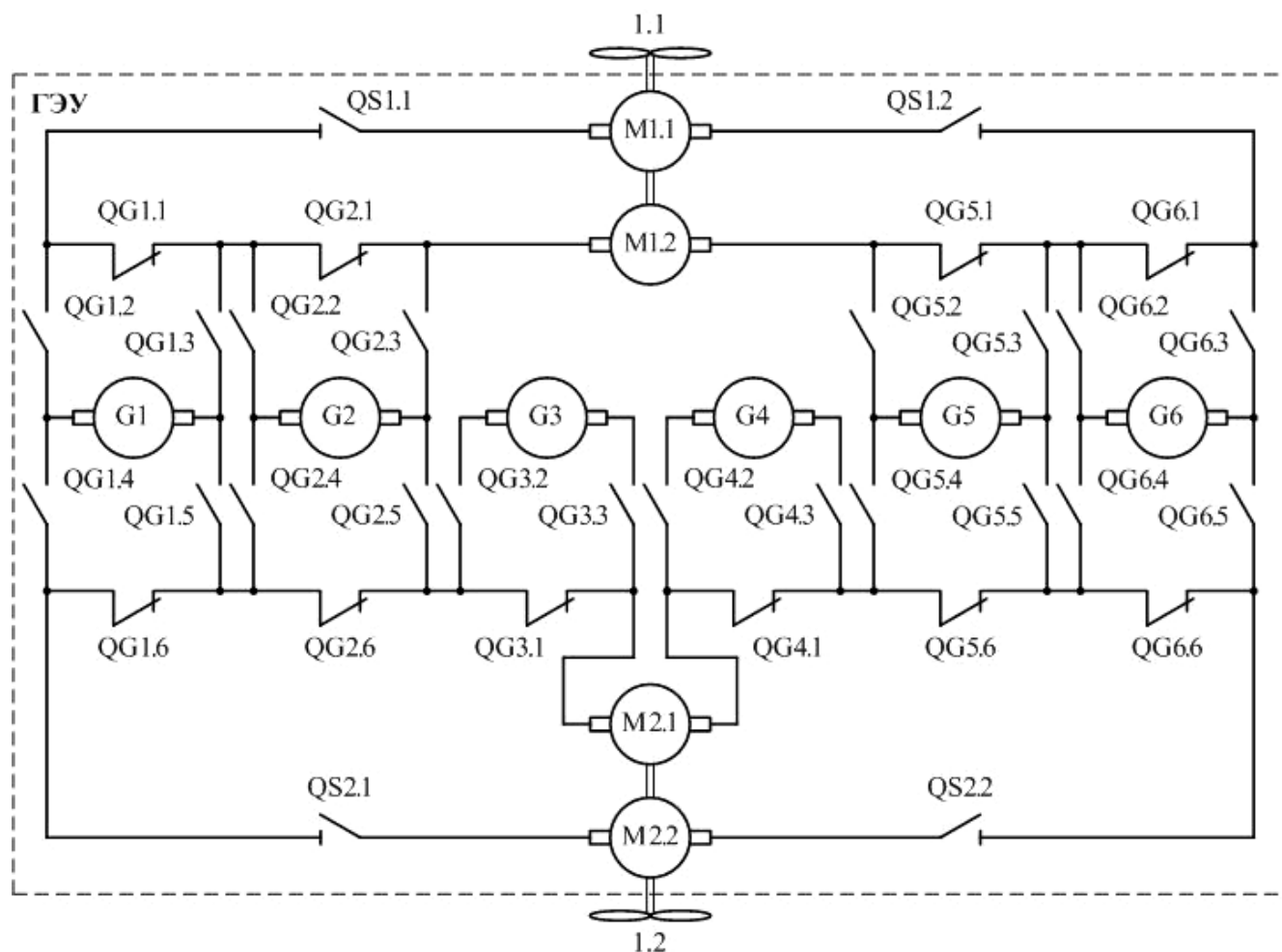


Рисунок 2.2 – Вариант ПУ накатных пассажирских паромов типа «Сахалин» (проект 1809), включающий схему ГЭУ главного постоянного тока (проект 1809)

Основные краткие характеристики паромов типа «Сахалин»: наибольшая длина судна  $L_{c\max} = 127,0$  м; наибольшая ширина  $B_{c\max} = 19,8$  м; осадка  $d_c = 6,2$  м; водоизмещение полное  $D_{cn} = 7914$  т; скорость судна  $v_c = 18,0$  уз.

Представленная схема (рисунок 2.2) наиболее полно отражает характерные особенности ГЭУ постоянного тока судов Дальневосточного бассейна, и отличается своей индивидуальностью.

На рисунке 2.2: G1...G6 – ГГ постоянного тока независимого возбуждения; M1, M2 – носовой и кормовой двухъякорные ГЭД постоянного тока независимого возбуждения, соответственно; 1.1, 1.2 – носовой и кормовой двигатели (ВФШ), соответственно.

Схема включает в себя восемь главных ЭМ: шесть ГГ постоянного тока типа ГП-306А ( $P_{ГГн} = 1800$  кВт;  $U_{ГГн} = 500$  В при частоте вращения ГГ  $n_{ГГн} = 810$  об/мин ( $P_{ГГ} = 1200$  кВт при  $n_{ГГ} = 750$  об/мин)); два (носовой и кормовой) двухъякорных ГЭД постоянного тока типа 2ПГ2-21 60-6К ( $P_{ГЭДн} = 2 \times 2820$  кВт;  $U_{ГЭДн} = 1000$  В; частота вращения ГЭД  $n_{ГЭДн} = 230$  об/мин ( $n_{ГЭД} = 144$  об/мин)) [18].

Согласно рисунку 2.2 схемы главного тока ГЭУ для носового и кормового ГЭД являются одноконтурными с попеременно-последовательным соединением главных ЭМ (якорей ГГ и ГЭД).

Главные контакты разъединителей  $QS_{ij}$  ( $i$  – порядковый номер разъединителя, определяемый ГЭД ( $i = 1$  – для разъединителя носового ГЭД,  $i = 2$  – для разъединителя кормового ГЭД);  $j$  – номер главного контакта разъединителя ( $j = 1, 2$ )) замыкаются после замыкания главных контактов переключателей ГГ  $QG_{ij}$  ( $i$  – порядковый номер переключателя, определяемый номером ГГ ( $i = 1...6$ );  $j$  – номер главного контакта переключателя ГГ ( $j = 1...6$  – у  $QG1, QG2, QG5$  и  $QG6$ ;  $j = 1...3$  – у  $QG3$  и  $QG4$ )) – рисунок 2.2.

Главные контакты переключателей ГГ (избирательных)  $QG_{ij}$  коммутируют электрические цепи схемы главного тока ГЭУ в обесточенном состоянии, а главные контакты разъединителей  $QS_{ij}$  способны коммутировать некоторые токи, обусловленные остаточной намагниченностью ГГ.

Число работающих в схеме главных ЭМ (рисунок 2.2) определяется режимами работы ГЭУ, к которым в первую очередь относятся основной, форсированный и аварийный ходовые режимы судна.

Для основного ходового режима судна условия состояний элементов (коммутационных аппаратов) и схем главного тока ГЭУ (рисунок 2.2) в результате анализа алгоритма управления с помощью ФАЛ могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned}
\bar{y}_{1,6,h}(x) &= (x_{QG1.1} \vee x_{QG6.1}) \wedge (\bar{x}_{QG1.2} \vee \bar{x}_{QG6.2}) \wedge (\bar{x}_{QG1.3} \vee \bar{x}_{QG6.3}); \\
\bar{y}_{2,5,h}(x) &= (x_{QG2.1} \vee x_{QG5.1}) \wedge (\bar{x}_{QG2.2} \vee \bar{x}_{QG5.2}) \wedge (\bar{x}_{QG2.3} \vee \bar{x}_{QG5.3}); \\
\bar{z}_{1h}(x) &= \bar{x}_{QS1.1} \wedge \bar{x}_{QS1.2}; \\
y_{6,1,k}(x) &= (x_{QG6.4} \vee x_{QG1.4}) \wedge (x_{QG6.5} \vee x_{QG1.5}) \wedge (\bar{x}_{QG6.6} \vee \bar{x}_{QG1.6}); \\
y_{5,2,k}(x) &= (x_{QG5.4} \vee x_{QG2.4}) \wedge (x_{QG5.5} \vee x_{QG2.5}) \wedge (\bar{x}_{QG5.6} \vee \bar{x}_{QG2.6}); \\
y_{3,4,k}(x) &= (\bar{x}_{QG3.1} \wedge x_{QG3.2} \wedge x_{QG3.3}) \wedge (\bar{x}_{QG4.1} \wedge x_{QG4.2} \wedge x_{QG4.3}); \\
z_{2k}(x) &= x_{QS2.1} \wedge x_{QS2.2}.
\end{aligned} \tag{2.19}$$

В (2.19)  $y_1(x) \dots y_6(x)$  – функции состояний главных контактов  $x_{QGij}$  избирательных переключателей ГГ  $QGij$  носового ( $h$ ) и кормового ( $k$ ) контуров, обеспечивающих набор схем главного тока для рассматриваемого режима;  $z_{1h}(x)$  и  $z_{2k}(x)$  – функции рабочих состояний главных контактов  $x_{QS1j}$  и  $x_{QS2j}$  разъединителей  $QS1j$  и  $QS2j$  в цепях якорей  $M1.1$  и  $M2.2$  носового и кормового ГЭД.

В этом случае функции носового ( $h$ ) и кормового ( $k$ ) замкнутых контуров  $F_{охр}(x, y, z)$  имеют вид:

$$\begin{aligned}
\bar{F}_{охр.h}(x, y, z) &= (\bar{x}_{G1} \vee \bar{x}_{G6}) \wedge (\bar{x}_{G2} \vee \bar{x}_{G5}) \wedge \bar{x}_{M1.1} \wedge \bar{x}_{M1.2} \wedge \\
&\quad \wedge \bar{y}_{1,6,h}(x) \wedge \bar{y}_{2,5,h}(x) \wedge \bar{z}_{1h}(x); \\
F_{охр.k}(x, y, z) &= (x_{G6} \vee x_{G1}) \wedge (x_{G5} \vee x_{G2}) \wedge x_{G3} \wedge x_{G4} \wedge x_{M2.1} \wedge x_{M2.2} \wedge \\
&\quad \wedge y_{6,1,k}(x) \wedge y_{5,2,k}(x) \wedge y_{3,4,k}(x) \wedge z_{2k}(x).
\end{aligned} \tag{2.20}$$

Таким образом, исходя из (2.19) и (2.20), в основном ходовом режиме работают четыре ГГ ( $G1$  (или  $G6$ ),  $G2$  (или  $G5$ ),  $G3$  и  $G4$ ), подключенных к кормовому ГЭД  $M2$ .

Для форсированного ходового режима условия состояний коммутационных аппаратов (рисунок 2.2) с помощью ФАЛ представляются как:

$$\begin{aligned}
y_{1,6,h}(x) &= (\bar{x}_{QG1.1} \vee \bar{x}_{QG6.1}) \wedge (x_{QG1.2} \vee x_{QG6.2}) \wedge (x_{QG1.3} \vee x_{QG6.3}); \\
y_{2,5,h}(x) &= (\bar{x}_{QG2.1} \vee \bar{x}_{QG5.1}) \wedge (x_{QG2.2} \vee x_{QG5.2}) \wedge (x_{QG2.3} \vee x_{QG5.3}); \\
z_{1h}(x) &= x_{QS1.1} \wedge x_{QS1.2}; \\
y_{6,1,k}(x) &= (x_{QG6.4} \vee x_{QG1.4}) \wedge (x_{QG6.5} \vee x_{QG1.5}) \wedge (\bar{x}_{QG6.6} \vee \bar{x}_{QG1.6}); \\
y_{5,2,k}(x) &= (x_{QG5.4} \vee x_{QG2.4}) \wedge (x_{QG5.5} \vee x_{QG2.5}) \wedge (\bar{x}_{QG5.6} \vee \bar{x}_{QG2.6}); \\
y_{3,4,k}(x) &= (\bar{x}_{QG3.1} \wedge x_{QG3.2} \wedge x_{QG3.3}) \wedge (\bar{x}_{QG4.1} \wedge x_{QG4.2} \wedge x_{QG4.3}); \\
z_{2k}(x) &= x_{QS2.1} \wedge x_{QS2.2}.
\end{aligned} \tag{2.21}$$

В (2.20)  $x_{Gi}$  – состояния ГГ ( $i$  – порядковый номер ГГ ( $i = 1 \dots 6$ ));  $x_{Mi.j}$  – состояния ГЭД ( $i$  – номер ГЭД ( $i = 1$  – для носового ГЭД;  $i = 2$  – для кормового ГЭД);  $j$  – номер якоря ГЭД ( $j = 1, 2$ )).

Функции замкнутых контуров  $F_{\phi xp}(x, y, z)$  схем главного тока ГЭУ для этого случая имеют вид

$$\begin{aligned} F_{\phi xp.n}(x, y, z) &= (x_{G1} \vee x_{G6}) \wedge (x_{G2} \vee x_{G5}) \wedge x_{M1.1} \wedge x_{M1.2} \wedge \\ &\quad \wedge y_{1,6,n}(x) \wedge y_{2,5,n}(x) \wedge z_{1n}(x); \\ F_{\phi xp.k}(x, y, z) &= (x_{G6} \vee x_{G1}) \wedge (x_{G5} \vee x_{G2}) \wedge x_{G3} \wedge x_{G4} \wedge x_{M2.1} \wedge x_{M2.2} \wedge \\ &\quad \wedge y_{6,1,k}(x) \wedge y_{5,2,k}(x) \wedge y_{3,4,k}(x) \wedge z_{2k}(x). \end{aligned} \quad (2.22)$$

Согласно выражениям (2.21) и (2.22) в форсированном ходовом режиме работают все шесть генераторов (два ГГ (G1 (или G6) и G2 (или G5)) подключены к носовому ГЭД M1, а четыре ГГ (G6 (или G1), G5 (или G2), G3 и G4) – к кормовому ГЭД M2).

В случае аварийного ходового режима условия состояний коммутационных аппаратов (рисунок 2.2) могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} y_{1,n}(x) &= \bar{x}_{QG1.1} \wedge x_{QG1.2} \wedge x_{QG1.3}; & y_{2,n}(x) &= \bar{x}_{QG2.1} \wedge x_{QG2.2} \wedge x_{QG2.3}; \\ y_{5,n}(x) &= \bar{x}_{QG5.1} \wedge x_{QG5.2} \wedge x_{QG5.3}; & y_{6,n}(x) &= \bar{x}_{QG6.1} \wedge x_{QG6.2} \wedge x_{QG6.3}; \\ z_{1,n}(x) &= x_{QS1.1} \wedge x_{QS1.2}; \\ \bar{y}_{1,k}(x) &= \bar{x}_{QG1.4} \wedge \bar{x}_{QG1.5} \wedge x_{QG1.6}; & \bar{y}_{2,k}(x) &= \bar{x}_{QG2.4} \wedge \bar{x}_{QG2.5} \wedge x_{QG2.6}; \\ \bar{y}_{3,k}(x) &= x_{QG3.1} \wedge \bar{x}_{QG3.2} \wedge \bar{x}_{QG3.3}; & \bar{y}_{4,k}(x) &= x_{QG4.1} \wedge \bar{x}_{QG4.2} \wedge \bar{x}_{QG4.3}; \\ \bar{y}_{5,k}(x) &= \bar{x}_{QG5.4} \wedge \bar{x}_{QG5.5} \wedge x_{QG5.6}; & \bar{y}_{6,k}(x) &= \bar{x}_{QG6.4} \wedge \bar{x}_{QG6.5} \wedge x_{QG6.6}; \\ \bar{z}_{2,k}(x) &= \bar{x}_{QS2.1} \wedge \bar{x}_{QS2.2}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

При этом функции носового и кормового замкнутых контуров  $F_{axp}(x, y, z)$  представляются как

$$\begin{aligned} F_{axp.n}(x, y, z) &= x_{G1} \wedge x_{G2} \wedge x_{G5} \wedge x_{G6} \wedge x_{M1.1} \wedge x_{M1.2} \wedge \\ &\quad \wedge y_{1,n}(x) \wedge y_{2,n}(x) \wedge y_{5,n}(x) \wedge y_{6,n}(x) \wedge z_{1,n}(x); \\ \bar{F}_{axp.k}(x, y, z) &= \bar{x}_{G3} \wedge \bar{x}_{G4} \wedge \bar{x}_{M2.1} \wedge \bar{x}_{M2.2} \wedge \bar{y}_{1,k}(x) \wedge \bar{y}_{2,k}(x) \wedge \bar{y}_{3,k}(x) \wedge \\ &\quad \wedge \bar{y}_{4,k}(x) \wedge \bar{y}_{5,k}(x) \wedge \bar{y}_{6,k}(x) \wedge \bar{z}_{2,k}(x). \end{aligned} \quad (2.24)$$

Таким образом, из (2.23) и (2.24) в аварийном ходовом режиме работают четыре ГГ (G1, G2, G5 и G6), подключенных к носовому ГЭД M1.



Кроме основного, форсированного и аварийного ходовых режимов схема (рисунок 2.2) обеспечивает работу носового и кормового ГЭД (М1 и М2) в необходимых частичных (долевых) режимах.

Регулирование частоты вращения носового и кормового ГВ (угловой скорости якорей носового и кормового ГЭД) и реверс осуществляется изменением напряжений  $U_{ГЭД}$ , подводимых к якорям ГЭД (воздействием на независимые обмотки возбуждения ГГ G1...G6).

К индивидуальным особенностям схемы главного тока ГЭУ паромов типа «Сахалин» следует отнести наличие носового ГЭД М1 (рисунок 2.2) и отбор мощности для общесудовых потребителей в ходовых режимах. Для этой цели на главные ДГ агрегаты 1, 3, 4 и 6 навешены генераторы трехфазного переменного тока типа МС99-8/8 ( $P_{НГн} = 500$  кВт;  $U_{НГн} = 400$  В;  $n_{ГГн} = 750$  об/мин).

### 2.2.2 ГЭУ переменного тока судовых ПК

На рисунке 2.3 приведены некоторые основные возможные варианты схемных решений главных цепей ГЭУ переменного тока судовых ПУ, где  $U_i$  – силовые модули преобразовательных устройств, а М.1 и М.2 – роторы двухроторных ГЭД.

К наиболее простым вариантам относится схема главного тока с одним СТ G, ПП частоты U и одним ГЭД М трехфазного переменного тока (рисунок 2.3.1), описание которой достаточно подробно приведено в литературе [48, 49 и др.].

На рисунках 2.3.2 и 2.3.4 число ГГ (G1 и G2) равно числу ГВ, т. е. вся мощность, необходимая для движения судов, делится на наименьшее число генераторов. Такие схемные решения часто используются в турбинных ГЭУ.

При технической реализации схем главного переменного тока ГЭУ, в состав преобразовательных устройств, силовые модули  $U_i$  которых приведены на рисунке 2.3, могут входить индукционные регуляторы, согласующие трансформаторы напряжения, непосредственные или инверторные ПП частоты [46, 50 и др.].

Схема главного тока ГЭУ, представленная на рисунке 2.3.3, обладает повышенной надежностью, обусловленной резервированием генераторных агрегатов и

преобразовательных устройств, и экономичностью в долевых режимах при единичной работе ГГ.

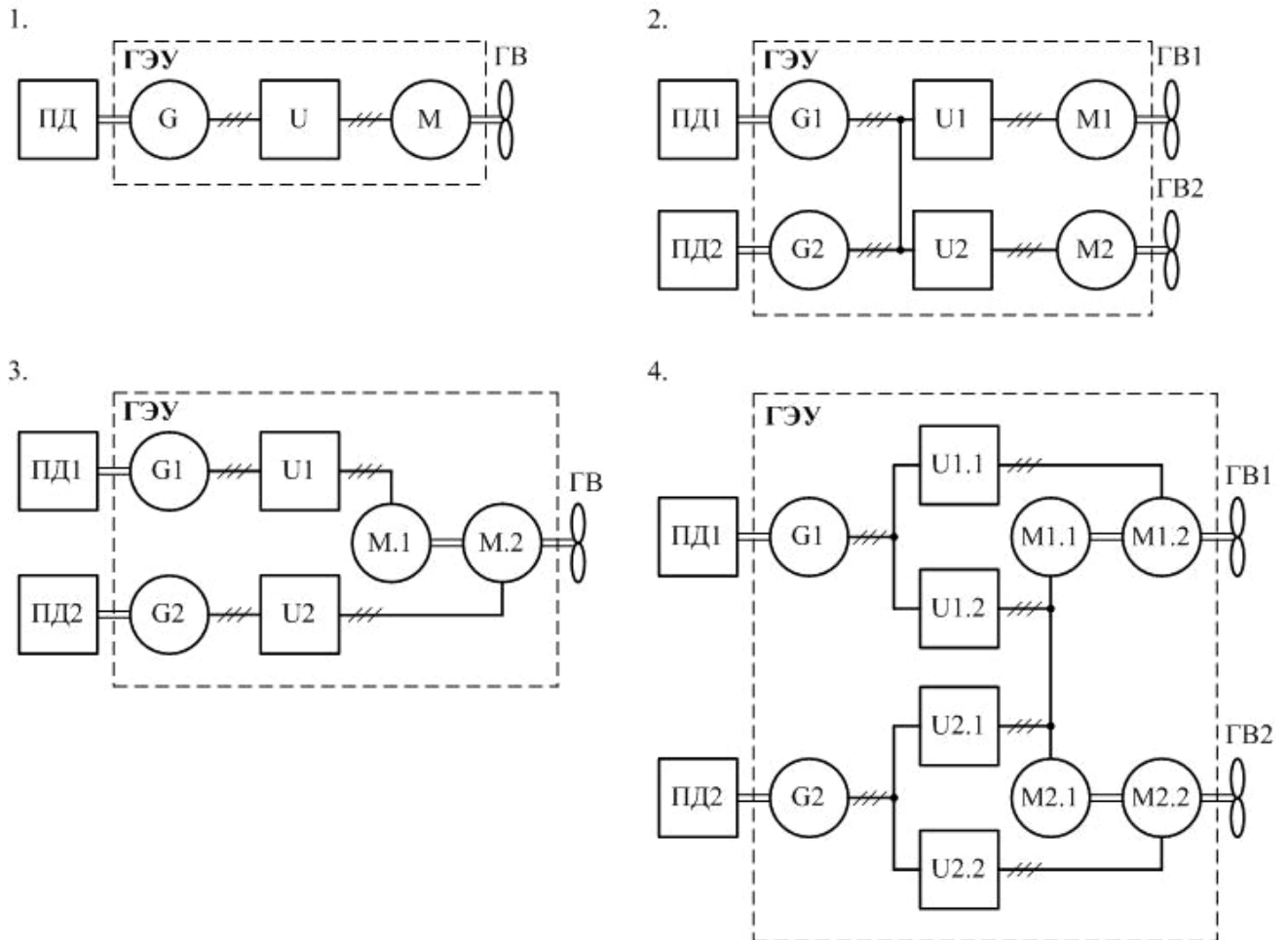


Рисунок 2.3 – Основные возможные варианты схемных решений главных цепей ГЭУ переменного тока судовых ПУ (без главных коммутационных аппаратов)

Активная единичная мощность  $P_{ГГ}$  работающих в режиме ГГ трехфазного переменного тока (рисунки 2.3.1...2.3.4) изменяется прямо пропорционально угловой скорости их роторов  $\omega_{ГГ}$  (частоте вращения  $n_{ПД}$  ПД) и соответственно их частоте тока  $f_{ГГ}$ , т. е. в общем случае

$$P_{ГГ} = \left( \frac{\omega_{ГГ}}{\omega_{ГГн}} \right) P_{\Sigma ГГн} = \left( \frac{f_{ГГ}}{f_{ГГн}} \right) P_{\Sigma ГГн}; \quad f_{ГГ} = \frac{\omega_{ГГ}}{2\pi}. \quad (2.25)$$

При принятии допущения

$$P_{ГЭДн} = M_{ГГ} P_{ГГн} = P_{\Sigma ГГн} \quad (2.26)$$

активная мощность  $P_{ГЭД}$ , потребляемая ГЭД, прямо пропорциональна и частоте  $f_{ГГ}$ , и количеству  $l_{ГГ}$  работающих синхронных ГГ:

$$P_{ГЭД} = \left( \frac{f_{ГГ}}{f_{ГГн}} \right) \left( \frac{l_{ГГ}}{M_{ГГ}} \right) P_{ГЭДн}. \quad (2.27)$$

В случаях установленных на судах двухвальных ПК (рисунки 2.3.2 и 2.3.4), при режимах, когда один трехфазный ГГ работает на два ГЭД, активная мощность, отдаваемая каждому ГЭД, становится меньше. При этом согласно (2.25) необходимо уменьшать угловую скорость  $\omega_{ГГ}$  до значений, при которых мощность  $P_{ГГ}$  работающего в режиме трехфазного ГГ переменного тока будет соответствовать мощности  $2P_{ГЭД}$ .

С учетом кубической согласно (2.3) зависимости для ГВ потребляемой ГЭД мощности  $P_{ГЭД}$  от  $\omega_{ГВ}$  и (2.25)

$$P_{ГГ} = \left( \frac{f_{ГГ}}{f_{ГГн}} \right) P_{\Sigma ГГн} = 2P_{ГЭД} = 2 \left( \frac{f_{ГГ}}{f_{ГГн}} \right)^3 P_{ГЭДн}. \quad (2.28)$$

Таким образом, значение пониженной угловой скорости  $\omega_{ГГ}$  (частоты  $f_{ГГ}$ ) из (2.28), с учетом (2.25), может быть определено по формуле

$$\omega_{ГГ} = f_{ГГ} = \sqrt{\frac{P_{\Sigma ГГн}}{2P_{ГЭДн}}} f_{ГГн}. \quad (2.29)$$

При выполнении условий  $I_{ГГ} = I_{ГГн}$  и  $I_{ГЭД} = 0,5I_{ГЭДн}$

$$U_{ГГ} = \sqrt{\frac{P_{\Sigma ГГн}}{2P_{ГЭДн}}} U_{ГГн}, \quad (2.30)$$

В ГЭУ переменного тока в качестве ГЭД используются асинхронные и синхронные трехфазные ЭД.

Для трехфазных АД переменного тока справедливо выражение

$$\omega_{ГЭД} = \frac{2\pi f_{ГЭД}}{p} (1-s), \quad (2.31)$$

( $\omega_{ГЭД}$  – угловая скорость ротора (вала) ЭД;  $f_{ГЭД}$  – частота подводимого к обмоткам статора ЭД трехфазного напряжения;  $p$  – число пар полюсов обмотки статора;

$s$  – скольжение (относительная скорость)), на основании которого регулирование угловой скорости  $\omega_{ГЭД}$  принципиально возможно изменением частоты  $f_{ГЭД}$ , числа пар полюсов  $p$  и изменением скольжения  $s$ .

Исходя из уравнения статической механической характеристики трехфазных асинхронных ЭД

$$M_{ГЭД} = \frac{m_{ГЭД} U_{ГЭД}^2 R_r'}{\omega_0 s \left( \left( R_s + \frac{R_r'}{s} \right)^2 + \left( X_s + X_r' \right)^2 \right)} \quad (2.32)$$

( $m_{ГЭД}$  – число фаз обмоток статора ГЭД ( $m_{ГЭД} = 3$ );  $\omega_0$  – угловая скорость электромагнитного поля статора ЭД) скольжение  $s$  зависит от значений подводимого к обмоткам статора ЭД фазного напряжения  $U_{ГЭД}$ , активных и индуктивных сопротивлений обмоток статора  $R_s$ ,  $X_s$  и ротора  $R_r$ ,  $X_r$ , соответственно.

К основным достоинствам АД в сравнении с синхронными двигателями следует отнести в первую очередь их высокую надежность, определяемую простотой конструкций и более широкими возможностями регулирования угловой скорости  $\omega_{ГЭД}$  ротора (вала), а к недостаткам – меньшие значения коэффициента мощности ( $\cos\phi$ ) и повышенную чувствительность к колебаниям подводимого к обмоткам статора напряжения  $U_{ГЭД}$  (согласно (2.32)  $M_{ГЭД} \equiv U_{ГЭД}^2$ ).

У синхронных ЭД, в отличие от асинхронных,  $s = 0$ . При этом с учетом (2.31) и (2.3), после некоторых преобразований

$$\omega_{ГЭД} = \omega_0 = \frac{2\pi f_{ГЭД}}{p}; \quad (2.33)$$

$$M_{ГЭД} = \frac{m_{ГЭД} U_{ГЭД} E_s}{\omega_{ГЭД} X_s} \sin \theta. \quad (2.34)$$

В формуле (2.34)  $E_s$  – ЭДС обмоток статора синхронных ЭД;  $\theta$  – угол между векторами  $U_{ГЭД}$  и  $E_s$ .

Исходя из выражения (2.33) регулирование скорости  $\omega_{ГЭД}$  синхронных ГЭД принципиально возможно изменением частоты  $f_{ГЭД}$  и числа пар полюсов  $p$ .

Синхронные двигатели по сравнению с асинхронными ЭД имеют следующие основные преимущества: неизменность угловой скорости  $\omega_{ГЭД}$  в функции нагрузки  $M_{ГВ}$  ( $\omega_{ГЭД} = f(M_{ГВ}) = \text{const}$ ); более высокие значения  $\cos\phi$ , достигающие единицы; меньшую чувствительность к колебаниям напряжения  $U_{ГЭД}$  (на основании (2.34)  $M_{ГЭД} \equiv U_{ГЭД}$ ). К недостаткам синхронных ЭД относится их повышенная конструктивная сложность и как следствие меньшая надежность, а также сложность СУ, обусловленная в первую очередь необходимостью обеспечения приемлемых пусковых режимов, и более ограниченные возможности регулирования угловой скорости  $\omega_{ГЭД}$ .

По результатам выполненных исследований определено, что в настоящее время в судовых ГЭУ переменного тока регулирование скорости валов ГЭД (ГВ) осуществляется изменением частоты  $f_{ГЭД}$  с одновременным изменением фазного напряжения  $U_{ГЭД}$  посредством ПП частоты, входящих в состав силовых модулей  $U_i$  – рисунки 2.3.1...2.3.4.

Выбор типа ПП частоты определяется комплексом технико-экономических и эксплуатационных показателей, включающих схемные решения, элементные базы, мощности, диапазоны регулирования выходных частот и напряжений, стоимость, надежность и др.

У непосредственных ПП частоты коммутация токов осуществляется напряжением питающей сети ( $U_{ГГ}$ ).

В этом случае выходная частота напряжения  $U_{ГЭД}$  непосредственных ПП частоты  $f_{НПЧ}$  ( $f_{НПЧ} = f_{ГЭД}$ ) при дискретном регулировании может быть определена по формуле [51]

$$f_{НПЧ} = \frac{m_{ГГ} f_{ГГ}}{2k + m_{ГГ}}; \quad k = n_{нс} - 1. \quad (2.35)$$

В (2.35)  $m_{ГГ}$  – число фаз ГГ;  $n_{нс}$  – количество полувольт в выходном полупериоде напряжения;  $k = 0, 1, 2, 3 \dots (N_{нс} - 1)$  ( $N_{нс}$  – наибольшее значение числа полувольт в выходном полупериоде напряжения).

При плавном регулировании частоты выходного напряжения непосредственных ПП частоты

$$f_{\text{НПЧ}} = \frac{\pi m_{\Gamma\Gamma} f_{\Gamma\Gamma}}{\pi(2k + m_{\Gamma\Gamma}) + 2\pi f_{\Gamma\Gamma} t_n}, \quad (2.36)$$

где  $t_n$  – время пауз (задержек) между переключениями групп полупроводниковых приборов (ППр) силовых модулей ПП частоты.

Относительно инверторных ПП частоты достоинством непосредственных преобразователей является сравнительная конструктивная простота, определяемая естественной коммутацией токов, позволяющей исключить из схемных решений коммутирующие конденсаторы и дополнительные компоненты для протекания реактивных составляющих токов и сглаживания пульсаций квазипостоянного тока, и как следствие – их повышенная надежность. Основные недостатки непосредственных преобразователей связаны с ограниченным диапазоном регулирования выходных частот  $f_{\text{НПЧ}}$ , максимальное значение которой согласно (2.35) и (2.36) не превышает  $f_{\Gamma\Gamma}$ , и формами кривых выходных напряжений, содержащих широкий спектр гармоник.

У инверторных ПП частоты выходное квазипеременное напряжение  $U_{\text{ГЭД}}$  заданной частоты  $f_{\text{НПЧ}}$  формируется из выпрямленного напряжения  $U_d$  и не зависит от частоты  $f_{\Gamma\Gamma}$ , что относится к достоинствам таких преобразователей.

При соединении обмоток статора ГЭД в «звезду» действующее значение фазного напряжения  $U_{\text{ГЭД}}$  определяется из выражения

$$U_{\text{ГЭД}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_{\text{ГЭД}}^2(\vartheta) d\vartheta} = \frac{\sqrt{2}}{3} U_d, \quad (2.37)$$

а при соединении в «треугольник» – из выражения

$$U_{\text{ГЭД}} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_d. \quad (2.38)$$

В формуле (2.37)  $\vartheta$  – переменный временной угол [51] ( $\vartheta = 2\pi f_{\text{ГЭД}} t$ ).

Кроме того, к достоинствам инверторных ПП частоты по сравнению с непосредственными преобразователями относится более широкий диапазон регулиро-

вания выходных частот  $f_{НПЧ}$ , обусловленный возможностью формирования частот со значениями как меньшими значений  $f_{ГГ}$ , так и превышающими их.

К недостаткам инверторных ПП частоты следует отнести достаточную конструктивную сложность, связанную с необходимостью сглаживания до допустимых значений пульсаций выпрямленного тока и компенсации реактивной мощности.

В качестве примера на рисунке 2.4 приведена ПУ со схемой ГЭУ главного переменного тока малых гидрографических судов типа «Вайгач» проекта 19910.

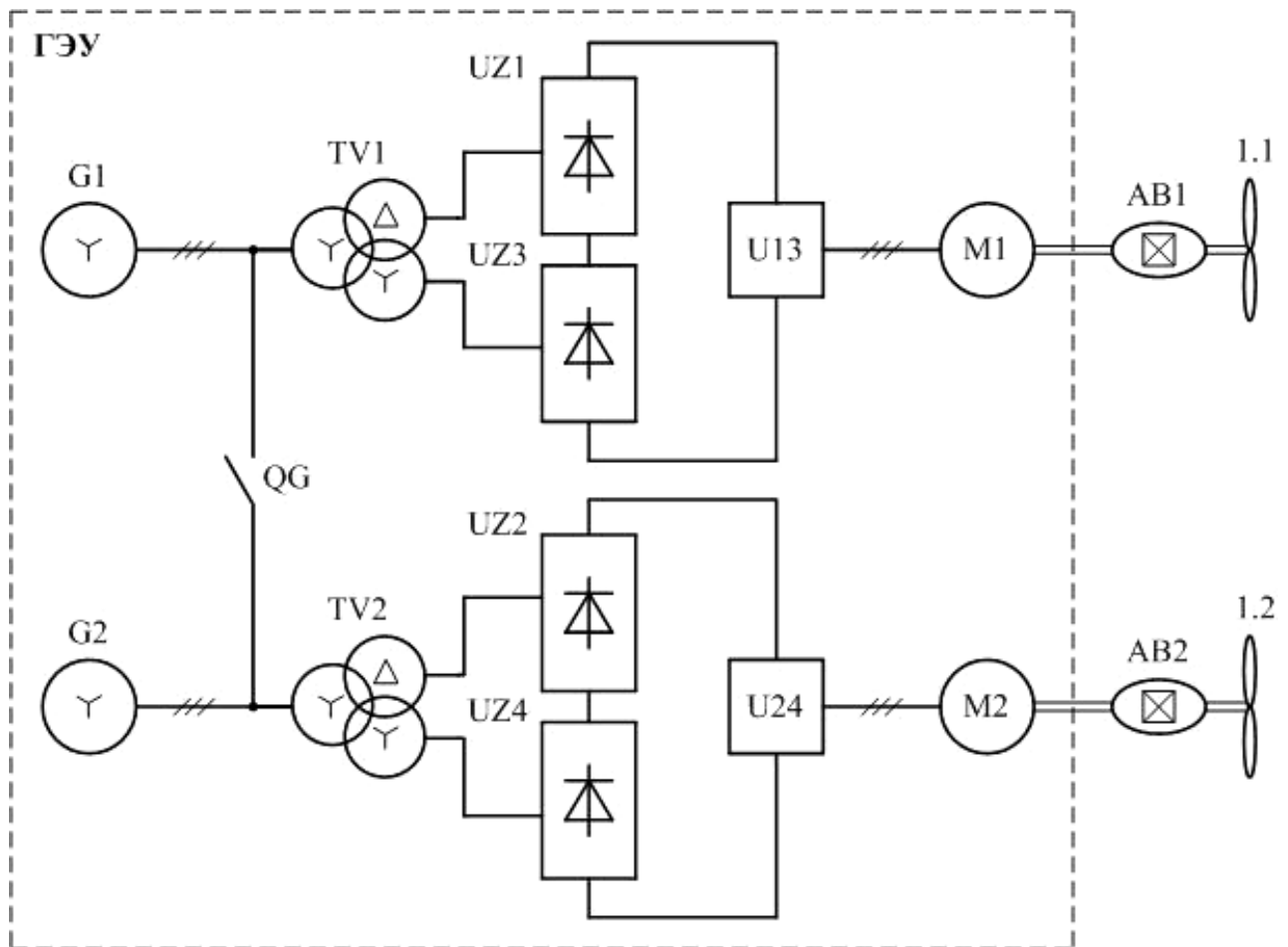


Рисунок 2.4 – Вариант ПУ малых гидрографических судов типа «Вайгач» (проект 19910), включающий схему ГЭУ главного переменного тока

К кратким техническим характеристикам малых гидрографических судов типа «Вайгач» относятся: длина судна наибольшая  $L_{\text{сmax}} = 56,4$  м; ширина габаритная  $B_{\text{сг}} = 11,2$  м; осадка  $d_{\text{с}} = 3,0$  м; водоизмещение полное  $D_{\text{сн}} = 1200$  т; скорость судна максимальная  $v_{\text{сmax}} = 12,5$  уз [52].

На рисунке 2.4: G1, G2 – синхронные ГГ трехфазного переменного тока; QG – избирательный переключатель ГГ; TV1, TV2 – трехфазные разделительно-согласующие трансформаторы напряжения; UZ1...UZ4 – неуправляемые мостовые выпрямители; U13...U24 – силовые модули инверторов; M1, M2 – трехфазные асинхронные ГЭД с короткозамкнутыми роторами; AB1, AB2 – ВРК; 1.1, 1.2 – движители (ВФШ).

Представленная на рисунке 2.4 схема достаточно полно отражает основные особенности ГЭУ переменного тока дальневосточных судов и отличается своей индивидуальностью.

Схема включает в себя четыре главных ЭМ: два синхронных ГГ трехфазного переменного тока ( $P_{ГГн} = 1000$  кВт;  $U_{ГГн} = 400$  В); два асинхронных ГЭД переменного тока с короткозамкнутыми роторами типа АДР-550-4 ( $P_{ГЭДн} = 550$  кВт;  $U_{ГЭДн} = 960$  В; номинальная частота вращения ГЭД  $n_{ГЭДн} = 1500$  об/мин); два трехфазных трехобмоточных повышающих трансформатора типа ТСЗ-800/0.38/0.55 ОМ4 ( $S_n = 800$  кВА), два инверторных ПП частоты типа ПЧ-700-960-50-ОМ4 [53, 54]. Каждый силовой модуль инверторных ПП частоты состоит из двух неуправляемых полупроводниковых выпрямителей UZ1, UZ3 (UZ2, UZ4) и инверторов U13 (U24) – рисунок 2.4.

На основании анализа алгоритма управления схемы ГЭУ (рисунок 2.4) возможны три основных варианта схем главного тока: отдельная одновременная работа ГГ G1 и G2 на ГЭД M1 и M2, соответственно; работа ГГ G1 одновременно на ГЭД M1 и M2; работа ГГ G2 одновременно на ГЭД M1 и M2.

Число работающих главных ЭМ в схеме на рисунке 2.4 определяется режимами работы ГЭУ, к основным из которых относятся режимы полного и экономичного хода, а также режим промера глубин [53].

При режиме полного хода обеспечивается отдельная работа схем главного тока ГЭУ ( $\bar{x}_{QG}$ ) от двух ГГ G1 и G2. При этом функции замкнутых контуров  $F_{nx,i}$  (функции рабочих состояний электротехнического комплекса ГЭУ), определяемые условиями состояний рабочих компонентов, с помощью ФАЛ могут быть представлены в следующем виде:



$$\begin{aligned}
 F_{nx,1} &= x_{G1} \wedge x_{TV1} \wedge (x_{UZ1} \wedge x_{UZ3} \wedge x_{U13}) \vee x_{M1}; \\
 F_{nx,2} &= x_{G2} \wedge x_{TV2} \wedge (x_{UZ2} \wedge x_{UZ4} \wedge x_{U24}) \vee x_{M2}.
 \end{aligned}
 \tag{2.39}$$

В случаях режимов экономичного хода и промера глубин один из ГГ с различными степенями загрузки работает на два ГЭД. Функции замкнутых контуров  $F_{\text{эx}(nz),i,j}$ , представляются как

$$\begin{aligned}
 F_{\text{эx}(nz),1,2} &= x_{G1} \wedge \bar{x}_{G2} \wedge x_{QG} \wedge x_{TV2} \wedge (x_{UZ2} \wedge x_{UZ4} \wedge x_{U2,4}) \wedge x_{M2}; \\
 F_{\text{эx}(nz),2,1} &= \bar{x}_{G1} \wedge x_{G2} \wedge x_{QG} \wedge x_{TV1} \wedge (x_{UZ1} \wedge x_{UZ3} \wedge x_{U1,3}) \wedge x_{M1}.
 \end{aligned}
 \tag{2.40}$$

Функции  $F_{nx,i}$ ,  $F_{\text{эx}(nz),i,j}$  в (2.39) и (2.40) отражают варианты включения схем главного тока (соединения компонентов  $G_i$ ,  $QG$ ,  $TV_i$ ,  $UZ_k$ ,  $U_{i,k}$  и  $M_i$  (состояний аргументов  $x_{G_i}$ ,  $x_{QG}$ ,  $x_{TV_i}$ ,  $x_{UZ_k}$ ,  $x_{U_{ik}}$  и  $x_{M_i}$ ) ( $i = 1, 2; j = 1, 2; k = 1 \dots 4$ )).

Из индивидуальных особенностей схемы главного тока ГЭУ малых гидрографических судов типа «Вайгач» необходимо отметить следующее. В состав ПУ судов входит две ВРК АВ1 и АВ2 (рисунок 2.4) серии «SP» фирмы Steerprop (Финляндия) [53], оснащенные многодисковыми муфтами с устройствами проскальзывания. При повороте ВРК на  $180^\circ$  судно изменяет направление движения на противоположное без реверса ГЭД. Отсутствие режимов рекуперативного торможения ГЭД, которыми как правило сопровождаются реверсы АД, позволило использовать в схемах главного тока вместо непосредственных инверторные преобразователи частоты, силовые модули которых содержат по два неуправляемых мостовых выпрямителя  $UZ1$ ,  $UZ3$  и  $UZ2$ ,  $UZ4$  и автономные инверторы напряжения  $UZ13$  и  $UZ24$  (рисунок 2.4) на базе IGBT транзисторов [21].

На судах типа «Вайгач» впервые в отечественном судостроении применены единые ЭЭС, предназначенные для питания ГЭУ и общесудовых приемников ЭЭ.

Результаты исследований функционирования единых ЭЭС в основных режимах работы ГЭУ показали, что наибольшее значение коэффициента несинусоидальной кривой напряжения  $K_u$ , определяемого по формуле (1.10) (гл. 1, п. 1.4), не превысило допустимое РМРС значение (10,0 %) и составило 8,1 % для режима экономичного хода, а наименьшее значение  $\cos\varphi = 0,86$  при режиме промера глубин [53].

### 2.2.3 Судовых ПК с ГЭУ двойного рода тока

В случаях построения ГЭУ двойного рода тока, определяемых родом тока главных ЭМ (ГГ и ГЭД), принципиально возможны два варианта: ГЭУ постоянно-переменного тока и переменного-постоянного тока.

Выполненный анализ позволяет сделать вывод о том, что в настоящее время современное мировое и отечественное судостроение характеризуется недостаточным опытом проектирования и изготовления судовых ГЭУ постоянно-переменного тока для судов надводного плавания.

Общие тенденции развития судовой электротехники, тесно связанные с современными достижениями в области научных исследований и промышленного производства преобразовательной техники, предопределили динамичное развитие ГЭУ переменного-постоянного двойного рода тока.

На рисунке 2.5 представлены судовые ПУ, включающие ГЭУ двойного (переменно-постоянного) рода тока с некоторыми основными возможными вариантами схем соединения главных ЭМ ( $G_i$  и  $M_i$ ) и силовые модули преобразовательных устройств  $UZ$ .

Схема главного тока с одним синхронным ГГ  $G$ , преобразователем  $UZ$  и одним ГЭД постоянного тока  $M$ , приведенная на рисунке 2.5.1, относится к наиболее простым вариантам схемных решений ГЭУ, достаточно подробно описана в литературе [49, 55 и др.] и не требует отдельного рассмотрения.

Схемы главного двойного рода тока ГЭУ, представленные на рисунках 2.5.2 и 2.5.4, характеризуются повышенной надежностью, обусловленной резервированием генераторных агрегатов, и экономичностью в долевым режиме при единичной работе ГГ.

На рисунке 2.5.3 число трехфазных ГГ переменного тока ( $G_1$  и  $G_2$ ) равно числу ГВ ( $ГВ_1$  и  $ГВ_2$ ), т. е. вся мощность, необходимая для движения судов, делится на наименьшее число генераторов.

Основные принципиальные особенности функционирования трехфазных синхронных генераторов в качестве ГГ схем главного тока ГЭУ рассмотрены в п. 2.3.2, а ЭД постоянного тока, выполняющих функции ГЭД – в п. 2.3.1.

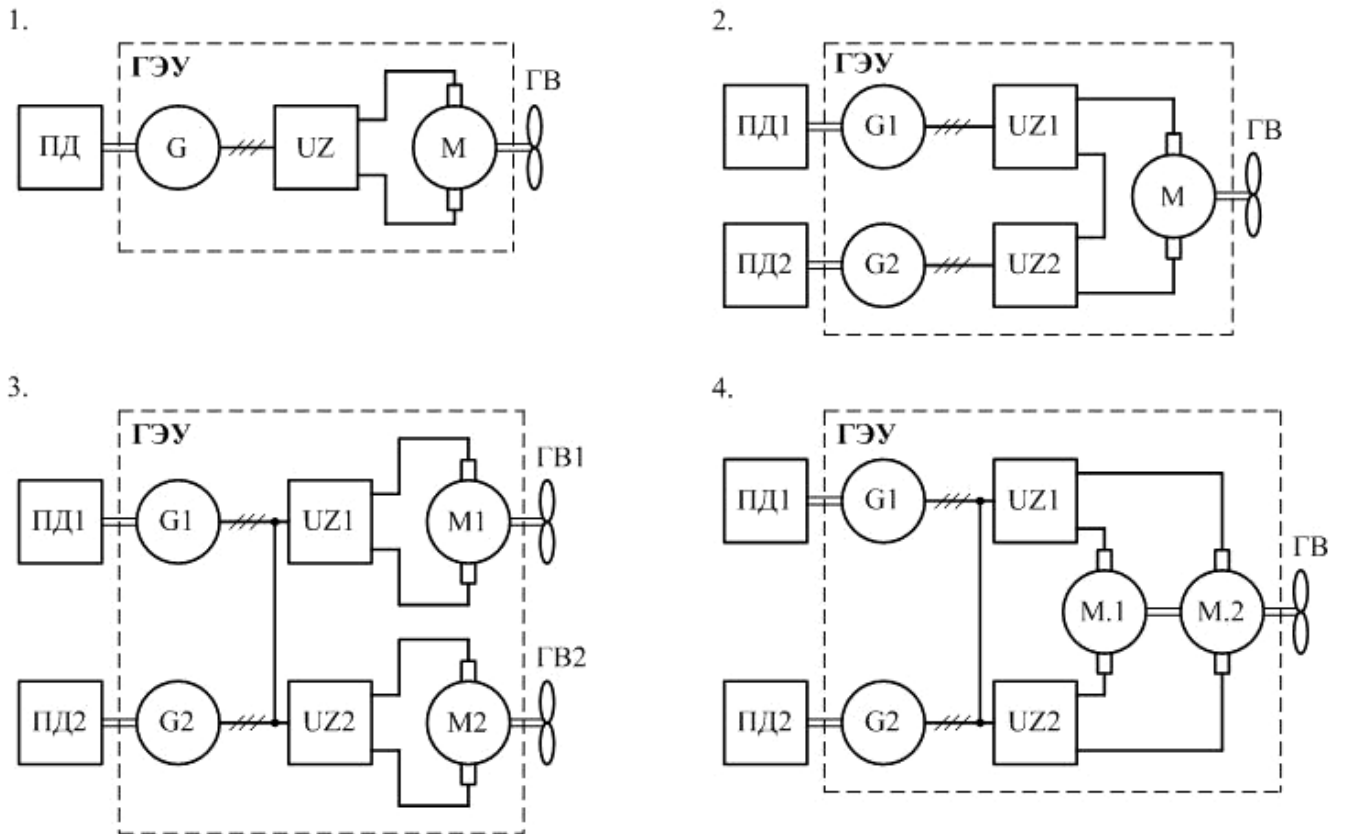


Рисунок 2.5 – Основные возможные варианты схемных решений главных цепей ГЭУ двойного (переменно-постоянного) рода тока судовых ПУ (без главных коммутационных аппаратов)

Согласно рисункам 2.5.1...2.5.4 в состав схем главного переменного-постоянного тока ГЭУ входят силовые модули UZ, представляющие собой неуправляемые или управляемые выпрямители.

Выбор варианта выпрямительного устройства зависит от комплекса технико-экономических и эксплуатационных показателей, на основании которых определяются мощности, схемные решения, элементные базы, стоимость, показатели надежности и др.

В ГЭУ двойного рода тока наиболее широко используются неуправляемые и управляемые выпрямители, схемные решения силовых модулей которых основаны на использовании симметричных трехфазных мостовых двухполупериодных схем выпрямления. Пульсации выпрямленного (выходного) напряжения  $U_d$  таких выпрямителей по данным, приведенным в [47], составляют около 6 %.

Функционирование неуправляемых ППр является частным случаем работы управляемых выпрямителей при угле управления  $\alpha$ , равном нулю.

При этом среднее значение выпрямленного (выходного) напряжения  $U_{d0}$  зависит от напряжения питающей сети ( $U_{ГГ}$ ) [56]:

$$U_{d0} = \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{+\frac{\pi}{6}} U_{ГГ\text{max}} \cos(2\pi f_{ГГ} t) d(2\pi f_{ГГ} t) = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{ГГ}, \quad (2.41)$$

где  $U_{ГГ\text{max}}$  – амплитудное линейное напряжение ГГ трехфазного переменного тока.

Выражение внешней характеристики преобразователя может быть представлено в следующем виде [51]:

$$U_d \approx U_{d0} \cos \alpha - (\Delta U_{ПП} + (m_{ГГ} f_{ГГ} L_{ГГ} + R_{ГГ}) I_d); \quad \alpha = 0. \quad (2.42)$$

В (2.42)  $\Delta U_{ПП}$  – падение напряжения на силовых ППр;  $L_{ГГ}, R_{ГГ}$  – эквивалентная индуктивность и активное сопротивление обмоток статора ГГ;  $I_d$  – среднее выпрямленное значение тока ( $I_d = I_{ГЭД}$ ).

Таким образом, при наличии в схемах главного тока ГЭУ неуправляемых выпрямителей регулирование угловой скорости якорей ГЭД (частоты вращения валов ГВ) при практически неизменной частоте вращения ПД и СГ возможно изменением величин токов возбуждения СГ и ГЭД, а при использовании управляемых выпрямителей к основным вариантам регулирования угловой скорости якорей ГЭД относится изменение угла управления силовых управляемых ППр  $\alpha$ .

В этом случае, на основании (2.18), с учетом (2.42)

$$\omega_{ГЭД} = \frac{U_{d0} \cos \alpha - (\Delta U_{ПП} + (m_{ГГ} f_{ГГ} L_{ГГ} + R_{ГГ}) I_d)}{k_{ГЭД} \Phi_{ГЭД}} - \frac{M_{ГЭД} R_{\Sigma Я ГЭД}}{(k_{ГЭД} \Phi_{ГЭД})^2}. \quad (2.43)$$

При работе управляемых выпрямителей на ГЭД возможны два основных варианта выходных характеристик, обусловленных режимами непрерывных и прерывистых токов, которые достаточно подробно рассмотрены в [51].

При необходимости сглаживания пульсаций выпрямленного тока  $I_d$  к эффективным способам относится применение СГ с двумя статорными обмотками, сдвинутыми в пространстве на  $30^\circ$  и подключенными к отдельным трехфазным мостовым выпрямителям [47].

К особенностям научно-технических решений схем главного тока ГЭУ переменного-постоянного тока пропульсивных комплексов основных типов судов с электродвижением Дальневосточного бассейна относится подключение и отключение главных ЭМ без разрывов контуров схем главного тока. Независимо от числа ГВ в ГЭУ двойного рода тока практически не ограничено количество контуров с последовательно-переменным соединением силовых модулей выпрямителей и якорей ГЭД, и с параллельным соединением выпрямителей.

В качестве примера при рассмотрении ГЭУ двойного рода тока (переменно-постоянного) из всего многообразия использована схема главного тока ледоколов типа «Капитан Сорокин» проекта 1101 имеющих следующие краткие основные технические характеристики: наибольшая длина судна  $L_{\text{сmax}} = 132,0$  м; наибольшая ширина  $B_{\text{сmax}} = 26,7$  м; осадка  $d_c = 8,5$  м; водоизмещение полное  $D_{\text{сн}} = 17280$  т; скорость судна  $v_c = 19,0$  уз), наиболее полно отражающая характерные особенности таких ГЭУ судов Дальневосточного бассейна и имеющая индивидуальные отличия – рисунок 2.6.

Схема (рисунок 2.6) включает в себя девять главных ЭМ (шесть СГ трехфазного переменного тока G1...G6 типа HSSUL 18/1057 D1 (полная номинальная мощность  $S_{ГГн} = 3800$  кВА; номинальное напряжение  $U_{ГГн} = 660$  В;  $\cos\varphi_{ГГн} = 0,8$ ; номинальная частота вращения  $n_{ГГн} \approx 430$  об/мин) и три двухъякорных ГЭД постоянного тока M1...M3 типа GTOUL 180/1006 D1 ( $P_{ГЭДн} = 2 \times 2700$  кВт;  $U_n = 800$  В; частота вращения якоря ГЭД  $n_{ГЭД} = 120$  об/мин)), шесть неуправляемых выпрямителей UZ1...UZ6 мощностью по 2870 кВт каждый на диодах В800-20 отечественного производства с их общим количеством 30 штук в одном выпрямителе.

Набор схем главного тока ГЭУ, соответствующих заданным режимам работы, осуществляется посредством генераторных разъединителей QS1...QS6, переключателей Q1...Q6, автоматических выключателей QF1...QF6 и автоматических выключателей повышенного быстродействия QF1.2...QF3.2 – рисунок 2.6.

По результатам анализа алгоритма управления схемы ГЭУ (рисунок 2.6) в каждый из трех контуров схем главного тока могут входить один или два из шести синхронных ГГ G1...G6, один или два неуправляемых мостовых выпрямите-

ля UZ1...UZ6 и один из трех двухъякорных ГЭД с последовательно соединенными якорями M1.1 и M1.2, M2.1 и M2.2, M3.1 и M3.2.

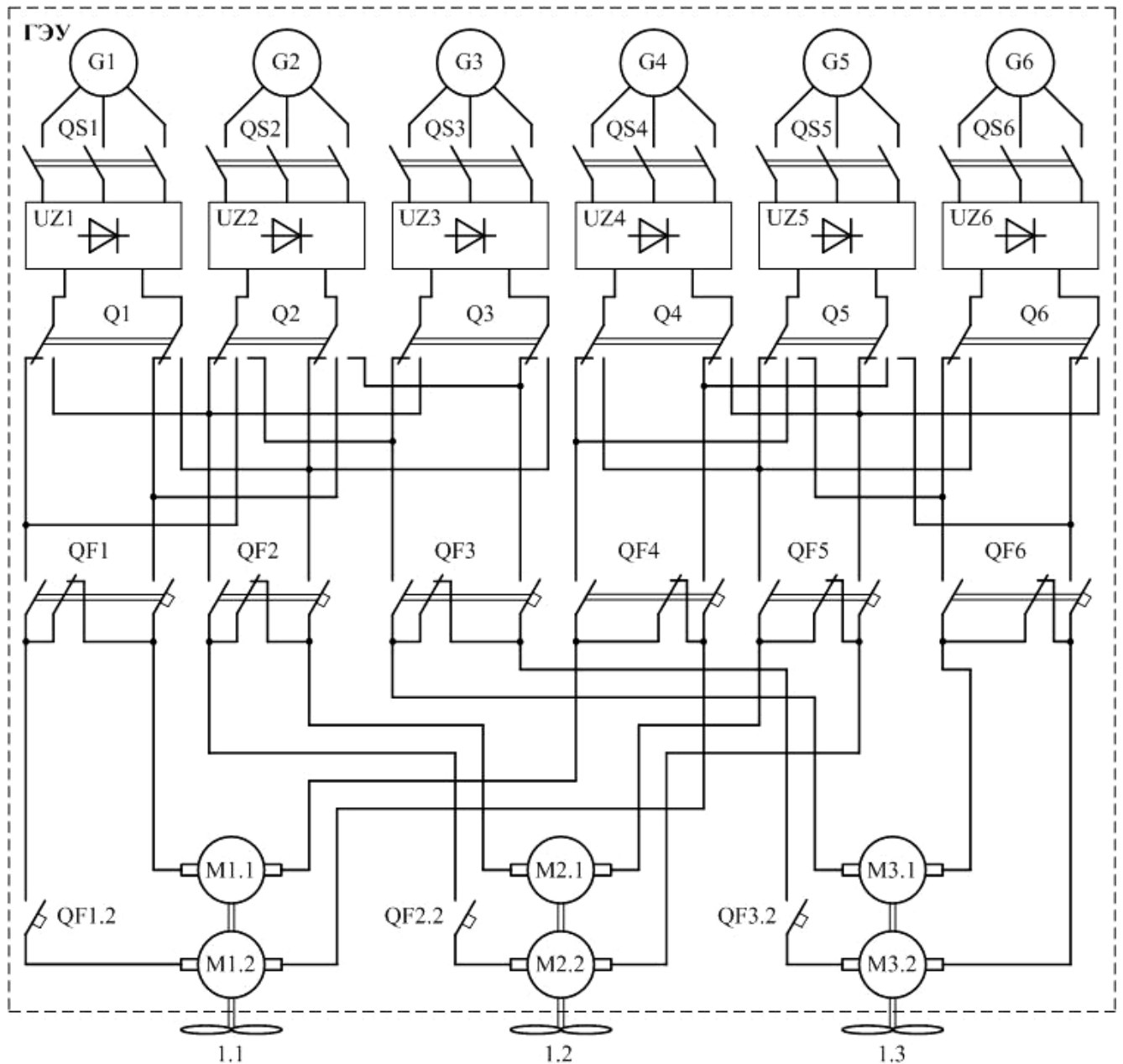


Рисунок 2.6 – ПУ ледоколов типа «Капитан Сорокин» (проект 1101), включающая схему ГЭУ двойного (переменно-постоянного) рода тока

Число работающих главных ЭМ и выпрямителей в схеме, приведенной на рисунке 2.6 определяется режимами работы ГЭУ [49].

Для режима полного хода условия состояний элементов (коммутационных аппаратов) в контурах схем главного тока ГЭУ (рисунок 2.6) с помощью ФАЛ могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned}
y_{1,4}(x) &= x_{QS1} \wedge x_{QS4} \wedge x_{Q1} \wedge x_{Q4} \wedge x_{QF1} \wedge x_{QF4} \wedge x_{QF1.2}; \\
y_{2,5}(x) &= x_{QS2} \wedge x_{QS5} \wedge x_{Q2} \wedge x_{Q5} \wedge x_{QF2} \wedge x_{QF5} \wedge x_{QF2.2}; \\
y_{3,6}(x) &= x_{QS3} \wedge x_{QS6} \wedge x_{Q3} \wedge x_{Q6} \wedge x_{QF3} \wedge x_{QF6} \wedge x_{QF3.2}.
\end{aligned} \tag{2.44}$$

В (2.44)  $y_1(x) \dots y_6(x)$  – функции состояний главных контактов  $x_{QSi}$  генераторных разъединителей  $QSi$ ,  $x_{Qi}$  переключателей  $Qi$ ,  $x_{QFi}$  автоматических выключателей  $QFi$  и  $x_{QFjk}$  автоматических выключателей  $QFjk$ , обеспечивающих набор схем главного тока для рассматриваемого режима ( $i = 1 \dots 6$ ;  $j = 1 \dots 3$ ;  $k = 1, 2$ ).

При этом функции замкнутых контуров  $F_{nxj}(x, y)$  имеют вид:

$$\begin{aligned}
F_{nx1}(x, y) &= x_{G1} \wedge x_{G4} \wedge x_{UZ1} \wedge x_{UZ4} \wedge x_{M1.1} \wedge x_{M1.2} \wedge y_{1,4}(x); \\
F_{nx2}(x, y) &= x_{G2} \wedge x_{G5} \wedge x_{UZ2} \wedge x_{UZ5} \wedge x_{M2.1} \wedge x_{M2.2} \wedge y_{2,5}(x); \\
F_{nx3}(x, y) &= x_{G3} \wedge x_{G6} \wedge x_{UZ3} \wedge x_{UZ6} \wedge x_{M3.1} \wedge x_{M3.2} \wedge y_{3,6}(x).
\end{aligned} \tag{2.45}$$

В (2.45)  $x_{Gi}$  – состояния ГГ  $Gi$  ( $i$  – порядковый номер ГГ ( $i = 1 \dots 6$ ));  $x_{Mi.j}$  – состояния ГЭД  $Mij$  ( $i$  – номер ГЭД ( $i = 1 \dots 3$ );  $j$  – номера якоря ГЭД ( $j = 1, 2$ )).

Таким образом, исходя из (2.44) и (2.45) в режиме полного хода включены три контура и работают все шесть ГГ ( $G1 \dots G6$ ) и три двухъякорных ГЭД ( $M1 \dots M3$ ): соединенные попеременно-последовательно  $G1, M1.1, G4$  и  $M1.2$  – первый контур;  $G2, M2.1, G5$  и  $M2.2$  – второй контур;  $G3, M3.1, G6$  и  $M3.2$  – третий контур. При этом каждый якорь всех ГЭД обеспечивается номинальным напряжением 800 В от двух ГГ, работающих в номинальных режимах.

При номинальной работе в контуре одного ГГ напряжение каждого якоря ГЭД составляет 400 В.

Коммутационно-защитной аппаратурой схем главного тока ГЭУ (рисунок 2.6) обеспечивается при необходимости взаимозаменяемость ГГ: генератор  $G2$  может работать вместо ГГ  $G1$  или  $G3$ ,  $G5$  – вместо  $G4$  или  $G6$ ;  $G1$  и  $G4$ ,  $G1$  и  $G6$ ,  $G3$  и  $G4$ ,  $G3$  и  $G6$  – вместо генераторов  $G2$  и  $G5$ .

Регулирование частоты вращения ГВ  $n_{ГВi}$  (угловой скорости якорей ГЭД  $\omega_{ГЭДi}$  (2.43) (для неуправляемых выпрямителей  $\alpha = 0$ )) осуществляется изменением напряжения  $U_{d0}$  (2.41) посредством регулирования тока возбуждения СГ, а реверс ГВ – изменением полярности тока возбуждения ГЭД.

Из индивидуальных особенностей схемы главного тока ГЭУ тока ледоколов типа «Капитан Сорокин» необходимо отметить повышенную надежность, обусловленную большим количеством вариантов соединения главных ЭМ и высокой степенью их резервирования, а также наличие автоматических выключателей QF1...QF6 (рисунок 2.6), при отключении которых в первую очередь размыкаются их замыкающие контакты и без задержки времени замыкаются размыкающие контакты, чем обеспечивается коммутация главных цепей практически без их разрыва.

### 2.3 Основные варианты научно-технических решений СУ ГЭУ

СУ относятся к наиболее динамично развивающимся компонентам судовых ГЭУ благодаря современным достижениям в области судовой электротехники и развитию полупроводниковой техники. К основным составным частям СУ ГЭУ относятся СВ (приложение П.2.2), основанные на непосредственном или косвенном регулировании возбуждения главных ЭМ [57], которые обеспечивают заданные статические и сопутствующие динамические режимы работы судовых ПК посредством формирования необходимых механических характеристик ГЭД  $\omega_{ГЭД} = f(M_{ГЭД})$ . Согласно требованиям РМРС [25] каждая СВ должна получать питание по отдельному фидеру.

Непосредственное регулирование нашло применение в судовых ГЭУ относительно малой мощности, у которых ток возбуждения главных ЭМ не превышает как правило 20 А.

При косвенном регулировании основными компонентами СВ ГЭУ являются возбудительные агрегаты, выполняющие функции усилителей мощности, которые в общем случае имеют конструктивное исполнение в виде электромеханических или статических преобразователей.

К электромеханическим относятся в первую очередь возбудители на основе генераторов постоянного тока независимого или параллельного возбуждения (самовозбуждения), смешанного (компаундного) возбуждения, трехобмоточных ге-



нераторов, электромашинных усилителей (ЭМУ) поперечного и продольного поля, а также электромеханических регуляторов, а к статическим – на основе магнитных усилителей и полупроводниковых преобразователей.

СВ, включающие в качестве возбудителей генераторы постоянного тока независимого или параллельного возбуждения, отмечены на ранних электроходах (независимого – для возбуждения ГГ и ГЭД грузопассажирского судна «Россия» (1938 г.) [45, 58], ГГ – танкера «Генерал Ази Асланов» (1950 г.), ГЭД – ледоколов типа «Капитан Белоусов» (1954 г.) [50, 58]; параллельного – для возбуждения ГЭД пассажирского судна «Абхазия» (1956 г.) [58] и др.

При использовании в СВ генераторов постоянного тока параллельного или независимого возбуждения (независимых возбудителей) не удается обеспечить качественные механические характеристики и номинальную загрузку ПД в диапазоне работы ГВ от хода судна в свободной воде до швартового режима.

Возбудители на основе генераторов смешанного возбуждения установлены в ГЭУ грузопассажирского судна «Россия» – для возбуждения ГЭД [45, 58], сухогрузного судна «Чиатури» (1947 г.) [58] – в схеме возбуждения ГГ и др.

Использование возбудителей на основе генераторов смешанного (компаундного) возбуждения, имеющих дополнительно последовательные обмотки возбуждения, позволяет обеспечить более приемлемые по сравнению с параллельными и независимыми возбудителями механические характеристики ЭД в составе судовых ГЭУ.

Наиболее широкое применение из электромеханических преобразователей в системах возбуждения ГЭУ нашли трехобмоточные возбудители. Они используются на буксирах типа «Атлант» (1959 г.) – в СВ ГГ [50, 58], ледоколах типа «Москва» (1960 г.) – в схемах возбуждения ГГ и ГЭД [45, 57], паромеханизмах накатных пассажирских типа «Сахалин» (1973 г.) – для возбуждения ГГ [18], и многих других.

Трехобмоточные генераторы в СВ судовых ГЭУ содержат три обмотки возбуждения – независимую, посредством изменения тока возбуждения которой осуществляется основное регулирование характеристик главных ЭМ, параллельную, намагничивающая сила (НС) которой направлена согласно НС обмотки не-

зависимого возбуждения и последовательную, НС которой направлена встречно НС обмоток независимого и параллельного возбуждения.

СВ на основе трехобмоточных генераторов (возбудителей) относятся к относительно простым и надежным СВ главных ЭМ судовых ГЭУ. Такие СВ обеспечивают удовлетворительные статические характеристики ГЭД электроходов и практически одинаковые нагрузки на ПД в режимах хода судна в свободной воде и в швартовом, нормальную работу ГЭУ при заклиниваниях ( $M_{ГЭД} = M_{ст}$ , где  $M_{ст}$  – момент стоянки ГЭД под током) и оголении ГВ ( $\omega_{ГЭД} = \omega_0$ , где  $\omega_0$  – угловая скорость вала ГЭД на холостом ходу). При работах ГВ на промежуточных характеристиках оказываются несколько перегруженными ПД, а в швартовном режиме – главные ЭМ. Такие СВ нашли широкое применение на различных эксплуатационных типах судов, от которых не требуются повышенные маневренные качества.

В СВ судовых ГЭУ нашли применение ЭМУ с поперечным и продольным полем. ЭМУ поперечного поля оснащены схемы возбуждения ГГ и ГЭД ГЭУ ледокольно-транспортных судов типа «Лена» (1954 г.) [40, 58], ГЭД ГЭУ ледоколов типа «Добрыня Никитич» (1960 г.) [49], а продольного – схемы возбуждения ГГ буксира-спасателя «Голиаф» (1958 г.) [50, 58], ГГ и ГЭД ледокольно-транспортных судов типа «Амгуэма» (1962 г.) [40, 57] и др.

ЭМУ по сравнению с трехобмоточными возбудителями обеспечивают более полную загрузку ПД. В номинальных режимах ЭМУ работают на насыщенной части кривой намагничивания. Особое внимание уделяется мероприятиям, направленным на снижение остаточной намагниченности ЭМУ. К недостаткам ЭМУ относятся и их относительная конструктивная сложность, обусловленная в частности наличием большого числа обмоток и двойного комплекта щеток, и как следствие – сложность эксплуатации.

Электромеханические регуляторы установлены в частности в СВ ГЭУ больших кабельных судов типа «Ингул» (1962 г.) [16].

Использование электромеханических регуляторов является исключением из общих правил схемных решений СВ судовых ГЭУ на основе электромеханических преобразователей.

Магнитные усилители в качестве статических возбудителей установлены в СВ главных ЭМ ГЭУ судов-ледоколов типа «Москва» – для управления добавочным возбуждением ГЭД [45, 49], килекторных судов типа «КИЛ» (1965 г.) – в схемах возбуждения ГГ и ГЭД [16] и др.

Из полупроводниковых преобразователей в СВ судовых ГЭУ используются неуправляемые и управляемые полупроводниковые выпрямители, которые на судах отечественного торгового и рыбопромыслового флота начали внедряться с середины 60-х годов XX в. Тиристорные (управляемые) выпрямители впервые были установлены в СВ ГЭУ ледокола «Киев» (1965 г.) [47]. На рыбоконсервном траулере «Наталия Ковшова» (1966 г.) СВ ГГ и ГЭД содержат несимметричные трехфазные мостовые схемы на основе диодов и тиристоров [57].

Тиристорные возбудители входят в состав СВ ГЭУ ледоколов типа «Ермак» (1974 г.) (мостовые реверсивные – для возбуждения ГГ, а мостовые нереверсивные – для возбуждения ГЭД), типа «Капитан М. Измайлов» (1976 г.) (сдвоенные мосты, включенные встречно-параллельно – для возбуждения ГЭД), типа «Капитан Сорокин» (1977 г.) (мостовые нереверсивные – для возбуждения ГГ, а реверсивные – для возбуждения ГЭД) [47], и др.

## 2.4 Выводы

1. Выполнен обзор и анализ научно-технических решений основных вариантов ГЭУ эксплуатируемых судов-электроходов с целью разработки методов и средств повышения энергетической, экономической и экологической эффективности ГЭУ пропульсивных установок малотоннажных судов прибрежного плавания в пределах решения поставленных задач.

2. Проведены исследования основных этапов развития отечественного судового электродвижения с начала 60-х годов XX в., позволяющие выявить характерные особенности эволюции, к которым относится тенденция повышения единичных мощностей главных ЭМ, относительное многообразие схемных решений СВ и повышение надежности отдельных компонентов и судовых ПК в целом.

3. Предложен для оценки степени электрификации судов ГЭУ показатель (коэффициент) электрификации ГЭУ  $k_{ГЭУ}$ , позволяющий более корректно выполнять их сравнительный анализ.

4. Выявлено, что несмотря на большое количество научно-технических решений ПК судов-электроходов, обусловленное их функциональным назначением, основными компонентами ГЭУ, как судовых ПУ, в общем случае являются источники энергии (ДГ, турбогенераторы, АБ, и др.), преобразователи, ГЭД, двигатели (гл. 1, п. 1.5) и СУ.

Электрически соединенные между собой посредством щитов электродвижения источники ЭЭ (ГГ, АБ и пр.), преобразователи ЭЭ и ГЭД представляют схемы главного тока ГЭУ и являются электрическими передачами судовых ПУ.

СУ ГЭУ включают системы возбуждения главных ЭМ, контроля за функционированием, защит, блокировок и сигнализации.

Характерной особенностью судовых ГЭУ как электротехнических комплексов различной степени сложности в ряде случаев является отсутствие электрической связи между отдельными их компонентами.

5. Определено на основании анализа научно-технических решений схем главного тока ГЭУ, выполненного впервые с использованием ФАЛ, что число ГГ на один ГЭД в большинстве случаев составляет не менее двух и не более четырех единиц. При этом функционирование в различных режимах движения судов минимального необходимого и достаточного количества ГГ обеспечивает более эффективное использование их ПД.

6. Установлено, что большое количество судов в Дальневосточном бассейне предопределило использование на них всех основных вариантов ГЭУ, разработанных на основании научно-технических достижений, предшествовавших их созданию.

Выполненный анализ позволяет сделать вывод о том, что при решении задач по разработке экономичных судов прибрежного плавания с повышенными технико-экономическими и экологическими характеристиками дальнейшего исследования требуют судовые ПК, включающие автономные ГЭУ переменного или двойного рода тока, ГЭУ в составе единых судовых ЭЭС.

### 3 РАЗВИТИЕ ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ СУДОВЫХ ПРОПУЛЬСИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ

#### 3.1 Функциональная схема электротехнических комплексов ГЭУ

В общем случае ГЭУ являются энергетическими установками и представляют собой комплексы оборудования для передач мощностей от ГД к гребным винтам (гл. 1 и гл. 2).

На основании выполненных исследований разработана эквивалентная функциональная схема электротехнических комплексов ГЭУ, вариант которой при работе ГЭД в двигательных режимах, представлен на рисунке 3.1.

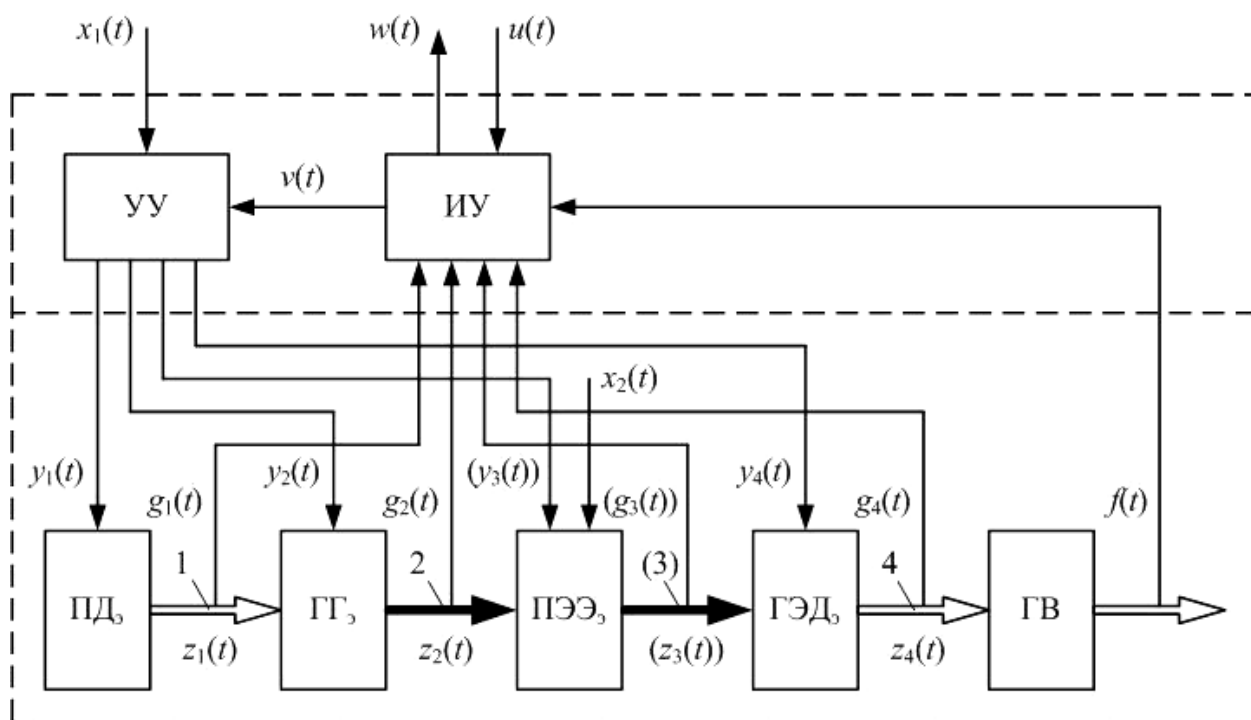


Рисунок 3.1 – Эквивалентная функциональная схема электротехнических комплексов ГЭУ при работе ГЭД в двигательных режимах

Схема (рисунки 3.1) включает силовой канал (ПД<sub>3</sub> – эквивалентный первичный двигатель; 1 – жесткую механическую связь; ГГ<sub>3</sub> – эквивалентный ГГ; 2 – схему канализации главного тока (силовые кабели); ПЭЭ<sub>3</sub> – эквивалентный преобразователь ЭЭ; 3 – схему канализации главного тока от ПЭЭ<sub>3</sub> до эквивалентного гребного электродвигателя ГЭД<sub>3</sub>; 4 – валопровод; ГВ – гребной винт (движи-

тель)), и систему управления (СУ) (УУ – управляющее устройство; ИУ – информационное устройство).

ПД<sub>э</sub> – устройство, предназначенное для преобразования различных видов энергий в механическую. К выходным координатам  $z_1(t)$  ПД<sub>э</sub> относятся механические параметры, полученные в результате преобразования энергий в механическую (механический момент  $M_{ПД}$ , угловая скорость  $\omega_{ПД}$  и др.).

ГГ<sub>э</sub> – электрическая машина, предназначенная для преобразования механической энергии в электрическую. Входными координатами  $z_1(t)$  ГГ<sub>э</sub> являются выходные параметры (координаты) ПД<sub>э</sub>, а выходными  $z_2(t)$  – напряжение  $U$ , ток  $I$ , (частота  $f$  при переменном токе) и др.

ПЭЭ<sub>э</sub> – электротехническое устройство, которое предназначено для преобразования ЭЭ с одними значениями параметров (рода тока, напряжения, частоты (для переменного тока) и др.) в ЭЭ с другими значениями параметров – рисунок 3.1.

К входным параметрам (координатам  $z_2(t)$ ) ПЭЭ<sub>э</sub> относятся выходные координаты ГГ<sub>э</sub>, а к выходным  $z_3(t)$  – преобразованные напряжение  $U_n$ , ток  $I_n$ , частота  $f_n$  (при переменном токе) и др. Преобразователи ЭЭ выполняют функции управления электромеханическими преобразователями по силовому каналу.

ГЭД<sub>э</sub> – электрическая машина, предназначенная для преобразования ЭЭ в механическую энергию (гребной ЭД). Входными координатами  $z_3(t)$  ГЭД<sub>э</sub> (рисунок 3.1) являются преобразованные выходные параметры (координаты) ПЭЭ<sub>э</sub> (напряжение  $U_n$ , ток  $I_n$ , частота  $f_n$  (при использовании гребных ЭД переменного тока) и др.), а выходными  $z_4(t)$  – механические параметры, полученные в результате преобразования ГЭД<sub>э</sub> ЭЭ в механическую энергию (механический момент  $M$ , угловая скорость  $\omega$  и др.).

Гребной винт ГВ (рисунок 3.1) является исполнительным органом ПУ, выполняющим функции судового движителя, входными координатами которого являются координаты  $z_4(t)$ .

Совокупность управляющих, информационных устройств и устройств сопряжения, предназначенных для управления ГЭД с целью обеспечения заданного движения исполнительного органа (гребного винта ГВ – рисунок 3.1) является СУ пропульсивной установки.

Внешняя по отношению к пропульсивной установке СУ более высокого уровня, поставляющая необходимую для функционирования установки информацию относится к СУ пропульсивной установкой.

УУ – устройство, предназначенное для формирования управляющих воздействий в ПУ. УУ выполняет функции управления по каналам управления ПД<sub>э</sub>, и/или ГГ<sub>э</sub>, и/или ПЭЭ<sub>э</sub>, и/или ГЭД<sub>э</sub> управляющими воздействиями (координатами)  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$ ,  $y_3(t)$  и  $y_4(t)$ , соответственно – рисунок 3.1. К входным координатам УУ относятся задающие воздействия  $x_1(t)$ , создаваемые оператором, и/или  $v(t)$ , формируемые ИУ.

Кроме того, функции управления ПЭЭ<sub>э</sub> осуществляются задающими воздействиями  $x_2(t)$ , создаваемыми оператором (обслуживающим персоналом).

ИУ – устройство, предназначенное для получения, преобразования, хранения, распределения и выдачи информации о переменных ПУ и сопредельных системах для использования в СУ установки и внешних информационных системах. Согласно рисунку 3.1 к входным координатам (данным) ИУ относятся сигналы обратных связей  $g_1(t)$ ,  $g_2(t)$ ,  $g_3(t)$  и  $g_4(t)$ , формируемые по выходным координатам  $z_1(t)$  ПД<sub>э</sub>,  $z_2(t)$  ГГ<sub>э</sub>,  $z_3(t)$  ПЭЭ<sub>э</sub>,  $z_4(t)$  ГЭД<sub>э</sub> и  $f(t)$  ГВ. К координатам  $f(t)$  относится скорость судна  $v_c$  и др. К входным координатам ИУ относятся также сигналы внешних воздействий  $u(t)$ , формируемые СУ пропульсивной установкой или сопредельными системами. К выходным координатам ИУ наряду с  $v(t)$  относятся координаты  $w(t)$ , формируемые для внешних информационных систем.

Необходимо отметить, что многообразие ГЭУ, входящих в состав судовых ПУ, подразумевает возможность отсутствия одного или нескольких каналов задающих воздействий  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ ,  $v(t)$ , управляющих воздействий (координат)  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$ ,  $y_3(t)$ ,  $y_4(t)$ , и/или сигналов обратных связей  $g_1(t)$ ,  $g_2(t)$ ,  $g_3(t)$ ,  $g_4(t)$ .

В состав ГЭУ входят также устройства сопряжения, которые представляют собой совокупность электрических и механических элементов и связей, обеспечивающих взаимодействие установки с сопредельными системами и ее отдельных частей (жесткая механическая связь 1, схемы канализации главного тока 2 и 3, валопровод 4 – рисунок 3.1, и др.).

Таким образом, предлагаемая эквивалентная функциональная схема электротехнических комплексов ГЭУ (рисунок 3.1) включает в себя силовой канал, содержащий ПД<sub>э</sub>, ГГ<sub>э</sub>, ПЭЭ<sub>э</sub>, ГЭД<sub>э</sub> и ГВ, и каналы управления на основе УУ и ИУ.

К достоинствам разработанной эквивалентной функциональной схемы электротехнических комплексов ГЭУ, позволяющей более качественно выявлять основные направления развития судовых ГЭУ, относится наглядность и универсальность, обусловленная возможностью ее применения для судов-электроходов любого функционального назначения.

## **3.2 Разработка единой классификация судовых ГЭУ**

### **3.2.1 Существующие классификации ГЭУ**

Известно, что развитие науки и техники во многих случаях находится в непосредственной связи с результатами выполненных исследований на основе сбора, обработки и анализа фактов, которые упорядочиваются и систематизируются (классифицируются).

В настоящее время ГЭУ классифицируются по ряду признаков, приведенных в научно-технической литературе, которые можно условно объединить в две группы: общие и разрозненные. Развитие в целом ГЭУ судовых пропульсивных комплексов и их компонентов (схем главного тока, СУ (возбуждения, защит, блокировок и сигнализаций)) в связи с разработкой и внедрением современных достижений привело к необходимости корректировки и дополнения существующих классификационных признаков. Классификация, которая в общем случае является методом познания и позволяет добиваться прогресса, для судовых ГЭУ, характеризующихся увеличением их разнообразия по научно-техническим решениям, расширением диапазона мощностей и функций, становится вынужденной необходимостью.

Для более глубокого анализа опыта эксплуатации судов с ГЭУ в составе ПУ с целью решения поставленных задач, направленных на дальнейший прогресс в



их развитии, к первоочередным относилась разработка классификационных признаков, позволяющих группировать судовые ГЭУ и их компоненты по характерным отличительным особенностям.

К одной из первых следует отнести классификацию ГЭУ, разработанную в конце 50-х гг. XX в. В. И. Полонским [20], согласно которой было предложено классифицировать ГЭУ по:

- роду и системе тока (например, установки постоянного тока, трехфазного (двухфазного) тока);
- типу главных ПД (турбоэлектрические гребные установки (ТЭГУ), ДЭГУ, газо-турбо-электрические);
- степени полноты электрификации (автономные, вспомогательные, комбинированные).

Автономные ГЭУ, у которых гребные винты приводятся во вращение только ГЭД, были использованы, например, на танкере «Генерал Ази Асланов», серии ледокольно-транспортных судов типа «Лена», серии ледоколов типа «Капитан Белоусов» (гл. 2, п. 2.4) и др. В настоящее время автономные (главные) ГЭУ, не исключающие возможности отбора частей мощности ГГ для питания ЭЭ общесудовых потребителей, получили наиболее широкое распространение. Они установлены на ледоколах (серий типа «Ермак» (гл. 2, п. 2.1), «Москва» (гл. 2, п. 2.2), и т. д.), паромах различного назначения (серий типа «Советский Азербайджан» (1962–1968 гг.), «Сахалин» (гл. 2, п. 2.1), и многих других судах-электроходах различного назначения и водоизмещения.

У вспомогательных ГЭУ ГГ работали на ГЭД при движении судов, а при стоянках обеспечивали ЭЭ общесудовые потребители. Такие ГЭУ устанавливались, как правило, на судах технического флота (земснарядах, плавкранах и др.).

В современной трактовке ГЭУ имеют вспомогательное значение в тех случаях, когда основной функцией судовых ЭЭС является обеспечение ЭЭ ЭП производственных механизмов [47].

В комбинированных ГЭУ гребные винты приводились во вращение как ПД, так и ЭД, получающими ЭЭ от вспомогательных генераторов, являющуюся для

них избыточной (свободной). Комбинированные ГЭУ нашли применение в основном на рефрижераторных и рыбопромысловых судах преимущественно зарубежной постройки (Федеративной Республики Германии и др.) [45].

Согласно [20] ГЭУ кроме того могли различаться:

- по назначению, классу и типу судна (установки на земснарядах, пожарных, спасательных судах);
- по величине мощности (малых, средних и больших мощностей);
- по способу соединения гребных ЭД с винтами (с непосредственным или зубчатым соединением).

В 60-х гг. XX в. существующие классификационные признаки в соответствии с обозначенными направлениями развития ГЭУ были несколько изменены и дополнены [45].

К измененным относились классификационные признаки по:

- роду тока (постоянного или переменного тока);
- типу ПД (ДЭГУ, ТЭГУ).

ГЭУ постоянного тока использовались на тех судах, от которых требовалась высокая маневренность и относительно частые реверсы (китобойных судах, ледоколах, паромах и т. д.), а переменного – где требовалась повышенная экономичность установок.

Тип ПД во многом определял технико-экономические показатели ПК в целом. ДЭГУ, КПД ПД (дизелей) которых были более чем на 30 % выше значений КПД других тепловых двигателей, использовались, как правило, на судах малого и среднего водоизмещения, а ТЭГУ, КПД ПД (паровых турбин) которых составлял ориентировочно 0,25 – на судах большого водоизмещения [59].

Дополнительно получили распространение следующие классификационные признаки ГЭУ:

- по типу ГЭД (с ЭД постоянного тока, с синхронными ЭД и с асинхронными ЭД);

- по назначению судов (буксиры, ледоколы, паромы, плавкраны, рыбопромысловые суда и т. д.);

- по системе возбуждения (с централизованной, индивидуальной и смешанной системой возбуждения).

В отдельный классификационный признак были выделены ГЭУ двойного рода тока (переменно-постоянного и постоянно-переменного), который позднее был объединен с признаком по роду тока [48].

Выполненный анализ научно-технической литературы дает основание сделать вывод об отсутствии единообразия в классификационных признаках ГЭУ судовых движительных комплексов. До настоящего времени, несмотря на различие подходов к исследованиям, нет общепринятой классификации судовых ГЭУ, включающей необходимый и достаточный диапазон классификационных признаков, наиболее полно характеризующих особенности отдельных ГЭУ и отражающих их связь с другими судовыми ЭП. Ее разработка затрудняется тем обстоятельством, что представленные признаки не являются однозначно взаимно исключающими.

Для восполнения имеющегося пробела представляется целесообразным постановка и решение задачи разработки классификации ГЭУ ПУ судов, отвечающей основным современным требованиям [60].

### **3.2.2 Разработанная классификация ГЭУ**

В общем случае классификация представляет собой классификатор (систему ячеек и связей между ними), наполненный описаниями конкретных объектов или предметов.

Основной целью (полезной функцией) классификаций является обеспечение места каждого из классифицируемых объектов (судовых ГЭУ). Функция должна выполняться при следующих основных видах использования классификации: размещении новых объектов (судовых ГЭУ) в классифицируемых массивах; нахождении конкретных ГЭУ судов по этим массивам.

За основу построения классификации судовых ГЭУ целесообразно принять индуктивный способ, обусловленный наличием несистематизированного набора вариантов реализации объектов. В этом случае при формировании классификатора используются вариантообразующие операторы деления и обобщения.

Основанием классификации являются судовые ГЭУ, являющиеся предметной системой, где функции подсистем определяются с различной степенью относительной сложности.

При исследовании судовых ГЭУ и разработке классификационных признаков были выполнены многофакторные исследования, учитывающие большое функциональное разнообразие ГЭУ, конструктивные и эксплуатационные особенности отдельных компонентов, их связи и схемные решения, и др.

На рисунке 3.2 представлена разработанная классификация, согласно которой все судовые ГЭУ, с учетом функциональной схемы (рисунок 3.1), можно разделить по функциональному назначению (ячейка 1), по степени использования (ячейка 2), по реализации силового канала (ячейка 3) и по каналу управления (ячейка 4).

Целесообразным количественным условием при разработке классификации ГЭУ судовых ПУ явилось наличие массива ячеек на одном иерархическом этаже для ячейки более высокого этажа не более семи, поскольку семь ячеек является, как правило, пределом активного восприятия и анализа пользователями массива объектов.

В общем случае ГЭУ используются преимущественно на судах, к которым предъявляются повышенные требования к маневренным качествам, сопровождающиеся необходимостью изменения моментов и регулирования частоты вращения гребных винтов в допустимо широких диапазонах, обеспечения частых и быстрых реверсов.

## 1. Классификация по функциональному назначению ГЭУ.

### 1.1. Вспомогательные.

### 1.2. Комбинированные.

### 1.3. Основные.

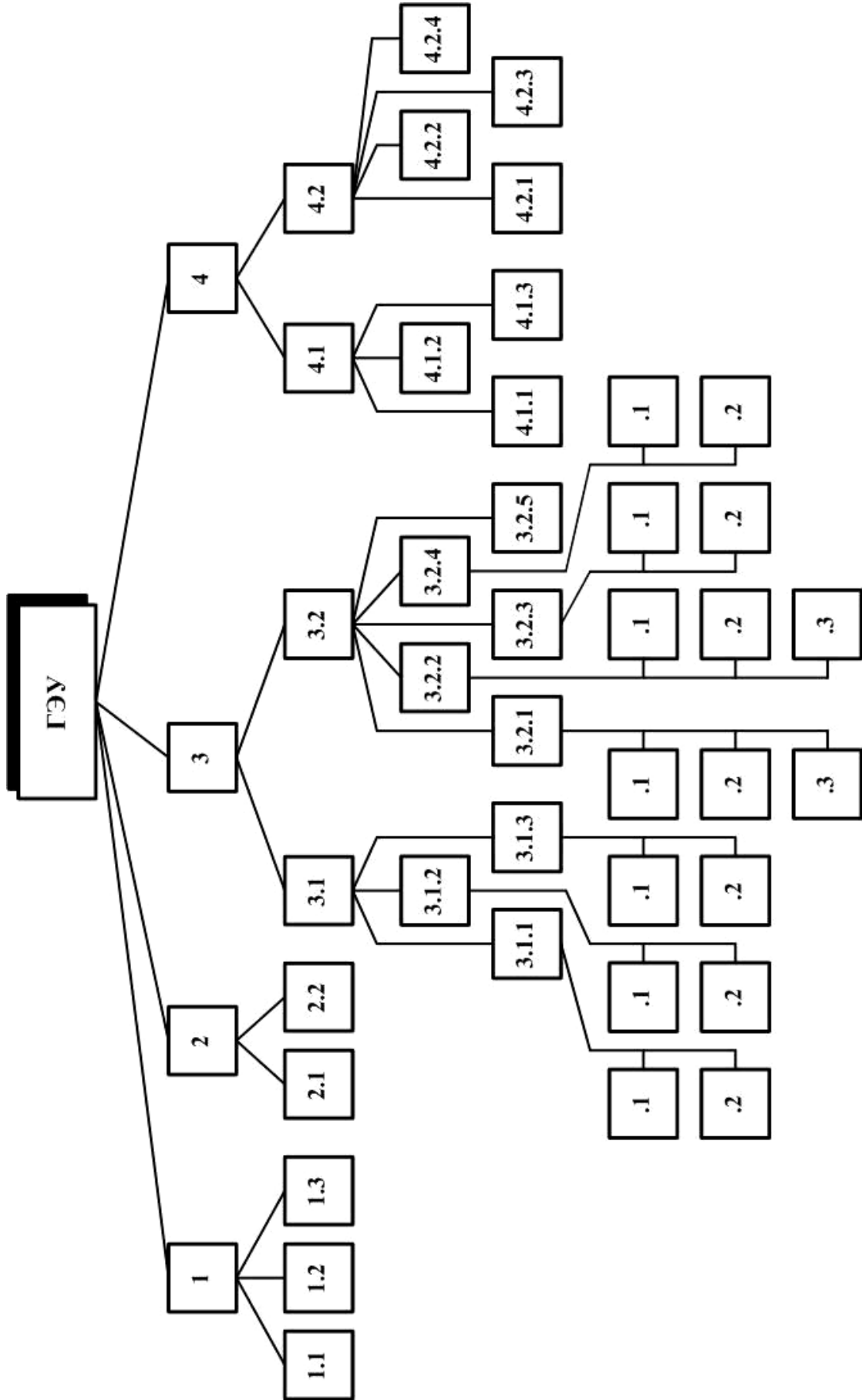


Рисунок 3.2 – Классификация ГЭУ судовых ПУ

У вспомогательных ГЭУ (рисунок 3.2, ячейка 1.1) обеспечение энергией движителей является второстепенной функцией. Их системы, включающие ПД и ГГ, рассчитываются и выбираются в первую очередь исходя из необходимости обеспечения ЭЭ основных общесудовых потребителей, в первую очередь ЭП производственных механизмов в соответствии с функциональными назначениями судов.

Вспомогательные ГЭУ, как правило, используются на судах технического флота (земснарядах (черпаковых и землесосных снарядов), плавкранах, самоходных буровых установках и пр.).

Комбинированные ГЭУ (рисунок 3.2, ячейка 1.2) являются составной частью механического (или гидравлического) и электрического способов передачи энергии ГД судовым движителям (гребным винтам), причем, как правило, основными являются механические (гидравлические) передачи, а ГЭУ предназначены для увеличения мощностей на движителях в ходовых режимах или обеспечения движений судов на малых скоростях.

Комбинированные ГЭУ нашли применение на промысловых и рефрижераторных судах преимущественно иностранной постройки [57].

Основные ГЭУ (рисунок 3.2, ячейка 1.3) предназначены только для передачи энергии ПД судовым движителям (гребным винтам) и системы электродвижения являются основными приводами движителей. При использовании основных ГЭУ не исключается возможность отбора мощности для питания общесудовых потребителей ЭЭ.

Основные ГЭУ ПУ судов нашли наиболее широкое применение и внедрены, в частности, на буксирах, линейных и портовых ледоколах, паромах различного назначения.

## 2. Классификация по степени использования.

### 2.1. Автономные.

### 2.2. В составе единых ЭЭС.

В случаях автономных ГЭУ (рисунок 3.2, ячейка 2.1) судовые движители (гребные винты) приводятся во вращение только ГЭД.

Автономные ГЭУ в настоящее время используются во многих случаях применения основных ГЭУ. Они установлены на буксирах, лебедках, паромов и многих других типах судов.

Единые судовые ЭЭС предполагают обеспечение ЭЭ потребителей общесудовых сетей и ГЭД от общих шин. ГЭУ в составе единых ЭЭС (рисунок 3.2, ячейка 2.2) находят все более широкое применение. Перспективы их внедрения тесно связаны с развитием силовой полупроводниковой техники.

ГЭУ в составе единых ЭЭС используются на судах-снабженцах и др.

3. Классификация ГЭУ по реализации силового канала.

3.1. По конструктивному исполнению.

3.2. По схеме главного тока.

Классификационный признак по конструктивному исполнению (рисунок 3.2, ячейка 3.1) включает в себя следующий массив ячеек одного иерархического этажа (уровня):

3.1.1 – по расположению и числу движителей (гребных винтов) (.1 – кормовые,  $n$ ; .2 – кормовые,  $n$  и носовые,  $m$  ( $n, m$  – число движителей));

3.1.2 – по механической связи ГЭД с гребными винтами (.1 – непосредственные; .2 – посредством передаточных механизмов (муфт));

3.1.3 – по расположению ГЭД (.1 – внутри корпусов судов; .2 – вне корпусов судов).

У большинства судов-электроходов один или несколько движителей (гребных винтов) ( $n \geq 1$ ) расположены под водой в кормовых оконечностях корпусов – рисунок 3.2, ячейка .1 (3.1.1).

В некоторых случаях для повышения маневренных свойств судов гребные винты установлены в кормовых и носовых оконечностях (рисунок 3.2, ячейка .2 (3.1.1)). Такими ПК снабжены в частности некоторые железнодорожные паромы.

Классификационный признак 3.1.2 (по механической связи ГЭД с гребными винтами) включает ячейки .1 и .2 – рисунок 3.2.

У многих судов с электродвижением движители (гребные винты) имеют непосредственные механические связи с ГЭД за счет использования гребных валов (валопроводов) или коротких валов, соединяющих ГЭД и гребные винты – рисунок 3.2, ячейка .1 (3.1.2).

Использование в качестве передаточных механизмов муфт (рисунок 3.2, ячейка .2 (3.1.2)) дает дополнительные возможности регулирования частоты вращения гребных винтов при неизменной частоте вращения валов ГЭД.

По расположению ГЭД могут находиться в корпусах судов (ячейка .1 (3.1.3)), что характерно для большинства судов с электродвижением, или вне корпусов судов (ячейка .2 (3.1.3)), когда ГЭД встроены в подводные части гондол главных ВРК – рисунок 3.2.

По схеме главного тока (рисунок 3.2, ячейка 3.2) ГЭУ классифицируются:

3.2.1 – по роду тока (.1 – постоянного тока; .2 – переменного тока; .3 – двойного рода тока);

3.2.2 – по типу источников энергии (.1 – электромеханические; .2 – электрохимические; 3 – прочие);

3.2.3 – по типу преобразователей ЭЭ (.1 – аналоговые; .2 – дискретные);

3.2.4 – по числу контуров схем главного тока (.1 – одноконтурные; .2 – многоконтурные);

3.2.5 – по количеству рабочих режимов.

В ГЭУ постоянного тока (рисунок 3.2, ячейка .1 (3.2.1)) главные ЭМ (ГГ и ГЭД) постоянного тока соединены в основных (номинальных) и частичных режимах, как правило, по системе Г–Д.

ГЭУ постоянного тока используются преимущественно на буксирах, линейных и портовых ледаколах, парамах различного функционального назначения и других типах судов-электроходов [55].

В ГЭУ переменного тока (рисунок 3.2, ячейка .2 (3.2.1)) в большинстве случаев в качестве ГГ используются синхронные генераторы, а в качестве ГЭД – асинхронные или синхронные ЭД. Схемы главного тока некоторых ГЭУ перемен-



ного тока содержат полупроводниковые преобразователи ЭЭ, посредством которых обеспечивается регулирование угловой скорости и реверс ГЭД.

ГЭУ переменного тока установлены и эксплуатируются на пассажирских судах, рефрижераторах, различных транспортных и других судах.

ГЭУ двойного рода тока (рисунок 3.2, ячейка .3 (3.2.1)) включают ГЭУ переменного-постоянного и постоянно-переменного тока.

В ГЭУ переменного-постоянного тока используются синхронные ГГ и ГЭД постоянного тока, а в ГЭУ постоянно-переменного тока главными источниками ЭЭ являются АБ или электрохимические генераторы, а в качестве ГЭД используются асинхронные или синхронные ЭД переменного тока. В обоих случаях для согласования, преобразования и регулирования входных и выходных значений координат между главными источниками ЭЭ и ГЭД подключаются полупроводниковые преобразователи (управляемые выпрямители, инверторные преобразователи частоты и др.).

В настоящее время ГЭУ двойного рода тока нашли применение на ледоколах, паромах, судах-снабженцах и др.

В зависимости от агрегатного исполнения электромеханических источников энергии (рисунок 3.2, ячейка .1 (3.2.2)) ГЭУ подразделяются на ДЭГУ и ТЭГУ. Не исключена возможность применения газо-турбо-электрических гребных установок.

Наиболее широкое применение нашли ДЭГУ, которые устанавливаются на буксирах, линейных и портовых ледоколах, паромах и многих других типах судов.

Для судов с ГЭУ относительно больших мощностей, в частности атомоходов, представляется целесообразным использование ТЭГУ.

К электрохимическим источникам энергии для классификационного признака 3.2.2 ГЭУ, расположенного в ячейке .2 (рисунок 3.2) относятся в первую очередь АБ и электрохимические генераторы.

Областью применения ГЭУ с электрохимическими источниками энергии являются преимущественно малотоннажные суда, в частности пассажирские паромы прибрежного плавания.

К прочим источникам энергии для классификационного признака 3.2.2 ГЭУ, расположенного в ячейке .3 (рисунок 3.2) следует отнести перспективные разработки, связанные с использованием энергии ветра, солнца и др.

По типу преобразователя ЭЭ (ячейка 3.2.3) в силовом канале (рисунок 2.1) ГЭУ классифицируются на аналоговые (ячейка .1) и дискретные (ячейка .2) – рисунок 3.2.

К аналоговым преобразователям ЭЭ относятся в первую очередь неуправляемые и управляемые выпрямители, инверторные преобразователи частоты и др.

К дискретным преобразователям следует отнести разъединители, переключатели и другие контактные коммутационные аппараты, установленные в схемах главного тока и расположенные преимущественно в щитах электродвижения, обеспечивающие посредством включений и переключений набор контуров схем и подачу дискретных значений напряжений на обмотки ГЭД.

По числу контуров схем главного тока (ячейка 3.2.4) ГЭУ классифицируются на одноконтурные (ячейка .1) и многоконтурные (ячейка .2) – рисунок 3.2.

Кроме того, ГЭУ классифицируются по количеству рабочих режимов (рисунок 3.2, ячейка 3.2.5), создаваемых силовыми каналами посредством управляющих воздействий.

#### 4. Классификация ГЭУ по каналу управления.

4.1. По технической реализации систем возбуждения.

4.2. По типу источников питания схем каналов управления.

Классификационный признак по технической реализации систем возбуждения (рисунок 3.2, ячейка 4.1) включает в себя следующий массив ячеек одного иерархического уровня:

4.1.1 – индивидуальные;

4.1.2 – централизованные;

4.1.3 – смешанные.

Индивидуальные системы (рисунок 3.2, ячейка 4.1.1) подразумевают наличие отдельных систем возбуждения для каждой главной ЭМ, группы однофункциональных ЭМ, отдельных контуров главного тока судовых ГЭУ.

При централизованных системах (рисунок 3.2, ячейка 4.1.2) управление всеми главными ЭМ ГЭУ осуществляется в непосредственном взаимодействии (централизовано).

Смешанные системы (рисунок 3.2, ячейка 4.1.3) представляют различные взаимные комбинации индивидуальных систем возбуждения.

По типу источников питания схем каналов управления (рисунок 3.2, ячейка 4.2) ГЭУ классифицируются как:

- 4.2.1 – непосредственные;
- 4.2.2 – электромеханические;
- 4.2.3 – статические;
- 4.2.4 – прочие.

Непосредственные (рисунок 3.2, ячейка 4.2.1) подразумевают питание каналов управления ГЭУ непосредственно от общесудовых сетей.

При электромеханических системах (рисунок 3.2, ячейка 4.2.2) функции источников питания схем каналов управления выполняют электромеханические преобразователи, ПД которых получают ЭЭ от общесудовых сетей.

У статических систем (рисунок 3.2, ячейка 4.2.3) функции источников питания схем каналов управления выполняют статические преобразователи ЭЭ.

К прочим (рисунок 3.2, ячейка 4.2.4) относятся источники питания схем каналов управления, отличные от представленных в ячейках 4.2.1...4.2.3 (рисунок 3.2), в частности АБ, электрохимические генераторы и другие источники ЭЭ.

### **3.3 Развитие судовых пропульсивных комплексов, включающих гребные электрические установки**

На основании выполненных исследований судовых ПК, включающих ГЭУ, основные результаты которых представлены в гл. 1 и гл. 2 настоящей работы, с

учетом разработанной функциональной схемы пропульсивных установок судов с ГЭУ представленной в п. 3.1 и предложенной классификации (п. 3.2), при решении вопросов повышения эффективности ТЭ малотоннажных судов-электроходов для внутрипортового и прибрежного плавания к наиболее приемлемым научно-техническим решениям следует отнести комбинированные варианты ГЭУ, когда ГВ может получать энергию от ДГ или АБ [61, 62, 63].

Согласно результатам выполненного анализа опыта ТЭ пассажирских малотоннажных судов в порту Владивосток среднестатистическое время разгона исследуемых судов составляет около 6 мин, время движения – (7...50) мин, время торможения, включающее движение по инерции, и время стоянки (10...20) мин.

Таким образом, в течение ежедневного времени эксплуатации судовые ПК работают в чередующихся между собой статических (номинальных, долевых (частичных) и холостого хода) и динамических эксплуатационных режимах.

В общем случае по научно-техническим решениям судовые КЭУ можно условно подразделить на параллельно-последовательные и последовательно-параллельные. На рисунке 3.3 представлены основные варианты функциональных схем КЭУ [64].

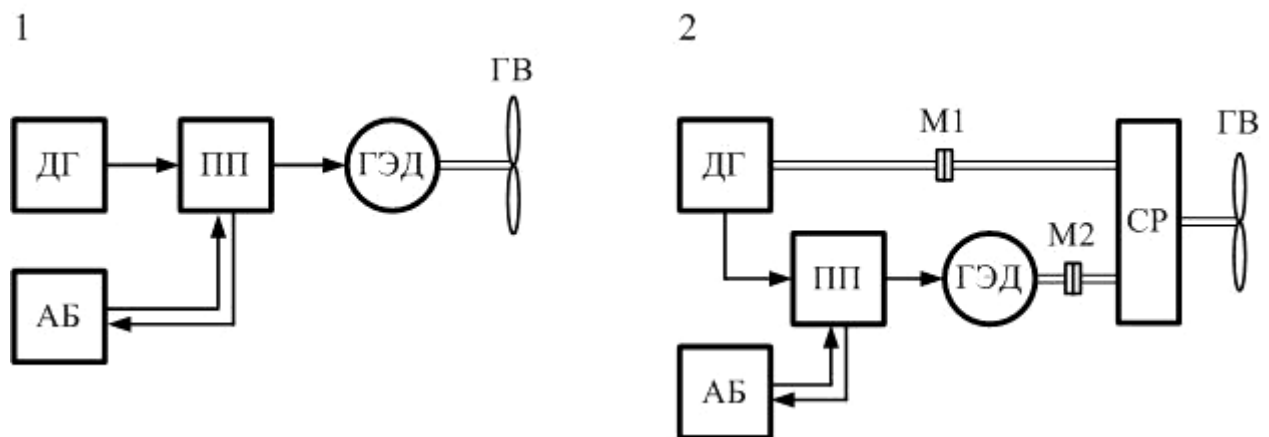


Рисунок 3.3 – Функциональные схемы КЭУ (1 – параллельно-последовательного типа; 2 – последовательно-параллельного типа)

У параллельно-последовательных вариантов (рисунок 3.3.1) источники ЭЭ (ДГ и АБ) в режиме отдачи энергии работают на ГЭД, вращающий ГВ, отдельно или параллельно.

В случае работы ДГ на ГВ КПД установки  $\eta_{КЭУ1}$  определяется как

$$\eta_{КЭУ1} = \eta_{ДГ} \eta_{ПП} \eta_{ГЭД}, \quad (3.1)$$

а при передаче энергии на ГВ от АБ  $\eta_{КЭУ2}$  находится из выражения

$$\eta_{КЭУ2} = \eta_{АБ} \eta_{ПП} \eta_{ГЭД}, \quad (3.2)$$

где  $\eta_{ДГ}, \eta_{ПП}, \eta_{ГЭД}$  и  $\eta_{АБ}$  – КПД компонентов силового канала (ДГ, ПП, ГЭД и АБ, соответственно).

К основным достоинствам КЭУ параллельно-последовательного типа относится отсутствие механической связи между главным источником энергии (ДГ) и ГВ, жестко соединенным с ГЭД. Такое решение позволяет более компактно размещать оборудование ПУ.

Недостатком схемы (рисунок 3.3.1) согласно (3.1) и (3.2) является относительно низкие значения КПД  $\eta_{КЭУ1}$  и  $\eta_{КЭУ2}$ , т. к. первичная энергия подвергается тройному преобразованию.

В случаях последовательно-параллельных КЭУ (рисунок 3.3.2) существует два параллельных раздельно или совместно функционирующих силовых канала, в каждом из которых компоненты соединены последовательно, а ГВ приводится во вращение суммирующим редуктором (СР), соединяемым с ДГ через разобшительную муфту М1, или/и подключаемым к АБ через ПП, ГЭД и разобшительную муфту М2.

Для первого силового канала последовательно-параллельного варианта, когда вращение ГВ осуществляется от ДГ через разобшительную муфту М1 и СР, справедливо следующее выражение для  $\eta_{КЭУ}$ :

$$\eta_{КЭУ} = \eta_{ДГ} \eta_{М1} \eta_{СР}, \quad (3.3)$$

а для второго – выражения (3.1) и (3.2).

В (3.3)  $\eta_{М1}, \eta_{СР}$  – КПД компонентов силового канала (муфты М1 и СР, соответственно).

В отличие от параллельно-последовательных КЭУ, при работе по первому каналу последовательно-параллельных КЭУ ПУ согласно (3.3) имеют повышенные значения  $\eta_{КЭУ}$ , поскольку механическая энергия ДГ (рисунок 3.3.2) не подвер-

гается преобразованиям, а муфта М1 и СР для этого режима имеют относительно высокие значения КПД.

К недостаткам таких режимов работы относится необходимость регулирования топливоподачи ПД для изменения частоты вращения гребных ВФШ. Для обеспечения реверса ГВ необходимо наличие реверсивных ПД, которые конструктивно сложнее, дороже и имеют повышенные массо-размерные показатели по сравнению с обычными неревверсивными ПД, или наличие реверс-редукторов. Кроме того, работа дизельных ПД в переходных режимах и режимах, отличных от номинальных, характеризуется повышенным удельным расходом топлива, большим содержанием вредных веществ в выхлопных газах, ускоренным нагарообразованием и закоксовкой поршневых колец. Остановка судов при этом осуществляется, как правило, за счет действия сил сопротивления воды (пассивным торможением), а путь, проходимый судном значительно больше, чем при активном торможении, когда остановка судна производится за счет реверса ГВ. При пассивном торможении, характеризующимся относительно большим временем переходных режимов при остановке судов, зависящим от их инерционных свойств, затрудняется управляемость, что отрицательно сказывается на безопасности мореплавания.

В качестве примера результатов обзора и анализа приемлемых при решении поставленных задач вариантов заслуживает внимания научно-техническое решение, представленное в [65]. В качестве источников ЭЭ в представленном решении используется электромеханический генератор G, приводимый во вращение дизельным двигателем DE и АБ (B), которые подключены к общим шинам распределительного устройства DD – рисунок 3.4.

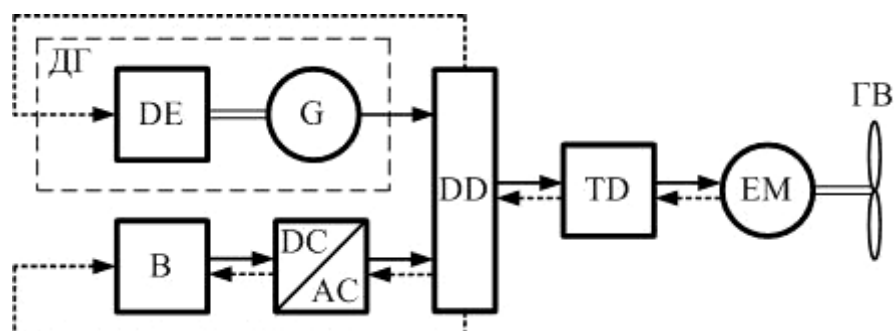


Рисунок 3.4 – Известный вариант функциональной схемы судовой гибридной установки [65]

Кроме того, в состав схемы (рисунок 3.4) входит обратимый ПП DC/AC, передаточное устройство TD и ГЭД EM.

К основным задачам, решаемым СУ, относится оптимальное функционирование КЭУ, которое реализуется посредством управления мощностями ДГ и АБ.

На рисунке 3.5 приведены основные режимы функционирования установки в зависимости от состояния (степени) заряженности (State of Charge (SOC)) АБ при работе ГЭД в двигательных режимах, где:  $SOC_{min}$ ,  $SOC_{int}$ ,  $SOC_{max}$  – минимальный, промежуточный (intermediate) и максимальный уровень заряда АБ;  $N_{ГВ}$  – мощность на валу ГВ ( $N_{ГВ1} = P_{ГГmax}$ ;  $N_{ГВ2} = P_{АБmax}$ ;  $N_{ГВ3} = P_{ГГmax} + P_{АБmax}$ );  $c$  – процесс зарядки АБ (charging the battery);  $d$  – процесс разрядки АБ (discharging the battery).

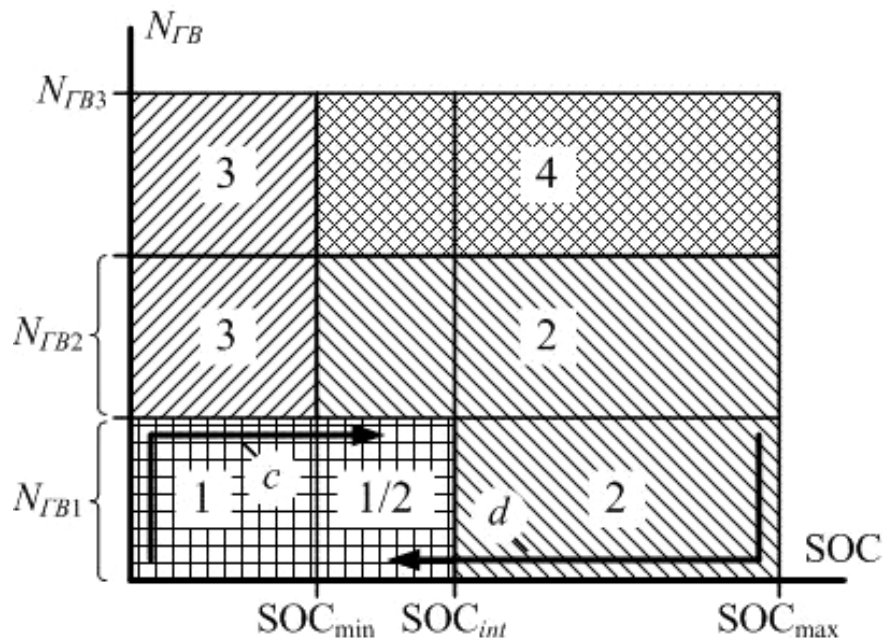


Рисунок 3.5 – Основные режимы функционирования гибридной установки в зависимости от степени заряженности (SOC) АБ при работе ГЭД в двигательных режимах

Мощность  $N_{ГВ}$  определяется по выражению (1.3) (гл. 1):

$$N_{ГВ} = k_2 M_{ГВ} n_{ГВ} = k_1 k_2 n_{ГВ}^3. \quad (3.4)$$

Согласно рисунку 3.5 при работе ГЭД в двигательных режимах существует четыре основных режима работы гибридной установки.

В режиме 1 (рисунок 3.5) мощность ГГ  $P_{ГГmax}$  расходуется на работу ГВ и подзарядку разряженных АБ.  $N_{ГВ} < P_{ГГmax}$ ,  $SOC < SOC_{int}$ .

$$\begin{cases} P_{ГГ} = P_{ГГ\max}; \\ P_{АБ} = -(P_{ГГ} - N_{ГВ}). \end{cases} \quad (3.5)$$

При режиме 2 на ГВ работает (разряжается) АБ.  $N_{ГВ} \leq P_{АБ\max}$ ,  $SOC \geq SOC_{\min}$ .

$$\begin{cases} P_{ГГ} = 0; \\ P_{АБ} = N_{ГВ}. \end{cases} \quad (3.6)$$

Режим 3 (рисунок 3.5) характеризуется работой ГГ гибридной установки на ГВ.  $N_{ГВ} \leq P_{ГГ\max}$ ,  $SOC < SOC_{\min}$ .

$$\begin{cases} P_{ГГ} = P_{ГГ\max}; \\ P_{АБ} = 0. \end{cases} \quad (3.7)$$

Для режима 4 характерна совместная работа ГГ и АБ на ГВ.  $N_{ГВ} \geq P_{ГГ\max}$ ,  $SOC \geq SOC_{int}$ .

$$\begin{cases} P_{ГГ} = P_{ГГ\max}; \\ P_{АБ} = N_{ГВ} - P_{ГГ}. \end{cases} \quad (3.8)$$

Кроме рассмотренных основных режимов в рассмотренном научно-техническом решении (рисунок 3.4) предусмотрена подзарядка АБ гибридной установки рекуперативной энергией ГВ [66].

На основании результатов анализа к исходным данным, необходимым для совершенствования КЭУ следует отнести наличие нереверсивных ПД, преимущественное управление КЭУ при вращении ГВ от ГЭД ПП, что позволяет регулировать частоту вращения ГВ в широком диапазоне и реверсировать направление их вращения в относительно короткие промежутки времени, улучшая маневренные характеристики судов.

Необходимо отметить, что в случаях работы ГВ от АБ практически к нулю сводятся загрязнения окружающей среды.

Кроме отдельных режимов представляется целесообразной параллельная работа ПД или ДГ с АБ на ГВ, а в долевых режимах функционирования – работа ПД или ДГ с отбором мощности для подзарядки АБ.

При этом к основным относится решение задачи по организации такого управления КЭУ, при котором обеспечиваются технико-экономические и экологические



гические показатели, соответствующие современным нормам и требованиям, предъявляемым к ПУ судов, функционирующим как в стационарных, так и в переходных режимах [67].

На рисунке 3.6 представлен вариант силового канала предложенной функциональной схемы КЭУ с обратимой валомашинной (ВМ).

В качестве движителя ПУ используется ВРШ, частота вращения которого обеспечивается через СР рабочим ГД посредством муфты М1 или функционирующей системой, включающей АБ, ПП и ВМ, через муфту М2 – рисунок 3.6.

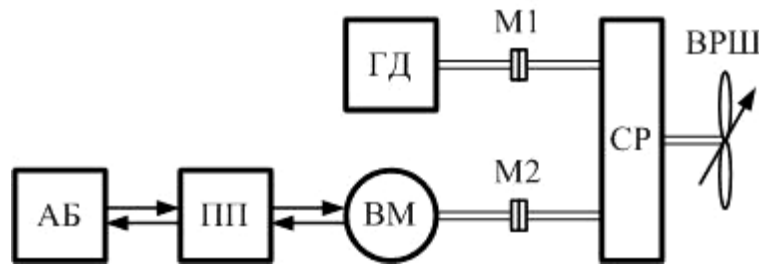


Рисунок 3.6 – Функциональная схема силового канала КЭУ с ВМ и ВРШ

Необходимо отметить, что ВМ в данном случае представляет собой синхронную машину, способную работать как в генераторном, так и в двигательном режиме.

При получении ГВ энергии для движения судна от АБ, ВМ, работающая в двигательных режимах, получает питание необходимого качества от ПП и посредством включенной муфты М2 и СР приводит во вращение ВРШ, обеспечивая судну заданное движение. В этом случае разобщительная муфта М1 отключена и ГД не работает. Управление движением судна в переходных и установившихся режимах происходит посредством ПП при неизменном угле разворота лопастей ВРШ до заданной остаточной емкости АБ, косвенно определяемой величиной напряжения. При уменьшении напряжения АБ до значения уставки срабатывает датчик напряжения (ДН) и подает сигнал в систему дистанционного автоматизированного управления (ДАУ) на запуск ГД с предварительным подключением его к СР, приведя разобщительную муфту М1 в замкнутое состояние, а муфту М2 – при необходимости в разомкнутое (ДН и ДАУ на рисунке 3.6 не показаны). С момента соединения работающего ГД с ГВ управление движением судна в переход-

ных и установившихся режимах осуществляется путем изменения шага ВРШ при постоянной частоте вращения вала ГД.

При моментах сопротивления на ГВ  $M_{ГВ}$ , значения которых меньше номинального момента, для поддержания моментов  $M_{ГД}$  на валу ГД квазипостоянными в пределах номинальных значений, система ДАУ при замкнутой муфте М2 переводит ВМ в генераторный режим, от которой посредством ПП отбирается допустимое количество ЭЭ, необходимое для зарядки АБ и достаточное для создания дополнительного тормозного момента  $M_{сд}$  (момента сопротивления), равного разности между номинальным моментом ГД  $M_{ГДн}$  и моментом сопротивления ВРШ  $M_{сВРШ}$  ( $M_{сд} = M_{ГДн} - M_{сВРШ}$ ). Определение системой ДАУ степени загрузки ГД производится автоматически по показаниям датчиков температуры его выхлопных газов.

При технической реализации предложенного варианта судовой КЭУ наряду с подзарядкой АБ целесообразно подключение ВМ к общесудовой сети для питания отдельных групп общесудовых потребителей.

Для решения задачи повышения эффективности ТЭ судовых КЭУ, приведенных на рисунках 3.3 и 3.6, разработан способ управления судовой КЭУ (рисунок 3.7) [68], защищенный патентом на изобретение [34].

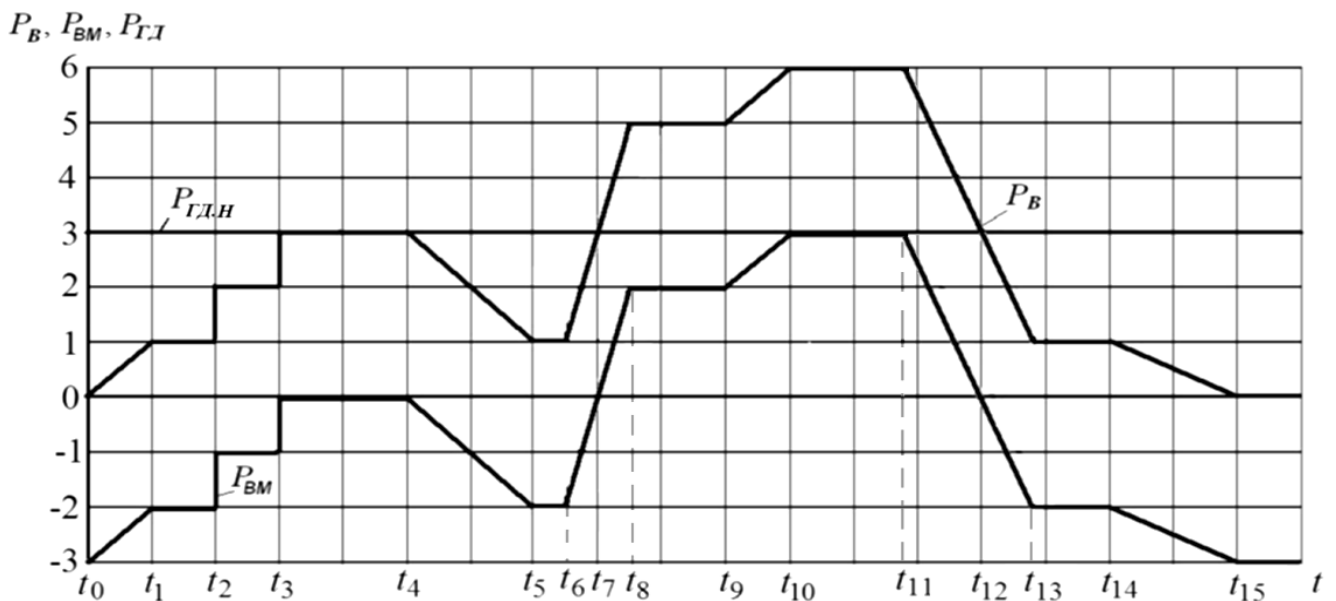


Рисунок 3.7 – Графики зависимостей  $P_B = f(t)$  и  $P_{ВМ} = f(t)$  при  $P_{ГД}(t) = P_{ГДн}(t) = \text{const}$  согласно разработанному способу

На поясняющем рисунке 3.7 представлены графики зависимостей мощности на гребном валу (ВРШ)  $P_{ГВ}$  ( $P_B$  – рисунок 3.7) и мощности валомашины  $P_{ВМ}$  в функции времени  $t$  при выполнении условия  $P_{ГД}(t) = N_{ГДн}(t)$  ( $P_{ГД.н}$  – рисунок 3.7), согласно которым мощность на гребном валу (винте) изменяется в зависимости от условий эксплуатации (навигационной обстановки).

Согласно разработанному способу функционирование судовых КЭУ, силовой канал которых представлен в частности на рисунке 3.6, реализуется следующим образом.

В общем случае мощность на ГВ (ВРШ)  $P_{ГВ}(t)$  ( $P_B(t)$  – рисунок 3.7) определяется как

$$P_{ГВ}(t) = N_{ГД}(t) \pm P_{ВМ}(t); \quad N_{ГД} = \text{const.} \quad (3.9)$$

Для момента времени  $t_0$ , соответствующего кратковременной стоянке судна у причала или в других местах, мощность  $N_{ГВ}$  ( $P_B$  – рисунок 3.7), потребляемая ГВ (ВРШ), равна нулю ( $N_{ГВ}(t_0) = 0$ ). При этом мощность  $N_{ГДн}$  ( $P_{ГД.н}$  – рисунок 3.7), вырабатываемая ГД, посредством ВМ, работающей в генераторном режиме, и ПП, расходуется за вычетом потерь только на зарядку АБ или в комбинации с питанием общесудовых приемников ЭЭ. В этом случае мощность  $P_{ВМ}(t_0)$  (рисунок 3.7) имеет обусловлено отрицательные значения.

При линейном законе изменения мощности  $P_{ГВ}(t)$  на один условный уровень на временном отрезке  $t_0 \dots t_1$  по аналогичной линейной зависимости на такую же величину изменяется мощность  $P_{ВМ}(t)$ , вырабатываемая ВМ – рисунок 3.7.

На временном интервале  $t_1 \dots t_2$  (рисунок 3.7) мощность  $P_{ГВ}(t)$ , потребляемая ГВ (ВРШ), соответствует условному единичному уровню мощности (ступени), а вырабатываемая ВМ мощность  $P_{ВМ}(t)$  – двум условным единичным уровням (ступеням) мощности. Таким образом на данном временном интервале 1/3 мощности ГД  $N_{ГДн}$  передается на ГВ, а 2/3 мощности  $N_{ГДн}$  преобразуется посредством ВМ, работающей в генераторном режиме, и ПП (рисунок 3.6) в электрическую мощность, которая расходуется на подзарядку АБ и/или питание общесудовых приемников ЭЭ.

На промежутке времени  $t_2 \dots t_3$  (рисунок 3.7)  $2/3$  мощности  $N_{ГДн}$  передается на ГВ (ВРШ), а  $1/3$  расходуется на подзарядку АБ и/или питание общесудовых приемников ЭЭ.

На временном интервале  $t_3 \dots t_4$  вся вырабатываемая ГД мощность  $N_{ГДн}$  расходуется ГВ. При этом муфта М2 (рисунок 3.6) разобщена, а ВМ находится в отключенном состоянии.

Аналогичным образом производится распределение мощности ГД  $N_{ГДн}$  и на последующих временных интервалах функционирования, но всегда при выполнении условия, что коэффициент загрузки ГД остается неизменным и равным номинальному значению.

Интервал времени  $t_7 \dots t_{12}$  (рисунок 3.7) характеризуется совместной работой на ГВ ГД и ВМ (рисунок 3.6), работающей в двигательном режиме, причем на интервале времени  $t_{10} \dots t_{11}$  (рисунок 3.7) мощность ГВ (ВРШ)  $P_{ГВ}(t)$  соответствует номинальной мощности ( $P_{ГВ}(t) = P_{ГВн}(t)$ ).

Таким образом, в зависимости от потребляемой ГВ мощности  $P_{ГВ}(t)$ , необходимой для движения судна с заданной скоростью, ВМ (рисунок 3.6) избирательно работает в генераторных или в двигательных режимах. При этом СУ КЭУ выполняет более сложные функции в сравнении с СУ традиционных или аккумуляторных ГЭУ.

В общем случае время электромагнитных переходных процессов, характеризующее динамические режимы работы электрической части КЭУ с ВМ и ВРШ, функциональная схема которой представлена на рисунке 3.6, значительно меньше времени механических переходных процессов, обусловленного моментами инерции подвижных механических частей. При этом форма зависимости мощности ВМ  $P_{ВМ}(t)$  практически повторяет форму зависимости мощности ГВ  $P_{ГВ}(t)$  (эквидистантна ей), отличаясь от нее на постоянную величину, равную номинальной мощности ГД  $N_{ГДн}$ .

При снижении напряжения АБ и/или ее емкости до минимально допустимых значений её разрядка в данном режиме прекращается до тех пор, пока

напряжение батареи посредством подзарядки по мере наличия избыточной мощности ГД не увеличится до допустимого значения [69].

Исходя из постановки задачи полную зарядку АБ экономически целесообразно производить от береговой сети, как правило в ночное время суток при стоянке судов, поскольку стоимость береговой ЭЭ ниже стоимости ЭЭ, вырабатываемой на борту судна. Кроме того, такая зарядка позволяет увеличивать моторесурс ГД судов.

На рисунке 3.8 представлена зависимость, поясняющая принцип управления ВРШ КЭУ с ВМ в функции мощности на гребном валу  $N_{ГВ}$ .

При малых углах разворота лопастей ВРШ, меньших значения  $\alpha_1$  (рисунок 3.8), соответствующих малым скоростям движения судна, ВМ работает в генераторном режиме, подзаряжая при необходимости АБ или обеспечивая ЭЭ группы отдельных общесудовых потребителей. Принцип управления КЭУ основан на одновременном согласованном воздействии на шаг ГВ и ПП.

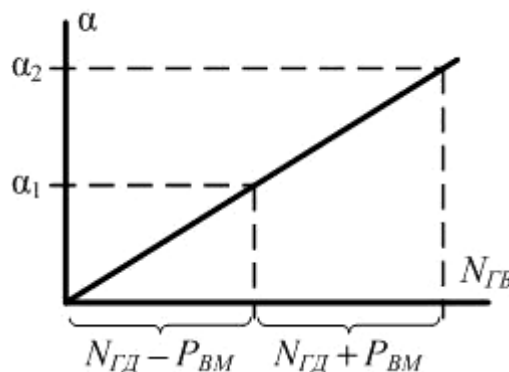


Рисунок 3.8 – Принцип управления ВРШ (изменения угла  $\alpha$ ) в функции мощности на гребном валу (ВРШ)  $P_V(N_{ГВ})$

Угол поворота лопастей ВРШ  $\alpha_1$  (рисунок 3.8) соответствует номинальной мощности (нагрузке) ГД  $N_{ГДн}$ .

При увеличении скорости судна для значений  $\alpha > \alpha_1$  (рисунок 3.8) ВМ посредством системы ДАУ переводится в двигательный режим, получая питание через ПП от АБ – рисунок 3.6. Муфта М2 при этом находится во включенном положении, а ПП осуществляет регулирование входных координат ВМ.

Максимальный угол поворота лопастей ВРШ  $\alpha_2$  (рисунок 3.8) соответствует максимальной нагрузке (упору) ГВ  $P_{ГВ\max}$ , при которой обеспечивается наибольшая скорость движения судна.

Необходимо отметить, что законы изменения мощностей могут носить разнообразный характер при неизменном конечном результате ( $N_{ГД} = N_{ГДн} \approx \text{const}$ ).

Схема КЭУ, аналогичная изображенной на рисунке 3.6, но с ВФШ и разобщительной муфтой М3, установленной между ВФШ и СР (рисунок 3.9), широко используется на быстроходных (глиссирующих) малотоннажных судах, для которых предложен способ разгона, повышающий эффективность их ГЭ, защищенный патентом на изобретение [70].

При разобщенной муфте М1 и замкнутых муфтах М2 и М3 ГВ приводится во вращение от синхронной ВМ, работающей в двигательном режиме и получающей питание от АБ через преобразователь ПП, посредством которого осуществляется преобразование постоянного тока АБ в переменный ток и плавное регулирование входной частоты тока ВМ – рисунок 3.9.

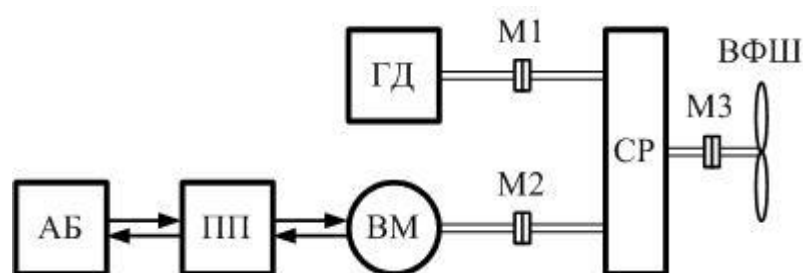


Рисунок 3.9 – Функциональная схема силового канала КЭУ с ВМ и ВФШ

Вращающийся в этом режиме ГВ создает упор, под действием которого судно движется с относительно малой скоростью в водоизмещающем режиме. Для увеличения скорости судна (частоты вращения ГВ) производится пуск ГД, вал которого с помощью муфты М1, обеспечивающей механическую параллельную работу ГД и ВМ, подключается к суммирующему редуктору СР. Благодаря совместной работе на ГВ через СР ГД и ВМ, судно разгоняется, преодолевая «горб» сопротивления. После выхода судна на режим выхода на подводные крылья (глиссирования) сопротивление движению судну, как известно, значительно снижается. При этом ВМ, работающая в двигательном режиме, отключается от

источника питания (ПП) и отсоединяется с помощью разобщительной муфты М2 от СР. Таким образом в режиме глиссирования судно движется только за счет ГД.

При движении судна в глиссирующем режиме (режиме движения на подводных крыльях) или в водоизмещающем режиме с приводом ГВ от ГД и наличии избыточной мощности у последнего, в случае необходимости осуществляется отбор этой мощности для зарядки АБ посредством ВМ, работающей в генераторном режиме, и ПП, функционирующего в режиме управляемого выпрямителя.

Таким образом, независимо от ходового режима, при наличии избытка мощности ГД существует возможность полезно использовать эту мощность, осуществляя подзарядку АБ при одновременном обеспечении номинальной нагрузки ГД.

При движении судна в глиссирующем режиме (режиме движения на подводных крыльях) с приводом от ГД мощность на ГВ и, соответственно, скорость судна, в случае необходимости, может быть кратковременно увеличена за счет подключения к СР с помощью муфты М2 ВМ, работающей в двигательном режиме и получающей питание от АБ через ПП. Таким образом, появляется возможность снизить динамические нагрузки на ГД в маневренных режимах работы судов, увеличивая их эксплуатационный ресурс.

При кратковременной стоянке судна у причала, например, во время высадки и посадки пассажиров, работа ГД в номинальном режиме обеспечивается регулируемой подзарядкой АБ. В этом случае разобщительная муфта М3 разомкнута, а муфты М1 и М2 (рисунок 3.9) замкнуты, ВМ работает в генераторном режиме, а ПП – в режиме управляемого выпрямителя.

Таким образом, предлагаемое научно-техническое решение повышает эффективность ТЭ судовых ПК, обеспечивая номинальные режимы работы ГД малотоннажных быстроходных судов, при которых минимальный удельный расход топлива и меньшие вредные выхлопы в атмосферу.

К достоинствам предлагаемого способа относится возможность движения малотоннажных глиссирующих судов при работе ГВ на малых скоростях от АБ, т. е. с нулевыми вредными выбросами в атмосферу.

Согласно рисункам 3.6 и 3.9, в состав силовых каналов (рисунок 3.1) КЭУ малотоннажных судов входят электромеханические преобразователи (ЭМП) – обратимые синхронные ВМ, к основным недостаткам которых, отмеченным в [71], следует отнести:

- сравнительно невысокую надежность из-за наличия одной трехфазной обмотки на статоре;
- достаточно низкую удельную мощность, обусловленную низкой эффективностью использования внутреннего пространства сердечника ротора;
- отсутствие возможности регулирования генерируемой мощности в генераторном режиме и электромагнитного момента в двигательном режиме.

С целью устранения основных указанных недостатков предложен ЭМП (рисунок 3.10), защищенный патентом на изобретение [72].

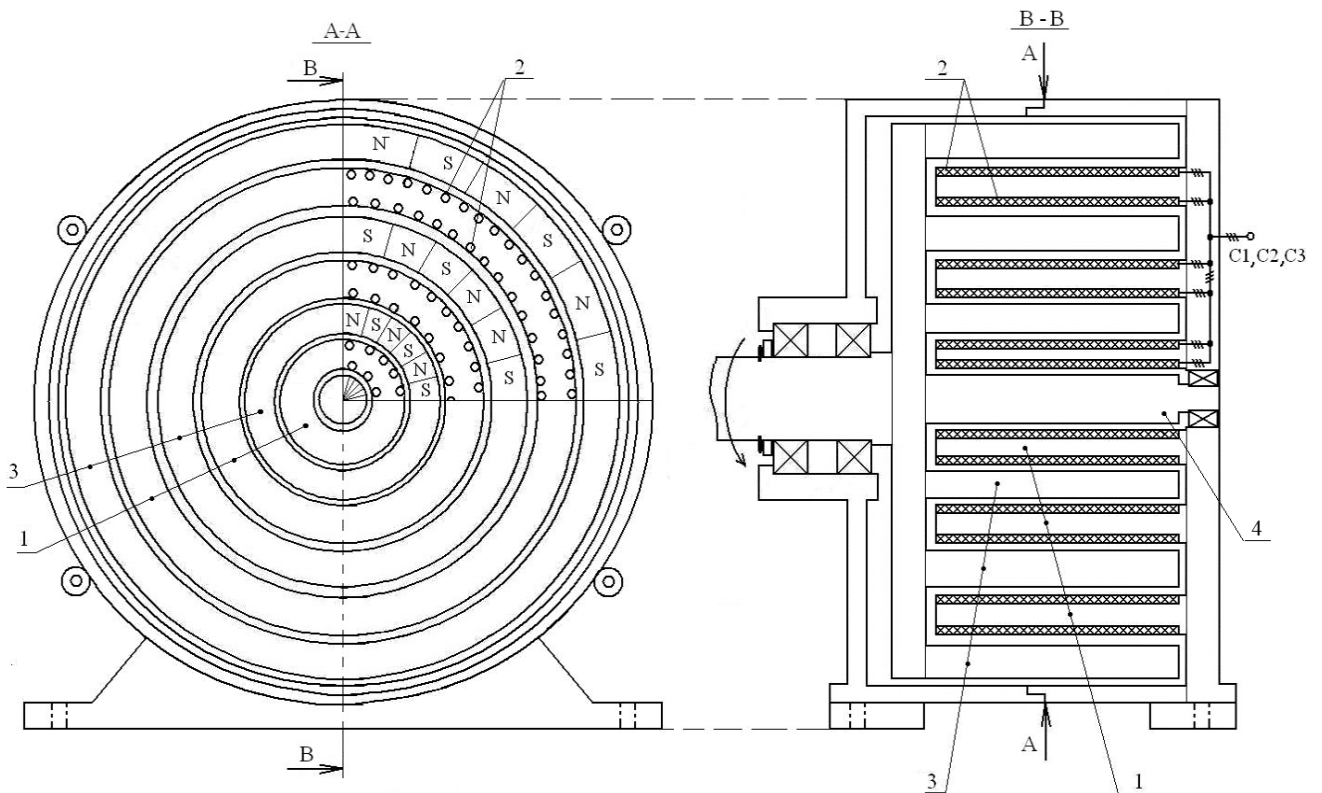


Рисунок 3.10 – Электромеханический преобразователь

В состав ЭМП входят статорно-роторные пары, содержащие как составные части статор и ротор – рисунок 3.10.



Статор содержит несколько набранных из штампованных пластин листовой электротехнической стали сердечников (магнитопроводов) 1 (например, три), на каждой внутренней и внешней поверхности которых уложена трехфазная обмотка 2, соединенная в «звезду» (рисунок 3.11). Между собой трехфазные обмотки соединены пофазно параллельно с образованием общих зажимов С1, С2 и С3.

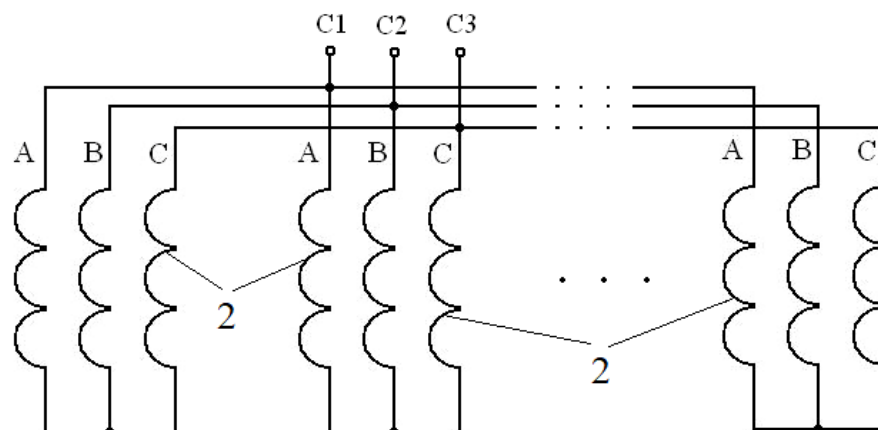


Рисунок 3.11 – Схема соединений трехфазных обмоток статора ЭМП

Для уменьшения взаимодействия магнитных потоков, создаваемых соседними трёхфазными обмотками 2, между каждой парой этих поверхностей расположены полые цилиндры из немагнитных материалов.

Ротор (индуктор) статорно-роторных пар состоит из нескольких, например, трех, полых цилиндров 3, а также центрального стержня 4. Каждый из цилиндров 3 содержит каркас, в котором установлены постоянные редкоземельные (например, неодимовые) магниты с чередующейся полярностью, благодаря которой внешняя и внутренняя поверхности образованных стенок каждого цилиндра имеют осевое переменное намагничивание.

Принцип работы предложенного ЭМП как синхронного ЭД основан на электромагнитном взаимодействии полюсов каждого вращающегося электромагнитного поля каждой соответствующей трехфазной обмотки 2 сердечника 1 с магнитными полюсами противоположной полярности постоянных редкоземельных магнитов каждого соответствующих цилиндров 3. Для разгона вала ЭМП до номинальной угловой скорости частота тока, подаваемого на его клеммы С1, С2 и С3, плавно увеличивается от 0 до 50 Гц посредством ПП.

В режиме синхронного генератора происходит обратное преобразование энергии (механической в электрическую).

Повышенная надежность данного ЭМП определяется наличием нескольких трехфазных обмоток 2.

Увеличение удельной мощности ЭМП в двигательном режиме обеспечивается за счет того, что одновременное синхронное силовое взаимодействие МДС трехфазных обмоток 2 сердечника 1 с соответствующими магнитными полюсами постоянных редкоземельных магнитов цилиндра 3 производится в нескольких воздушных зазорах между сердечниками 1 и цилиндрами 3, благодаря чему возрастает суммарный электромагнитный момент. Повышение удельной мощности ЭМП в генераторном режиме работы обеспечивается за счет использования нескольких трехфазных обмоток 2, которые в процессе работы пересекают магнитный поток чередующихся полюсами постоянных магнитов соответствующих цилиндров 3.

### 3.4 Выводы

1. Разработана на основании выполненных исследований эквивалентная функциональная схема электротехнических комплексов ГЭУ, включающая в себя силовой канал, содержащий ПД<sub>э</sub>, ГГ<sub>э</sub>, ПЭЭ<sub>э</sub>, ГЭД<sub>э</sub> и ГВ, и каналы управления на основе УУ и ИУ, к основным достоинствам которой относится наглядность и универсальность, обусловленная возможностью ее применения для судовых электроходов любого функционального назначения.

2. Выполнен обзор и анализ научно-технической и учебной литературы, по результатам которых сделано заключение об отсутствии единообразия в классификационных признаках судовых ГЭУ. До настоящего времени нет общепринятой классификации, включающей приемлемый диапазон классификационных признаков, наиболее полно характеризующих особенности отдельных ГЭУ. Не отражена их связь с другими судовыми ЭП.

3. Разработана классификация, наиболее полно охватывающая классификационные признаки судовых ГЭУ, используемая как средство для установления

связей между разнообразными ГЭУ и уточненной ориентировки в их количественном и функциональном многообразии, которая выражает систему, присущую отображенному действительному состоянию судовых ГЭУ, обуславливающую их зафиксированные свойства и отношения, организацию предпосылок для корректного прогнозирования основных направлений развития.

Предложенная классификация отражает в развернутом виде картину современного состояния судовых ГЭУ, стимулирует развитие теоретических аспектов их исследований, позволяет делать обоснованные прогнозы относительно неизвестных еще фактов или закономерностей, является качественным скачком в их развитии.

4. Выполнены исследования развития судовых ПК, включающих ГЭУ, на основании которых сделан вывод о том, что к перспективным направлениям дальнейшего развития КЭУ относится совершенствование их СУ с целью оптимизации эксплуатационных характеристик. При этом к основным относится решение задачи по организации такого управления КЭУ, при котором обеспечиваются технико-экономические и экологические показатели, соответствующие современным требованиям, предъявляемым к ПУ судов, функционирующим во всем допустимом диапазоне изменения нагрузок как в установившихся, так и в переходных режимах работы.

5. Предложена КЭУ, включающая в качестве дополнительных источников энергии АБ, к основным преимуществам которой относится возможность использования нереверсивных ГД установленной мощности, меньшей номинальной мощности ГВ (ВРШ), обеспечивая при этом работу ГД с номинальными параметрами и сокращение эксплуатационных расходов.

6. Разработаны способы управления судовой КЭУ, защищенные двумя патентами на изобретение, техническая реализация которых повышает эффективность ТЭ ПК малотоннажных судов.

7. Предложен ЭМП, защищенный патентом, техническая реализация которого в качестве ВМ силовых каналов КЭУ повышает их надежность и удельную мощность по сравнению с типовыми электрическими машинами.

## 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ СУДОВЫХ КЭУ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

### 4.1 Общая характеристика теории подобия и моделирования применительно к судовым КЭУ

При проектировании и реализации предлагаемых научно-технических решений КЭУ необходимо решение задач, связанных с моделированием и выбором их компонентов.

К необходимому и достаточному составу компонентов схемы силового канала электротехнического комплекса судовых КЭУ, сформированной на основании структурной схемы судовых ПУ (гл. 3, рисунок 3.1), варианты которой представлены на рисунках 3.3 и 3.6 (гл. 3) и основных требований, к которым относится повышенная надежность и живучесть, экономичность эксплуатации, необходимость функционирования ПД с квазипостоянной частотой вращения и моментом сопротивления (нагрузки), высокое быстродействие при протекания переходных процессов, относительная простота управления и др., следует отнести электромеханические преобразователи (ДГ, ВМ, ГЭД), статические источники ЭЭ и ПП.

Для комплексной оценки особенностей их функционирования в составе судовых КЭУ представляются актуальными исследования основных режимов работы методами теории подобия и моделирования.

В общем случае теория представляет необходимые и достаточные возможности для установления наличия подобия (геометрического, математического, физического и др.) или дает возможности разработать способы получения его [73]. При этом выявляемые соотношения между объектом исследования (оригиналом) и его моделью могут быть самыми различными (от масштабных при геометрическом подобии до относительно сложных функциональных зависимостей сопоставляемых объектов при математическом подобии (моделировании)).

Моделирование представляет собой метод опосредованного познания объективной реальности, которая представляется в виде взаимосвязанной совокупно-

сти свойств оригинала, отражающей различные аспекты его существования, внешнего взаимодействия и развития.

Применительно к постановке вопроса, судовые КЭУ могут быть условно представлены системами, включающими совокупности элементов (компонентов), которые рассматриваются как единое целое и организованы для решения поставленных задач (достижения целей функционирования) таким образом, что отдельные их компоненты связаны между собой некоторым системообразующим отношением. В отдельной системе могут быть выделены подсистемы, являющиеся относительно самостоятельными функционально связанными между собой частями, компоненты и их элементы, которые принимаются в определенной постановке задачи как неделимые составляющие.

Подсистемами исследуемых судовых КЭУ являются отдельно или совместно функционирующие силовые каналы (рисунок 3.3 и 3.6, гл. 3), их СУ. Основными компонентами подсистем являются ДГ, ВМ, АБ, ПП и ГЭД.

Совокупность процессов при функционировании или поведении системы в отключенном положении и проявляющихся в виде изменений состояний или режимов понимается как явление. Переходные и установившиеся режимы системы (КЭУ) представляются состояниями, которые характеризуются механическими, электрическими, электромеханическими и электромагнитными процессами, зависящими от собственных параметров системы и параметров возмущающих воздействий.

При наличии переходных режимов происходят непрерывные последовательные изменения параметров, которые обусловлены изменением начальных условий или появлением определенных возмущающих воздействий и приводят к отклонениям режимов функционирования от их установившихся значений.

Обзор и анализ вариантов моделей позволяет сделать вывод о том, что для судовых КЭУ при комплексной оценке их свойств в пределах поставленных задач целесообразно использовать математическое моделирование, которое позволяет избежать вынужденных затрат, необходимых при непосредственных исследованиях объектов функционирования. Построение математических моделей и фор-

мализация связей позволяет выявлять особенности функциональных характеристик объектов, способствует решению задач конкретных исследований. Корректность результатов определяется корректностью аналитических выражений математических моделей, количеством и качеством принятых допущений.

Методы исследования функционирования судовых КЭУ можно условно объединить в группы анализа и синтеза.

При использовании методов анализа для компонентов КЭУ математически моделируются процессы по составленным аналитическим выражениям. Выполнение заданных условий обеспечивается изменением исходных и текущих данных. К основным достоинствам методов анализа относится возможность определения необходимых параметров и переменных для конкретной структуры ПУ судна с ГЭУ в целом (гл. 3, рисунок 3.1) и для КЭУ (гл. 3, рисунки 3.3 и 3.6) в частности. Недостатком методов анализа, который относится к причинам ограничения их применения, является необходимость варьирования в ряде случаев относительно большим массивом данных, обусловленным структурными изменениями.

Методы синтеза, основанные на использовании теории инвариантности, оптимальных процессов, методов поиска оптимальных законов управления и др. [74], позволяют определять требуемую совокупность функций [75]. Основные методы синтеза обеспечивают приемлемые результаты для систем не более второго порядка. Их применение для решения задач исследований более сложных процессов, в частности в компонентах судовых КЭУ, связано с повышенными сложностями математических выкладок [76].

Многие недостатки устраняются при использовании метода динамического синтеза [77], который основан на решении обратных задач, по результатам которых определяются необходимые воздействия на управляемые величины с целью получения заданных законов изменения параметров определенных режимов. При использовании метода в качестве управляемых выбираются величины, связанные с механической и электромагнитной инерциями, которые позволяют проводить отдельные исследования происходящих в компонентах процессов, по результатам которых выбираются целесообразные законы изменения этих величин, ис-

пользуемых в качестве исходных данных при аналитических исследованиях режимов работы, которые рассматриваются как управляемые, при наличии возможностей получения прямых аналитических зависимостей, связывающих параметры режимов КЭУ с параметрами отдельных компонентов, что относится к достоинствам метода. Кроме того, использование метода динамического синтеза позволяет уменьшать число варьируемых величин при проектировании или модернизации судовых КЭУ с заданными динамическими свойствами. К недостаткам метода относится получение не для всех исследуемых случаев аналитических решений и сохранение перебора законов изменения выбранных переменных [74].

## **4.2 Моделирование ДГ судовых КЭУ**

### **4.2.1 Математическая модель ГД при функционировании в составе КЭУ**

Технико-экономические и экологические показатели КЭУ во многом определяются отдельной работой ПД (рисунок 3.6, гл. 3) или в составе ДГ (рисунок 3.3, гл. 3).

Область возможных рабочих режимов ПД (ГД) рассмотрена в гл. 1 (п. 1.3).

Линейная математическая модель ПД ДГ с управляющим воздействием по каналу подачи топлива при относительно незначительных изменениях параметров ПД при динамических режимах, обусловленных резким отклонением моментов нагрузок от их значений в установившихся режимах, приведена в [78, 79]. В [80] представлена модель ПД с усовершенствованной подачей воздуха при относительно медленных отклонениях нагрузок.

Представленные модели направлены на решения ограниченных задач управления определенного класса ПД и не учитывают специфику функционирования ДГ в КЭУ, обусловленную возможностями возникновения случайных управляющих и возмущающих воздействий.

При синтезе математической модели ДГ применительно к схемным решениям КЭУ, представленным на рисунках 3.3 и 3.6 (п. 3.3, гл. 3), функционирова-

ние ПД во всех допустимых режимах работы на основании [81] может быть описано следующим уравнением:

$$M_{ПД} - M_{сПД} = M_{\delta ПД}. \quad (4.1)$$

В уравнении (4.1)  $M_{ПД}$  – вращающий момент ПД (ГД);  $M_{сПД}$  – момент сопротивления (нагрузки) на валу ПД, создаваемый ГГ или системой М1–СР–ГВ (рисунки 3.3 и 3.6, гл. 3);  $M_{\delta ПД}$  – динамический момент ПД, возникающий при ускорениях.

Вращающий момент  $M_{ПД}$  может быть представлен как

$$M_{ПД} = M_{ПДi} - \Delta M_{ПД}, \quad (4.2)$$

где  $M_{ПДi}$  – индикаторный момент ПД;  $\Delta M_{ПД}$  – момент потерь ПД.

При анализе функционирования ПД учитываются текущие зависимости составляющих  $M_{ПД}$  (момента  $M_{ПДi}$  и  $\Delta M_{ПД}$  (4.2)) от угловой скорости  $\omega_{ПД}$ , часового расхода топлива  $h_{ГДч}$  и коэффициентов технического состояния  $K_{ТСi}$  ( $i$  – порядковый номер коэффициента), которые зависят от качества работы воздушной и топливной систем, компрессии в цилиндрах, вентиляционных потерь, потерь на трение в подшипниках и др.

В пределах решения поставленных задач выходными координатами объекта (ПД) являются значения угловой скорости  $\omega_{ПД}$ , а к управляющим воздействиям относится положение рейки топливного насоса  $x_{рн}$  ПД или ее аналога, фаза подачи топлива  $\theta_m$  и расход дополнительного воздуха  $Q_v$  от баллонов на компрессор (при наличии).

С учетом изложенного индикаторный момент ПД  $M_{ПДi}$  в (4.2) может быть выражен зависимостью [81]

$$M_{ПДi} = k_{Mi} \frac{h_{ГДч}}{\omega_{ПД}} \eta_i, \quad (4.3)$$

где  $k_{Mi}$  – коэффициент пропорциональности;  $\eta_i$  – индикаторный КПД ( $\eta_i = f_1(\omega_{ПД}, x_{рн}, \theta_m, Q_v)$ ).

Исходя из функциональной зависимости индикаторного КПД  $\eta_i$

$$M_{ПДi} = f_2(\omega_{ПД}, x_{рн}, \theta_m, Q_v). \quad (4.4)$$



Согласно [81, 82] момент потерь ПД  $\Delta M_{ПД}$  в (4.2) зависит от угловой скорости  $\omega_{ПД}$  ( $\Delta M_{ПД} = f_3(\omega_{ПД})$ ).

Динамический момент  $M_{\partial ПД}$  в (4.1) определяется из формулы (4.5)

$$M_{\partial ПД} = J_{\Sigma} \frac{d(\omega_{ПД} + \xi_{ПД})}{dt_p}, \quad (4.5)$$

где  $J_{\Sigma}$  – результирующий момент инерции подвижных частей ДГ или системы ГД–М1–СР–ГВ (рисунки 3.3 и 3.6, гл. 3);  $\omega_{ПД}$  и  $\xi_{ПД}$  – угловая скорость и девиация угловой скорости вала ПД;  $t_p$  – время динамических режимов.

Поскольку в соответствии с (4.3) индикаторный момент  $M_{ПДi}$  ПД зависит от  $\eta_i$ , а  $\eta_i$  – от фазы подачи топлива  $\theta_m$ , из выражения (4.1) с учетом (4.2) и (4.5)

$$\frac{d(\omega_{ПД} + \xi_{ПД})}{dt_p} = f_4(\omega_{ПД}, x_{рн}, \theta_m, Q_{\sigma}, M_{ПДi}). \quad (4.6)$$

На основании изложенного, после некоторых выполненных преобразований, представленных в частности в [81], функция ускорения вала ПД может быть представлена как:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_{ПД}}{dt_p} &= f_5(\omega_{ПД}, x_{рн}, \theta_m, Q_{\sigma}, M_{сПД}) = \\ &= a_1 + a_2 x_{рн} + a_3 Q_{\sigma} + a_4 x_{рн} Q_{\sigma} + a_5 x_{рн}^2 + a_6 Q_{\sigma} x_{рн}^2 + \\ &+ b_1 \theta_m + b_2 x_{рн} \theta_m + b_3 Q_{\sigma} \theta_m + b_4 \theta_m^2 + b_5 Q_{\sigma} \theta_m^2 + b_6 x_{рн} \theta_m^2. \end{aligned} \quad (4.7)$$

В (4.7) коэффициенты

$$\begin{aligned} a_i &= f_i(\omega_{ПД}, x_{рн}, \theta_m, Q_{\sigma}, M_{сПД}); \quad i = 1 \dots 6; \\ b_j &= f_j(\omega_{ПД}, x_{рн}, \theta_m, Q_{\sigma}, M_{сПД}); \quad j = 1 \dots 6. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Таким образом представленная выражениями (4.7) и (4.8) математическая модель ПД для отдельной работы или в составе ДГ агрегата, в которой кроме трех управляющих воздействий учитывается девиация угловой скорости вала и коэффициенты технического состояния, расширяет возможности для аналитических исследований ПД, функционирующих в составе судовых ПУ с КЭУ и позволяет корректно решать задачи управления.

## 4.2.2 Математическое моделирование электромеханических источников ЭЭ (генераторов)

Характерной отличительной особенностью эксплуатации электромеханических источников ЭЭ (ГГ) в составе КЭУ является разнообразие режимов их работы (от изменений нагрузок в широком диапазоне, обусловленных характеристиками ГВ (гл. 1, п. 1.1) при работе судовых ПК в частности по системе ПД–ГГ–М1–СР–ГВ (рисунок 3.3.2, п. 3.3, гл. 3) до незначительных изменений отдаваемой ГГ мощности при реализации разработанного в гл. 3 способа (п. 3.3, рисунок 3.5)).

В общем случае изменение режимов работы генераторов влияет на их параметры, что приводит к необходимости учета комплекса факторов и принятия приемлемых допущений при их моделировании.

На основании выполненного анализа (гл. 1, п. 1.5) при реализации КЭУ к предпочтительным вариантам относится использование электромеханических преобразователей переменного тока, в частности СГ и АД (гл. 2, п. 2.3).

При моделировании явнополюсных СГ целесообразно использование системы дифференциальных уравнений Парка-Горева, которая описывает протекание электромагнитных процессов с учетом их взаимного влияния в  $d$ ,  $q$ ,  $0$  осях, связанных с ротором [83, 84, 85 и др.]:

$$\begin{cases} u_d = -\frac{1}{\omega_o} p\Psi_d - \Psi_q(1+s) - R_{sd}i_d; \\ u_q = -\frac{1}{\omega_o} p\Psi_q + \Psi_d(1+s) - R_{sq}i_q; \\ u_f = \frac{1}{\omega_o} p\Psi_f + R_f i_f; \\ u_{ddi} = \frac{1}{\omega_o} p\Psi_{ddi} + R_{ddi}i_{ddi}; \\ u_{dqi} = \frac{1}{\omega_o} p\Psi_{dqi} + R_{dqi}i_{dqi}. \end{cases} \quad (4.9)$$

В системе уравнений (4.9):  $u_d, u_q, u_f, u_{ddi}, u_{dqi}$  – значения напряжений по  $d, q$  осям, в обмотке возбуждения, и в демпферных контурах по  $d, q$  осям ( $i = 1 \dots n$  –

порядковые номера и количество контуров по  $d, q$  осям), соответственно;  $\omega_o$  – синхронная угловая скорость;  $p$  – оператор дифференцирования ( $p = d/dt$ );  $\Psi_d, \Psi_q, \Psi_f, \Psi_{ddi}, \Psi_{dqi}$  – значения потокосцеплений по  $d, q$  осям, в обмотке возбуждения и в демпферных контурах по  $d, q$  осям, соответственно;  $s$  – условное скольжение вращающейся части СГ относительно синхронно вращающихся осей;  $R_{sd}, R_{sq}, R_f, R_{ddi}, R_{dqi}$  – активные сопротивления фазных обмоток статора СГ по  $d, q$  осям, обмотки возбуждения и демпферных контуров по  $d, q$  осям, соответственно;  $i_d, i_q, i_f, i_{ddi}, i_{dqi}$  – значения токов по  $d, q$  осям, в обмотке возбуждения и в демпферных контурах по  $d, q$  осям, соответственно.

Динамические свойства СГ в составе ДГ описываются уравнением совместного движения жестко соединенных подвижных частей ПД и СГ

$$M_{ПД} - M_{СГ} = \frac{T_j}{\omega_o} p\omega = T_j ps, \quad (4.10)$$

где  $M_{ПД}$  – вращающий момент, создаваемый ПД;  $M_{СГ}$  – момент сопротивления, создаваемый СГ;  $T_j$  – постоянная инерции;  $\omega$  – мгновенная угловая скорость при ускорении.

Система уравнений для потокосцеплений в СГ из (4.9) может быть представлена в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_d = -\frac{1}{p} \omega_o (u_d + \Psi_q (1+s) + R_{sd} i_d); \\ \Psi_q = -\frac{1}{p} \omega_o (u_q - \Psi_d (1+s) + R_{sq} i_q); \\ \Psi_f = \frac{1}{p} \omega_o (u_f - R_f i_f); \\ \Psi_{ddi} = \frac{1}{p} \omega_o (u_{ddi} - R_{ddi} i_{ddi}); \\ \Psi_{dqi} = \frac{1}{p} \omega_o (u_{dqi} - R_{dqi} i_{dqi}). \end{array} \right. \quad (4.11)$$

При принятии допущения об отсутствии влияния насыщения на сопротивления рассеяния контуров машины [84], система (4.11) представляется как:

$$\begin{cases} \Psi_d = \Psi_{\delta d} + x_{\sigma d} i_d; \\ \Psi_q = \Psi_{\delta q} + x_{\sigma q} i_q; \\ \Psi_f = \Psi_{\delta f} + x_{\sigma f} i_f; \\ \Psi_{ddi} = \Psi_{\delta ddi} + x_{\sigma ddi} i_{ddi}; \\ \Psi_{dqf} = \Psi_{\delta dqf} + x_{\sigma dqf} i_{dqf}. \end{cases} \quad (4.12)$$

В (4.12)  $\Psi_{\delta d}, \Psi_{\delta q}, \Psi_{\delta f}, \Psi_{\delta ddi}, \Psi_{\delta dqf}, \Psi_{\delta qf}$  – проекции результирующих потокоцеплений воздушных зазоров контуров соответственно на продольную  $d$  и поперечную  $q$  оси;  $x_{\sigma d}, x_{\sigma q}, x_{\sigma f}, x_{\sigma ddi}, x_{\sigma dqf}$  – индуктивные сопротивления рассеяния фазных обмоток статора СГ по  $d, q$  осям, обмотки возбуждения и демпферных контуров по  $d, q$  осям, соответственно.

Выражения для потокоцеплений в воздушных зазорах СГ в общем случае имеют вид:

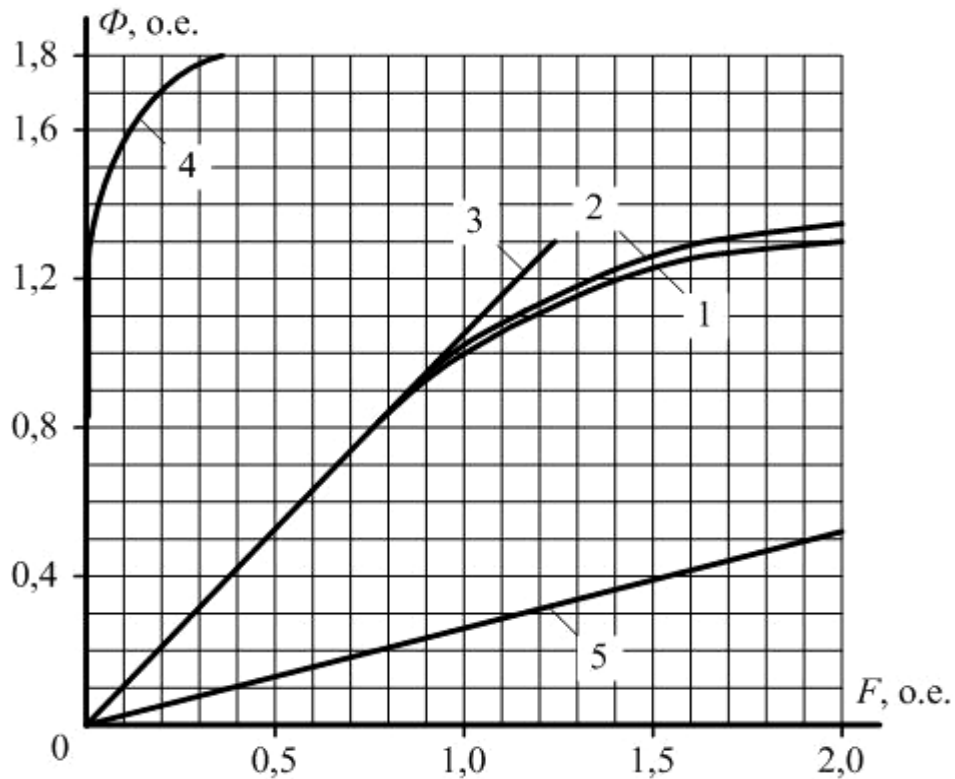
$$\begin{cases} \Psi_{\delta d} = k_d x_{ad} \left( i_d + i_f + \sum_{i=1}^n i_{ddi} \right); \\ \Psi_{\delta q} = k_q x_{aq} \left( i_q + i_f + \sum_{i=1}^n i_{dqf} \right). \end{cases} \quad (4.13)$$

В (4.13)  $k_d, k_q$  – эквивалентные коэффициенты, учитывающие насыщение стали СГ по  $d, q$  осям;  $x_{ad}, x_{aq}$  – реактивность реакции статора по соответствующим  $d, q$  осям, определяемая потоком взаимодействия, которая в общем случае зависит от насыщения магнитной системы СГ.

Точность аналитических исследований зависит от степени учета насыщения, который может осуществляться с использованием характеристик намагничивания СГ, построенных по результатам расчета магнитных цепей для режима холостого хода, к которым относится определенный ток возбуждения  $I_f$  или магнитодвижущая сила (МДС)  $F_{fm}$ , образующие магнитное поле взаимной индукции с полным потоком  $\Phi_{fm}$ , индуктирующим в обмотке статора ЭДС  $E_s$ .

К характеристикам намагничивания СГ относится основная характеристика  $\Phi_{fm} = f(F_{fm})$ , характеристика намагничивания магнитопровода статора и зазора (переходная)  $\Phi_{fm} = f(F_s)$ , воздушного зазора  $\Phi_{fm} = f(F_\delta)$ , характеристика намагни-

чивания магнитопровода ротора  $\Phi_r = f(F_r)$  и характеристика намагничивания для потока рассеяния  $\Phi_{f\sigma} = f(F_s)$  [84], представленные в относительных единицах (о. е.) на рисунке 4.1.



1 –  $\Phi_{fm} = f(F_{fm})$ ; 2 –  $\Phi_{fm} = f(F_s)$ ; 3 –  $\Phi_{fm} = f(F_\delta)$ ; 4 –  $\Phi_r = f(F_r)$ ;  $\Phi_{f\sigma} = f(F_s)$

Рисунок 4.1 – Характеристики намагничивания СГ

Учет насыщения с использованием характеристик намагничивания позволяет более корректно рассматривать потоки рассеяния обмоток возбуждения СГ при изменении нагрузок в допустимом диапазоне, вычислять МДС  $F_{fm}$ , пропорциональную кратности тока возбуждения  $i_f$  при холостом ходе.

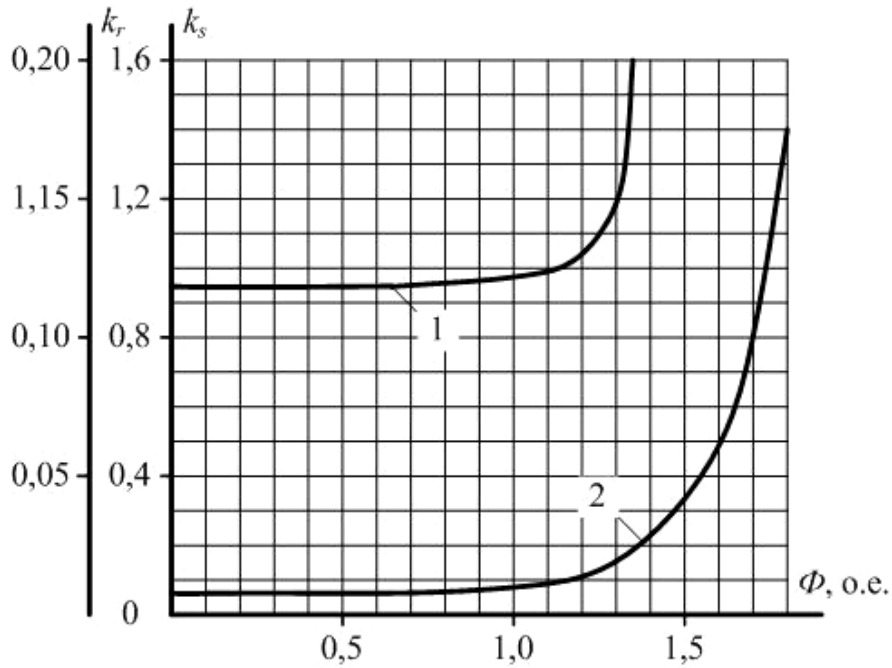
Ток возбуждения  $i_f$  может быть определен по формуле, приведенной в [86]:

$$i_f = \frac{F_{fm}}{x_a} \operatorname{tg} \alpha_0, \quad (4.14)$$

где  $x_a$  – реактивность реакции статора;  $\alpha_0$  – угол наклона касательной к функции  $\Phi_{fm} = f(F_s)$  в начале координат (точке 0) – рисунок 4.1.

При насыщении изменяются сопротивления взаимоиндукций СГ в функции результирующей ЭДС  $E_s$  и создаются дополнительные падения магнитных напряжений по продольной  $d$  оси, обусловленные токами в поперечных контурах.

Проекция результирующей МДС статора и зазора  $F_{sd}$  на продольную ось находится по зависимости  $F_{sd} = k_s \Phi_{sd}$  ( $k_s$  – коэффициент взаимосвязи ( $k_s = f(\Phi_{sd})$ )) [87] – рисунок 4.2.



$$1 - k_s = f(\Phi_{sd}); 2 - k_r = f(\Phi_{sd})$$

Рисунок 4.2 – Зависимости коэффициентов  $k_s$  и  $k_r$ , устанавливающих взаимосвязи между  $\Phi$  и  $F$  при изменении насыщения магнитной системы СГ

МДС магнитопровода ротора  $F_r$  СГ из характеристики намагничивания  $\Phi_r = f(F_r)$  может быть выражена как  $F_r = k_r \Phi_r$  ( $k_r = f(\Phi_r)$  – рисунок 4.2;  $\Phi_r = \Phi_{rd} + \Phi_{f\sigma}$ ).

Поток рассеяния обмотки возбуждения СГ  $\Phi_{f\sigma}$  может быть определен по зависимости  $\Phi_{f\sigma} = f(F_{sf})$ , вариант которой представляется как  $\Phi_{f\sigma} = k_{f\sigma} F_{sf}$  ( $k_{f\sigma}$  – коэффициент взаимосвязи ( $k_{f\sigma} = f(F_{sf})$ ) [87]).

На основании изложенного, с учетом [87] выражения для эквивалентных коэффициентов  $k_d$ ,  $k_q$ , учитывающих насыщение стали СГ по  $d$ ,  $q$  осям для (4.13), могут быть представлены в следующем виде:

$$k_d = \frac{(1 + k_r k_{f\sigma}) \left( \frac{i_f}{1 + k_r k_{f\sigma}} + k_{\xi d} \left( i_d + \sum_{i=1}^{n_d} i_{di} \right) - k_{\xi} k_{\xi q} \frac{x_{aq}}{x_{ad}} \left| i_q + \sum_{i=1}^{n_q} i_{qi} \right| \right)}{\left( k_r + k_s (1 + k_r k_{f\sigma}) \right) \left( i_d + i_f + \sum_{i=1}^{n_d} i_{di} \right) \operatorname{tg} \alpha_0}, \quad (4.15)$$

$$k_q = k_{\xi q}. \quad (4.16)$$

В выражениях (4.15) и (4.16)  $k_{\xi} = f(E_s)$ ,  $k_{\xi d} = f(E_s)$ ,  $k_{\xi q} = f(E_s)$  – коэффициенты насыщения СГ.

Приведенная на основе дифференциальных уравнений Парка-Горева математическая модель для широко используемых в судовой энергетике явнополусных СГ, учитывающая насыщение магнитных систем, позволяет повысить точность аналитических исследований переходных и установившихся режимов функционирования генераторов в составе ДГ судовых КЭУ (гл. 3, рисунки 3.3 и 3.6) за счет учета изменения потока рассеяния обмотки возбуждения СГ при изменении нагрузок в допустимом диапазоне.

### **4.3 Анализ и моделирование статических источников ЭЭ (АБ)**

#### **4.3.1 Анализ электрохимических источников энергии**

В настоящее время нет совершенных АБ, соответствующих в полной мере предъявляемым требованиям. Принятие решений по использованию определенных типов аккумуляторов для конкретного применения основывается на определенных спецификах применения источников питания, технологических предпочтениях, а также на анализе их основных достоинств и недостатков.

Обзор и сравнительный анализ наиболее приемлемых вариантов статических источников ЭЭ (АБ) применительно к судовым КЭУ выполнен в [88, 89] на основании данных литературных источников [90, 91, 92 и др.].

При выборе статических источников в первую очередь учитываются такие показатели как плотность энергии  $W_e$ , напряжение элемента  $U_{\varepsilon}$ , ток нагрузки  $I_{нэ}$ , число рабочих циклов «заряд-разряд»  $n_{ц}$  и стоимость.

В таблице П.4.1 (приложение 4) приведены усредненные характеристики основных типов аккумуляторов, рассматриваемых для возможностей использования в судовых КЭУ, к которым относятся SLA (Sealed Lead Acid) – герметизированные свинцово-кислотные, Fe-Ni – железо-никелевые, Ni-Cd – никель-кадмиевые, Ni-Mh – никель-металлогидридные, LTO – литий-титанатные, LFP

(LiFePo<sub>4</sub>) – литий-железо-фосфатные, Li-ion – литий-ионные, Ag-Zn – серебряно-цинковые и LIP (Li-polymer) – литий-полимерные аккумуляторы.

К основным характеристикам АБ при их использовании в технологических процессах КЭУ, представленным в общем случае в таблице П.4.1 приложения 4, относится величина плотности (количества) энергии  $W_e$  аккумулятора – строка 1.

Значение напряжения элементов  $U_e$  (таблица П.4.1, строка 2) определяется их конструктивными особенностями и составом электрохимической системы.

Токи нагрузок  $I_{нэ}$  в общем случае зависят от характерных особенностей нагрузок аккумуляторов – строка 3 (таблица П.4.1).

При условии правильного и регулярного обслуживания число рабочих циклов «заряд-разряд»  $n_{ц}$  многих аккумуляторов (таблица П.4.1, строка 4) может значительно отличаться в сторону увеличения от нормированных, и напротив, без проведения тренировочных циклов количество зарядок-разрядок может уменьшаться в разы [88]. Для большинства типов аккумуляторов число рабочих циклов  $n_{ц}$  зависит от глубины разряда. Незначительные разряды обеспечивают как правило повышенное количество циклов.

Минимальное время зарядки аккумуляторов  $t_{зmin}$  зависит от их конструктивных и других отличий – строка 5 (таблица П.4.1).

Под «эффектом памяти» (таблица П.4.1, строка 6) понимаются потери емкости при нарушениях рекомендованных режимов зарядки, в частности при подзарядке не полностью разрядившихся аккумуляторов, обусловленная укрупнением кристаллических образований их активных веществ вследствие чего уменьшаются площади активных рабочих поверхностей. При наличии «эффекта памяти» через некоторое время эксплуатации аккумулятора не представляется возможной его зарядка до полной емкости.

Саморазрядка (таблица П.4.1, строка 7) происходит при полностью отключенных аккумуляторах и обусловлена протекающими в них внутренними процессами – реакциями окисления и восстановления на электродах.

Диапазон рабочих температур  $\Delta t_p$  в таблице П.4.1 (строка 8) указан для режимов разрядки.



Согласно таблицы П.4.1 (строка 9) больше половины рассматриваемых типов аккумуляторов не требуют периодичности обслуживания.

К самым неустойчивым показателям относятся стоимостные характеристики, которые имеют широкий ценовой диапазон.

Характерными особенностями современных свинцово-кислотных (SLA) аккумуляторов (таблица П.4.1, графа 3) является способность удерживать номинальную силу тока при низком напряжении, возможность зарядки от простейших зарядных устройств, улучшение работы в буферном режиме (в режиме постоянной подзарядки срок службы доведен до 25 лет), отсутствие «эффекта памяти», незначительная величина саморазрядки, широкий типоразмерный ряд и относительно низкая стоимость. К основным недостаткам, присущим SLA аккумуляторам, относится невысокая плотность энергии, выделение взрывоопасных газов, повышенное время процесса зарядки. Кроме того, хранение свинцово-кислотных аккумуляторов в разряженном состоянии вызывает сульфатацию, которая делает последующие зарядки затруднительными или невозможными, вследствие чего SLA аккумуляторы выдерживают относительно небольшое число циклов «заряд-разряд». При низких значениях температур у SLA аккумуляторов по нелинейной зависимости существенно уменьшается способность создавать большой ток нагрузки (для одного элемента падение напряжения достигает 5 мВ на 1 °С).

В современных электротехнических комплексах транспортных средств используются железо-никелевые (Fe-Ni) аккумуляторы – таблица П.4.1, графа 4. В частности в машинах напольного безрельсового электрифицированного транспорта эксплуатируются тяговые АБ с никель-железной электрохимической системой и комбинированной конструкцией блоков электродов ТНЖК, плотность энергии  $W_e$  которых составляет (28...33) Вт·ч/кг. Число рабочих циклов «заряд-разряд» таких АБ больше или равно 1000. ЭДС аккумулятора составляет 1,2 В. К преимуществам Fe-Ni аккумуляторов относится сравнительно незначительная зависимость емкости аккумуляторов от режимов разрядов, повышенная стойкость к режимам коротких замыканий и термическим ударам, высокий срок службы. Эксплуатационная емкость железо-никелевых аккумуляторов при равной теоретиче-

ской полной емкости, может в разы превышать эксплуатационную емкость свинцово-кислотных аккумуляторов. К основным недостаткам Fe-Ni аккумуляторов следует отнести низкую плотность энергии и сравнительно небольшие токи нагрузок, их повышенные размеры и массу, превышающие до двух раз аналогичные показатели свинцово-кислотных аккумуляторов, наличие «эффекта памяти».

Щелочные никель-кадмиевые (Ni-Cd) аккумуляторы (таблица П.4.1, графа 5) нашли применение в различных отраслях хозяйственной деятельности, включая наземный и водный транспорт. К их характерным особенностям относится наличие относительно низкого значения внутреннего сопротивления, что приводит к их нагреву только при режиме продолжающейся зарядки полностью заряженного аккумулятора. Основными достоинствами Ni-Cd аккумуляторов является повышенная надежность, минимальное время зарядки, устойчивость к воздействию температур в широком диапазоне (стабильная работа при допустимых отрицательных температурах не снижает их емкости), возможность длительного хранения в разряженном состоянии, относительно низкие стоимостные показатели. К недостаткам никель-кадмиевых аккумуляторов следует отнести сравнительно низкую плотность энергии и высокий уровень саморазрядки, наличие высокотоксичного кадмия.

Никель-металлогидридные (Ni-Mh) аккумуляторы (таблица П.4.1, графа 6), входящие в группу щелочных, в качестве источников ЭЭ могут использоваться в циклических режимах или в режимах ожидания. Основными являются циклические режимы («заряд-разряд»). К основным преимуществам никель-металлогидридных аккумуляторов следует отнести повышенные возможности увеличения их энергетической плотности, простоту хранения и транспортировки, не требующих регулярного контроля, высокую экологичность, обусловленную содержанием в них только очень слабых токсинов и возможностью вторичных переработок. Недостатки Ni-Mh аккумуляторов заключаются в ограниченных сроках службы при преимущественно высоких токах нагрузок, снижении емкостей уже после 200 циклов «заряд-разряд», предпочтительности ограниченных токов разрядки, наличии «эффекта памяти» и повышенных саморазрядках.

Литий-титанатные (LTO) аккумуляторы (таблица П.4.1, графа 7) относятся к разновидностям литиевых аккумуляторов. Области их применения в настоящее время расширяются. LTO батареи используются в том числе в транспортных электротехнических комплексах и различных энергосистемах. К основным достоинствам литий-титанатных аккумуляторов относится самый высокий из рассматриваемых аккумуляторов циклический ресурс «заряд-разряд», усредненное значение которого составляет 25000 циклов, быстрая зарядка, наличие относительно низкого значения внутреннего сопротивления, отсутствие «эффекта памяти» и широкий диапазон рабочих температур. Кроме того, использование литий-титаната существенно увеличивает удельную емкость аккумуляторов, обеспечивает повышенную проводимость и высокую плотность тока. Они характеризуются малым саморазрядом, высоким уровнем взрыво- и пожаробезопасности. К недостаткам LTO аккумуляторов относится сравнительно невысокая удельная энергия. К ограничениям использования литий-титанатных аккумуляторов относятся их массо-размерные и стоимостные показатели.

Литий-железо-фосфатные (LFP или  $\text{LiFePO}_4$ ) аккумуляторы (таблица П.4.1, графа 8) также являются разновидностью литиевых аккумуляторов и относятся к наиболее перспективным направлениям их развития. К основным достоинствам LFP аккумуляторов следует отнести стабильность напряжения практически до полного их разряда, отсутствие «эффекта памяти», сравнительно широкий диапазон рабочих температур, высокие значения пиковых напряжений и повышенную экологичность. Недостатками литий-железо-фосфатных аккумуляторов являются относительно невысокие значения плотности энергии и тока нагрузки, повышенные стоимостные показатели.

Литий-ионные (Li-ion) аккумуляторы (таблица П.4.1, графа 9), обладающие относительно высокой энергоемкостью, позволяют при прочих равных условиях получать большие токи с меньшего объема запаса энергии и уменьшать их массо-размерные характеристики. Такие аккумуляторы находят свое применение в качестве источников энергии в накопителях энергии в энергетических системах, электромобилях и др. К преимуществам Li-ion аккумуляторов относится также высо-

кое напряжение эксплуатации, среднее значение которого составляет 3,7 В, отсутствие «эффекта памяти», самая низкая из рассматриваемых аккумуляторов саморазряда, широкий температурный диапазон эксплуатации. Характерной особенностью литий-ионных аккумуляторов является неоднозначность границ степени заряженности 100 %. Литий-ионные (Li-ion) аккумуляторы имеют следующие недостатки: склонность к перезарядкам (нуждаются в специальных алгоритмах, ограничивающих избыточные заряды в буферных режимах); необходимость периодических балансировок как в буферных, так и в циклических режимах; сравнительно высокую стоимость. Кроме того, неоднозначность границ полной степени заряженности обуславливает необходимость использования систем контроля и управления АБ (Battery Management System (BMS)), которые в общем случае предназначены для контроля циклов «заряд-разряд» и их количества, отслеживания состояния батарей и их компонентов.

Серебряно-цинковые (Ag-Zn) аккумуляторы (таблица П.4.1, графа 10) характеризуются повышенной плотностью энергии. Их удельные энергетические характеристики имеют незначительную зависимость от времени разрядки. Даже разряжаясь токами, близкими к токам короткого замыкания, серебряно-цинковые аккумуляторы отдадут нагрузкам практически всю емкость. Они имеют относительно низкие массо-размерные показатели, обладают высокой механической прочностью и относятся к экологически чистым аккумуляторам промышленной группы. Остальные эксплуатационно-технические характеристики Ag-Zn аккумуляторов имеют худшие по сравнению с большинством других рассматриваемых аккумуляторов показатели. Срок сохранения их без электролита составляет около пяти лет, а с электролитом ориентировочно шесть месяцев. Такие аккумуляторы имеют достаточно высокие стоимостные показатели.

Литий-полимерные (LIP или Li-polymer) аккумуляторы (таблица П.4.1, графа 11) представляют собой усовершенствованные конструкции литий-ионных аккумуляторов. Они обладают в сравнении с другими типами рассматриваемых аккумуляторов самой высокой плотностью энергии и характеризуются повышенным напряжением. У LIP аккумуляторов практически отсутствует «эффект памя-

ти». Кроме того, к достоинствам литий-полимерных аккумуляторов относится относительно низкий уровень саморазряда и незначительные перепады напряжения по мере их разрядки. К основным недостаткам LIP аккумуляторов относится высокая саморазрядка и сравнительно низкое количество рабочих циклов «заряд-разряд».

Выполненные исследования дают основание сделать вывод о том, что несмотря на определенное разнообразие статических источников энергии и опыта их промышленного использования, выбор типов АБ необходимо производить исходя из предъявляемых требований, сформированных на основании условий предстоящей эксплуатации.

Емкость и напряжение АБ для исследуемых научно-технических решений судовых КЭУ, представленных на рисунках 3.3 и 3.6 (гл. 3)), должны соответствовать зарядной мощности  $P_з$ , определяемой по формуле

$$P_з = U_з I_з, \quad (4.17)$$

соизмеримой с номинальной мощностью ГД  $N_{ГДн}$ .

В формуле (4.17)  $U_з$  – среднее значение зарядного напряжения;  $I_з$  – зарядный ток, определяемый из соотношения

$$I_з = k_{АБ} C_{АБ}, \quad (4.18)$$

где  $k_{АБ}$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от типа используемой АБ;  $C_{АБ}$  – емкость АБ.

При наличии АБ со значениями емкостей, больших необходимых, пропорционально увеличивается время их подзарядки от ДГ, т. к. мощности судовых ДГ являются ограниченными. Такой вариант АБ целесообразно использовать в случаях, когда зарядка АБ производится преимущественно от сети береговой ЭЭ.

У АБ меньших относительно необходимых значений емкостей увеличивается скорость их подзарядки от ДГ, что приводит к уменьшению времени процесса зарядки. При этом зарядка АБ от береговой сети ЭЭ представляется второстепенной. Необходимо отметить, что использование АБ меньших емкостей приводит к их более быстрой разрядке и увеличению количества циклов «заряд-разряд» при повышенной стоимости судовой ЭЭ относительно береговой.

К эффективным эксплуатационным режимам АБ относится их функционирование в режимах, близких к номинальным. Однако их соблюдение применительно к АБ не позволяет реализовывать рабочие режимы судовых ПК с КЭУ во всем допустимом диапазоне. К рациональным вариантам решения задач, направленных на устранение данного противоречия, относится определение эксплуатационных характеристик АБ с приемлемым сохранением ресурса.

Для тяговых АБ судовых КЭУ (рисунки 3.3 и 3.6, гл. 3) характерны наиболее интенсивные режимы (циклы) «заряд-разряд». Исходя из условий эксплуатации судов возможен частичный расход емкости АБ или расход до минимального допустимого предела. При этом в течение суток возможно несколько полных циклов «заряд-разряд».

К факторам, которые влияют на ресурс АБ относится их саморазряд, поскольку большинство катодов подвержены процессу саморазряда даже в режиме умеренного окисления. При этом происходит окисление растворителей на положительных электродах. На процессы саморазряда влияет и разложение электролита на электродах, растворение материала электродов и др. [93].

#### **4.3.2 Моделирование статических источников ЭЭ – аккумуляторов**

На основании выполненного анализа научно-технической литературы [94, 95, 96 и др.] сделан вывод о том, что для исследований функционирования АБ в составе электротехнических комплексов судовых КЭУ целесообразно использование математической модели Тевенина [97].

Вариант эквивалентной электрической схемы замещения, описывающей динамические процессы в аккумуляторе при изменении зарядного или разрядного тока и приемлемой при решении поставленных задач, представлен на рисунке 4.3.

На рисунке 4.3:  $E_a$  – источник ЭДС аккумулятора;  $R_a$  – омическое сопротивление (резистор), характеризующее конструктивные особенности элемента;  $R_\epsilon$  – эквивалентный поляризационный резистор;  $C_\epsilon$  – эквивалентный поляризационный конденсатор, характеризующий динамические параметры аккумулято-

ров;  $U_a$ ,  $I_a$  – напряжение на клеммах аккумулятора и ток аккумулятора, соответственно.

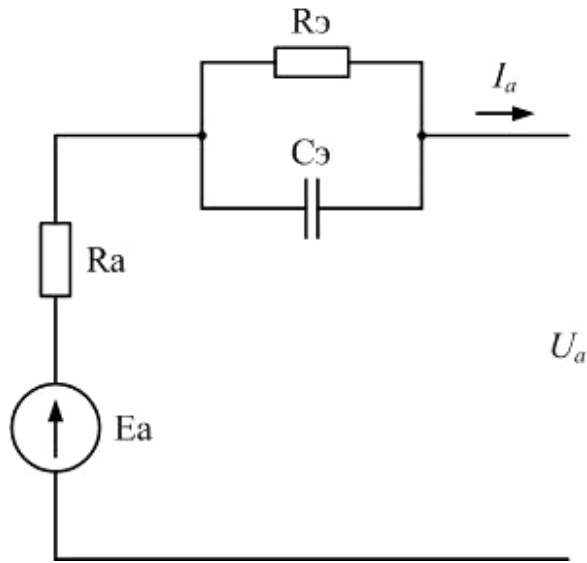


Рисунок 4.3 – Эквивалентная электрическая схема замещения аккумулятора, отражающая процесс разрядки

Для эквивалентной электрической схемы замещения (рисунок 4.3) справедлива следующая система уравнений:

$$\begin{cases} U_a = E_a - (I_a R_a + U_{RC}); \\ \frac{dU_{RC}}{dt} = \frac{I_a}{C_э} - \frac{U_{RC}}{R_э C_э}. \end{cases} \quad (4.19)$$

В системе (4.19)  $E_a$  – ЭДС источника  $E_a$  (рисунок 4.3);  $R_a$  – величина сопротивления резистора  $R_a$ ;  $U_{RC}$  – поляризационное напряжение;  $C_э$  – емкость эквивалентного конденсатора  $C_э$ ;  $R_э$  – величина сопротивления эквивалентного поляризационного резистора  $R_э$  (рисунок 4.3).

При зарядке аккумулятора/АБ справедливо следующее выражение для уравнения электрического равновесия

$$U_a = E_a + R_a I_a - K \frac{Q}{Q - I_a t} (I_a t + i_a) + A e^{-B I_a t}, \quad (4.20)$$

а при разрядке

$$U_a = E_a - R_a I_a - K \frac{Q}{I_a t - k_q Q} i_a - K \frac{Q}{Q - I_a t} I_a t + A e^{-B I_a t}. \quad (4.21)$$

В уравнениях (4.20) и (4.21)  $K$  – коэффициент поляризации;  $Q$  – емкость (количество активного материала аккумулятора/АБ);  $k_q$  – коэффициент пропорциональности;  $i_a$  – текущее значение тока разрядки/зарядки;  $A$ ,  $B$  – эмпирические коэффициенты.

Существуют и другие аналитические зависимости, описывающие разрядку и зарядку аккумуляторов/АБ [98, 99].

ЭДС  $E_a$  источника  $E_a$  (рисунок 4.3) зависит от температуры и степени заряженности (SOC) аккумулятора/АБ, которая в общем случае может быть выражена следующей зависимостью:

$$\text{SOC} = \frac{Q(t)}{Q_a}, \quad (4.22)$$

где  $Q(t)$  – текущее значение емкости в процессе заряда или разряда аккумулятора/батареи;  $Q_a$  – емкость полностью заряженного аккумулятора/АБ.

Текущее значение емкости  $Q(t)$  в (4.22) имеет следующую зависимость:

$$Q(t) = Q_a - \int_{t_0}^t I_a(t) dt. \quad (4.23)$$

Поляризационное напряжение  $U_{RC}$  в (4.19) (падение напряжения на эквивалентной цепи, включающей элементы  $R_\Sigma$  и  $C_\Sigma$ ) (рисунок 4.3) отражает химические процессы в элементе.

Эквивалентная поляризационная емкость  $C_\Sigma$  определяется динамическими параметрами аккумулятора.

Для степени заряженности (SOC) аккумулятора, изменяющейся при зарядке или разрядке АБ в незначительных пределах, при выполнении условия  $I_a = \text{const}$ , после некоторых преобразований, на основании [100] система уравнений (4.19) может быть представлена уравнением

$$\dot{U}_a(t) = (E_a - R_\Sigma I_a(t) - U_a(t)) \frac{1}{\tau}, \quad (4.24)$$

где  $\tau$  – постоянная времени цепи, определяемая как

$$\tau = R_\Sigma C_\Sigma. \quad (4.25)$$



В формулах (4.24) и (4.25)  $R_{\Sigma}$  – эквивалент внутреннего сопротивления аккумулятора ( $R_{\Sigma} = R_a + R_9$ ).

При значительных изменениях SOC во время циклов «заряд-разряд» параметры аккумуляторов (батарей) не остаются постоянными. Их промежуточные значения могут быть вычислены при помощи методов интерполяции.

Для выражений зависимостей  $E_a = f(\text{SOC})$ ,  $R_{\Sigma} = f(\text{SOC})$  и  $\tau = f(\text{SOC})$  (4.24) могут быть использованы кубические сплайн-интерполяции [101, 102]:

$$E_a(\text{SOC}) = a_E + b_E \text{SOC} + c_E \text{SOC}^2 + d_E \text{SOC}^3; \quad (4.26)$$

$$R_{\Sigma}(\text{SOC}) = a_R + b_R \text{SOC} + c_R \text{SOC}^2 + d_R \text{SOC}^3; \quad (4.27)$$

$$\tau(\text{SOC}) = a_{\tau} + b_{\tau} \text{SOC} + c_{\tau} \text{SOC}^2 + d_{\tau} \text{SOC}^3. \quad (4.28)$$

где  $a_E, b_E, c_E, d_E, a_R, b_R, c_R, d_R, a_{\tau}, b_{\tau}, c_{\tau}, d_{\tau}$  – коэффициенты сплайна, значения которых определяются типом аккумулятора/АБ.

Необходимо отметить, что зависимости  $E_a(\text{SOC})$ ,  $R_{\Sigma}(\text{SOC})$  и  $\tau(\text{SOC})$  являются функциями направления протекания тока  $I_a$ , характеризующего процессы зарядки или разрядки аккумулятора/АБ.

С учетом изложенного, после некоторых преобразований, система уравнений, описывающая состояние одного аккумулятора при разрядке и зарядке может быть представлена в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{SOC} = \frac{Q_a - \int_{t_0}^t I_a(t) dt}{Q_a}; \\ \dot{U}_a(t) = (E_a(\text{SOC}) - I_a(t)R_{\Sigma}(\text{SOC}) - U_a(t)) \frac{1}{\tau(\text{SOC})}; \\ E_a(\text{SOC}) = a_E + b_E \text{SOC} + c_E \text{SOC}^2 + d_E \text{SOC}^3; \\ R_{\Sigma}(\text{SOC}) = a_R + b_R \text{SOC}; \quad \tau(\text{SOC}) = a_{\tau} + b_{\tau} \text{SOC}. \end{array} \right. \quad (4.29)$$

Согласно (4.29), в конечном итоге для интерполяции ЭДС источника  $E_a(\text{SOC})$  применяется кубическая сплайн-интерполяция (4.26), а для интерполяции  $R_{\Sigma}(\text{SOC})$  и  $\tau(\text{SOC})$  – линейная функция. Отказ от применения кубического

сплайна для интерполяции  $R_{\Sigma}$  (SOC) (4.27) и  $\tau$  (SOC) (4.28) согласно [103] обусловлен большим разбросом значений между фиксированными точками, что приводит к снижению точности результатов аналитических исследований.

В выражении (4.24) представленной модели используются линейные зависимости для  $E_a = f(T)$  и  $\tau = f(T)$  и нелинейная – для  $R_{\Sigma} = f(T)$  ( $T$  – значение температуры).

Для литий-ионных АБ в [104] представлена следующая нелинейная зависимость  $R_{\Sigma}(T)$ :

$$R_{\Sigma}(T) = R_{\Sigma 0} \exp\left(K_R \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right), \quad (4.30)$$

$R_{\Sigma 0}$  – значение внутреннего сопротивления аккумулятора при нормальной температуре аккумулятора;  $K_R$  – коэффициент, определяемый на основе экспериментальных данных;  $T$ ,  $T_0$  – текущая и нормальная температура аккумулятора.

Коэффициент  $K_R$  может быть определен по формуле

$$K_R = \frac{\ln\left(\frac{R_{\Sigma}(T_{\min})}{R_{\Sigma}(T_0)}\right)}{\frac{1}{T_{\min}} - \frac{1}{T_0}}, \quad (4.31)$$

где  $T_{\min}$  – минимально допустимая температура АБ.

При аналитических исследованиях АБ, состоящих из групп отдельных аккумуляторов, математическая модель, представленная системой уравнений (4.29), используется индивидуально для каждого аккумулятора. Поскольку параметры модели аккумуляторов батареи при разрядке, зарядке, а также переходе с одного режима на другой имеют отличительные особенности, обусловленные в первую очередь гистерезисными характеристиками [105], модели формируются отдельно для каждого из исследуемых режимов, с учетом при необходимости глубины (уровня) его заряженности.

Предложенная математическая модель позволяет определять текущие значения токов в процессах разрядок и зарядок АБ с учетом изменения их температуры при функционировании электротехнических комплексов судовых КЭУ во

всех допустимых режимах. Универсальность модели заключается в возможности ее использования для различных типов аккумуляторов батарей.

#### 4.4 Модели силовых ПП для аналитических исследований судовых КЭУ

На ПП силового канала электротехнического комплекса предлагаемой судовой КЭУ (гл. 3, рисунки 3.3 и 3.6) возлагается несколько функций, к основным из которых относятся следующие:

- возможность плавно регулировать частоту вращения ГВ в необходимом диапазоне без перегрузок отдельных компонентов;
- стабилизация напряжения накопителя энергии (АБ) при его разряде;
- обеспечение надежной параллельной работы АБ и ДГ/ГД на ГВ;
- отбор избыточной мощности ДГ/ГД на заряд АБ, имеющей место при движении судна в частичных (долевых) режимах;
- ограничение зарядного тока АБ до допустимых значений.

К наиболее ответственным относятся режимы совместной работы источников энергии (ДГ/ГД и АБ) на ГВ и ДГ/ГД на ГВ и АБ.

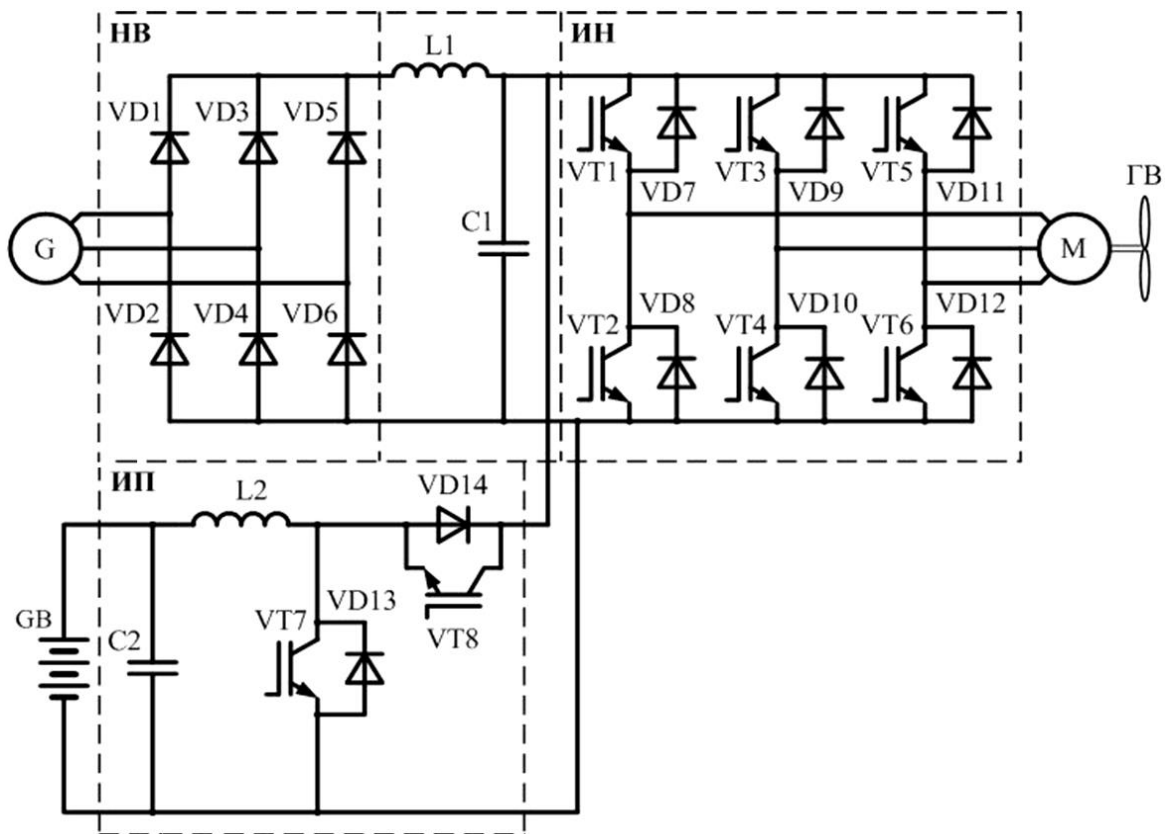
Для обеспечения необходимой плавности регулирования угловой скорости ЭД (частоты вращения ГВ) в необходимом диапазоне целесообразно использование в качестве ГЭД асинхронных ЭД, рассмотренных в п. 2.2 (гл. 2) и приложении П.2.1 и ПП частоты [51, 106].

Обособленная роль в судовых КЭУ (гл. 3, рисунки 3.3 и 3.6) отводится ПП, на которые в соответствии с разработанным способом (гл. 3, п. 3.3) возлагается ответственность за регулируемое по определенным закономерностям двунаправленное протекание потоков ЭЭ, необходимых для своевременного и качественного обеспечения необходимой энергией ГЭД или АБ.

Для схем силовых каналов электротехнических комплексов судовых КЭУ, представленных на рисунках 3.3 и 3.6 (гл. 3) принципиально возможно использование статических ПП на основе тиристорных, транзисторных и других элементных баз СМ.

При прочих равных условиях транзисторные преобразовательные устройства по сравнению с тиристорными преобразователями имеют более высокие значения КПД при широком диапазоне регулирования выходных координат (частоты и напряжения), а выходные и питающие сети при функционировании транзисторных преобразователей содержат относительно низкое количество гармоник, отличных от первой.

Исходя из изложенного на основании выполненного анализа научно-технических и инженерных решений разработана схема силовой электрической части для комбинированной параллельно-последовательной КЭУ (рисунок 3.3.1, гл. 3). На рисунке 4.4 приведена схема разработанного приемлемого варианта силовых каналов электротехнического комплекса КЭУ, соответствующая необходимым предъявляемым требованиям.



G – СГ; GB – АБ; HV – СМ неуправляемого выпрямителя (HV); L1, C1 – фильтр; IH – СМ инвертора (IH); M – трехфазный АД; ГВ – гребной винт; ИП – СМ импульсного преобразователя

Рисунок 4.4 – Предлагаемый вариант схемы силовых каналов электротехнического комплекса судовых КЭУ

Элементные базы СМ функционирование отдельных компонентов схемы (рисунок 4.4) достаточно известны. Предлагаемый вариант схемы, приведенный на рисунке 4.4 и условно подразделяемый на основной и вспомогательный силовые каналы, отличается от известных перечнем взаимодействующих компонентов, общей схемой электрических соединений этих компонентов и особенностями выполняемых ими функций в составе электротехнических комплексов судовых КЭУ.

Основной силовой канал (рисунок 4.4) представляет частный случай ГЭУ переменного тока, рассмотренных в п. 2.2 (гл. 2), а вспомогательный – ГЭУ двойного (постоянно-переменного) рода тока, частным случаем которых являются аккумуляторные ГЭУ.

В п. 2.2 (гл. 2) отмечено, что в настоящее время в судовых ГЭУ переменного тока регулирование скорости валов ГВ осуществляется изменением частоты входного напряжения ГЭД  $f_{ГЭД}$  с одновременным изменением фазного напряжения  $U_{ГЭД}$  посредством ПП частоты.

Силовая схема электротехнического комплекса судовых КЭУ (рисунок 4.4) содержит относительно небольшое количество компонентов, и как следствие отличается относительной простотой и повышенной надежностью.

В приложении 5 представлены передаточные функции компонентов предложенного варианта схемы силовых каналов КЭУ.

#### **4.4.1 Модели силовых ПП основного канала КЭУ**

На основании анализа комплекса технико-экономических и эксплуатационных показателей, включающих схемные решения, элементные базы, мощности, диапазоны регулирования выходных частот и напряжений, стоимость и надежность [107], для основного канала КЭУ, предложен инверторный преобразователь частоты, включающий неуправляемый выпрямитель НВ и инвертор ИН, силовые модули которых приведены на рисунке 4.4.

Основные зависимости математической модели НВ, предназначенной для аналитических исследований их функционирования, описаны в [51, 106] и приведены в гл. 2 (п. 2.3).

Функционирование НВ (рисунок 4.4) в основных режимах относится к частным случаям работы управляемых выпрямителей при угле управления силовых управляемых ППр  $\alpha$ , равном нулю. При этом среднее значение выпрямленного (выходного) напряжения  $U_{d0}$ , зависящее от напряжения питающей сети ( $U_{ГГ}$ ) и входной частоты ( $f_{ГГ}$ ), формируемых ГГ определяется из известного уравнения

$$U_{d0} = \frac{3}{\pi} \int_{-\pi/6}^{+\pi/6} U_{ГГл\max} \cos(2\pi f_{ГГ} t) d(2\pi f_{ГГ} t) = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{ГГ}, \quad (4.32)$$

где  $U_{ГГл\max}$ ,  $f_{ГГ}$  – амплитудное линейное напряжение и частота трехфазного ГГ.

Выражение внешней характеристики выпрямительного преобразователя в общем виде может быть представлено в следующем виде:

$$U_d \approx U_{d0} \cos \alpha - (\Delta U_{ПП} + (m_{ГГ} f_{ГГ} L_{ГГ} + R_{ГГ}) I_d); \quad \alpha = 0. \quad (4.33)$$

В (4.33)  $\Delta U_{ПП}$  – падение напряжения на силовых ППр;  $L_{ГГ}$ ,  $R_{ГГ}$  – эквивалентная индуктивность и активное сопротивление обмоток статора ГГ;  $I_d$  – среднее выпрямленное значение тока.

Ток  $I_d$  НВ, являющегося непосредственным для ИН источником питания, выражается зависимостью

$$I_d = \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} i_d(\omega_{ГГ} t) d(2\pi f_{ГГ} t) = \frac{2}{3} I_0 A^2, \quad (4.34)$$

где  $i_d$  – мгновенное значение выпрямленного тока;  $I_0$  – базисный ток ( $I_0 = U_d / r_n$ );  $A$  – коэффициент.

Коэффициент  $A$  в (4.34) определяется по формуле [51]

$$A = \sqrt{1 - \frac{3}{2k\pi} \frac{1-a^2}{1-a+a^2}}, \quad (4.35)$$

где  $k$  – параметр нагрузки ( $k = r_n / \omega L_n$ ;  $r_n$ ,  $L_n$  – активное сопротивление и индуктивность фазы комплексной нагрузки);  $a = \exp(-k\pi / 3)$ .

При математическом моделировании инвертора ИН (рисунок 4.4) принимается допущение, что силовые ПП являются «идеальными» ключами и время их переключения равно нулю [51].

Изображение напряжения фазы ИН  $U_{ИН}$  при активно-индуктивной нагрузке, являющейся упрощенным вариантом ГЭД, на основании преобразования Лапласа-Карсона представляется как:

$$U_{ИН}(p) = \frac{1}{1 - \exp(-pT)} \left( \int_0^{T/2} U_d \exp(-pT) dt - \int_{T/2}^T U_d \exp(-pT) dt \right) \quad (4.36)$$

$$= \frac{1}{p} U_d \frac{1 - \exp(-pT/2)}{1 + \exp(-pT/2)},$$

где  $p$  – комплексный параметр;  $T$  – период выходной частоты ИН.

При комплексной нагрузке изображение тока фазы ИН  $I_{ИН}$  имеет вид:

$$I_{ИН}(p) = \frac{1}{p} U_d \frac{1 - \exp(-pT/2)}{1 + \exp(-pT/2)} \frac{1}{Z_H(p)}, \quad (4.37)$$

где

$$Z_H(p) = r_H + pL_H. \quad (4.38)$$

Основной схемой соединения обмоток статора асинхронных ЭД М (рисунок 4.4) является «звезда». При этом действующее значение фазного напряжения  $U_\phi$  ИН выражается как

$$U_\phi = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_\phi^2(2\pi f_{вых} t) d(2\pi f_{вых} t)} = \sqrt{2} \frac{U_d}{3}, \quad (4.39)$$

где  $f_{вых}$  – частота выходного напряжения ИН ( $2\pi f_{вых} = \omega_{вых}$ ).

Исходя из принципа действия ИН оригиналы фазных токов  $i_\phi$  нагрузки ИН определяются на трех интервалах полупериода. В частности, для фазы А:

$$\begin{cases} i_{\phi A}(\omega_{вых} t) = \frac{U_d}{3r_H} \left( 1 - \frac{(1+a)(2-a)}{1+a^3} e^{-k_1 \omega_{вых} t} \right), & \text{при } 0 < \omega_{вых} t < \frac{\pi}{3}; \\ i_{\phi A}(\omega_{вых} t) = \frac{U_d}{3r_H} \left( 2 - \frac{(1+a)^2}{1+a^3} e^{-k_1 \omega_{вых} t} \right), & \text{при } \frac{\pi}{3} < \omega_{вых} t < \frac{2\pi}{3}; \\ i_{\phi A}(\omega_{вых} t) = \frac{U_d}{3r_H} \left( 1 + \frac{(1+a)(1-2a)}{1+a^3} e^{-k_1 \omega_{вых} t} \right), & \text{при } \frac{2\pi}{3} < \omega_{вых} t < \pi. \end{cases} \quad (4.40)$$

В (4.40)  $r_H$  – активное сопротивление нагрузки (фазы АД М (ГЭД) рисунок 4.4);  $k_1$  – параметр нагрузки ( $k_1 = r_H / \omega_{вых} L_H$  ( $L_H$  – индуктивность нагрузки (АД))).

Отличительной особенностью представленной математической модели ИН является ее использование для исследования режимов функционирования электротехнического комплекса предлагаемых вариантов КЭУ.

#### 4.4.2 Модель силового модуля импульсного ШП вспомогательного канала КЭУ

ИП преобразователи широко используются в ЭП для регулирования входных координат силового канала ЭД постоянного тока [108]. При этом к основным режимам работы ИП относится режим непрерывных токов.

В предложенной схеме (рисунок 4.4) ИП обеспечивает управляемую передачу преобразованной мощности ДГ для подзарядки АБ и управляемую передачу мощности АБ для вращения ГЭД. Применительно к предлагаемому варианту научно-технического решения силового канала КЭУ для подзарядки АБ, исходя из специфики функционирования, целесообразно использование ИП в режимах непрерывных и прерывистых токов.

При подзарядке АБ через ИП в режимах непрерывных токов изображения напряжения  $U_a$  имеют вид:

$$\begin{cases} U_a(p) = \frac{(U_d - E_a) - U_d \exp(-pt_0) + E_a \exp(-pt_u)}{p(1 - \exp(-pt_u))}, & \text{при } 0 < t < t_0; \\ U_a(p) = \frac{-E_a + U_d \exp(-p(t_u - t_0)) - (U_d - E_a) \exp(-pt_u)}{p(1 - \exp(-pt_u))}, & \text{при } t_0 < t < t_u \end{cases} \quad (4.41)$$

Мгновенные значения токов АБ  $i_a$  в процессе зарядки определяются по следующим аналитическим зависимостям:

$$\begin{cases} i_a(t) = \frac{U_d - E_a}{R_\Sigma} - \frac{U_d}{R_\Sigma} \left( \frac{1 - a_1 b_1}{1 - a_1} \right) e^{-\frac{t}{\tau}}, & \text{при } 0 < t < t_0; \\ i_a(t) = \frac{-E_a}{R_\Sigma} + \frac{U_d}{R_\Sigma} \left( \frac{1 - b_1^{-1}}{1 - a_1} \right) e^{-\frac{t}{\tau}}, & \text{при } t_0 < t < t_u \end{cases} \quad (4.42)$$



В (4.41) и (4.42)  $U_d$  – выходное напряжение ИП в режиме зарядки АБ;  $E_a$  – ЭДС АБ (4.26);  $0 \dots t_0$ ,  $t_0 \dots t_y$  – временные интервалы возрастания и снижения тока  $i_a$ , соответственно;  $R_\Sigma$  – эквивалент внутреннего сопротивления аккумулятора (4.30);  $a_1 = \exp(-t_y/\tau)$ ;  $b_1 = \exp(-t_0/\tau)$ ;  $\tau$  – постоянная времени цепи, определяемая по формуле (4.25).

При использовании для подзарядки АБ режимов прерывистых токов ИП, изображения напряжения  $U_a$  имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_a(p) = \frac{(U_d - E_a) - U_d \exp(-pt_0) + E_a \exp(-pt_1)}{p(1 - \exp(-pt_y))}, \quad \text{при } 0 < t < t_0; \\ U_a(p) = \frac{-E_a + E_a \exp(-p(t_1 - t_0)) + (U_d - E_a) \exp(-p(t_y - t_0)) - (U_d - E_a) \exp(-pt_y)}{p(1 - \exp(-pt_y))}, \quad \text{при } t_0 < t < t_y. \end{array} \right. \quad (4.43)$$

Значения токов АБ  $i_a$  при зарядке в режимах прерывистых токов ИП выражаются следующими аналитическими выражениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_a(t) = \frac{U_d - E_a}{R_\Sigma} - \frac{U_d(1 - a_1 b_1) - E_a(1 - a_1 c_1)}{R_\Sigma(1 - a_1)} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad \text{при } 0 < t < t_0; \\ i_a(t) = \frac{-E_a}{R_\Sigma} + \frac{U_d - (U_d - E_a)b_1^{-1} - E_a a_1 b_1^{-1} c_1}{R_\Sigma(1 - a_1)} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad \text{при } t_0 < t < t_y. \end{array} \right. \quad (4.44)$$

В выражениях (4.43) и (4.44)  $t_1$  – момент начала режима прерывистых токов;  $c_1 = \exp(-t_1/\tau)$ .

Представленные зависимости позволяют выполнять аналитические исследования ИП при их функционировании в составе КЭУ.

#### 4.5 Математическое моделирование асинхронных ГЭД трехфазного переменного тока

По результатам анализа работ в области исследований режимов работ АД [109, 110, 111 и др.], получающих питание от ПП, установлено, что для аналити-

ческих исследований асинхронных ГЭД трехфазного переменного тока, функционирующих в составе судовых КЭУ, к корректным следует отнести метод мгновенных значений на каждом интервале постоянства структуры.

При исследованиях к приемлемым формам относится запись уравнений трехфазных АД в ортогональной системе координат  $(\alpha, \beta, 0)$ , неподвижной относительно статора [112]. Преобразованные уравнения напряжений обмоток статора и роторных цепей АД, соответственно, в этом случае имеют вид [83]:

$$\begin{cases} u_{s\alpha} = i_{s\alpha} R_s + \frac{d(L_{s\alpha} i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha})}{dt}; \\ u_{s\beta} = i_{s\beta} R_s + \frac{d(L_{s\beta} i_{s\beta} + L_m i_{r\beta})}{dt}; \\ 0 = i_{r\alpha} R_r + \frac{d(L_{r\alpha} i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha})}{dt} + \omega_r (L_{r\beta} i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}); \\ 0 = i_{r\beta} R_r + \frac{d(L_{r\beta} i_{r\beta} + L_m i_{s\beta})}{dt} - \omega_r (L_{r\alpha} i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}). \end{cases} \quad (4.45)$$

В (4.45)  $u_{s\alpha}, u_{s\beta}, i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}$  – мгновенные значения напряжений статора и токов статора и ротора;  $R_s, R_r$  – активные сопротивления фаз обмоток статора и ротора АД;  $L_{s\alpha}, L_{s\beta}, L_{r\alpha}, L_{r\beta}$  – эквивалентные индуктивности обмоток фаз статора и ротора в системе координат  $\alpha, \beta, 0$ , соответственно;  $L_m$  – взаимная индуктивность;  $\omega_r$  – угловая скорость ротора (вала) АД.

Уравнения системы (4.45) включают трансформаторные ЭДС  $e_{mp}$ :

$$\begin{cases} e_{mps\alpha} = L_m \frac{di_{r\alpha}}{dt}; \quad e_{mps\beta} = L_m \frac{di_{r\beta}}{dt}; \\ e_{mpr\alpha} = L_m \frac{di_{s\alpha}}{dt}; \quad e_{mpr\beta} = L_m \frac{di_{s\beta}}{dt}. \end{cases} \quad (4.46)$$

Кроме того, в уравнениях электрического равновесия обмоток ротора в (4.45) присутствуют члены, представляющие ЭДС вращения  $e_{sp}$  по  $\alpha, \beta$  осям:

$$\begin{cases} e_{spr\alpha} = \omega_r (L_{r\beta} i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}); \\ e_{spr\beta} = -\omega_r (L_{r\alpha} i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}). \end{cases} \quad (4.47)$$

Наряду с минимальным числом необходимых дифференциальных уравнений, к основным преимуществам системы координат  $\alpha, \beta, 0$  относится равенство физически реального тока фазы АД преобразованному при ориентации в пространстве одной из ортогональных осей фазных обмоток, например оси  $\alpha$  фазе  $A$ .

При этом соотношения между переменными в фазных координатах и в системе координат  $\alpha, \beta, 0$  согласно [113] выражаются как

$$i_A = i_{s\alpha}, \quad i_B = -\frac{i_{s\alpha}}{2} + \frac{\sqrt{3}i_{s\beta}}{2}, \quad i_C = -\frac{i_{s\alpha}}{2} - \frac{\sqrt{3}i_{s\beta}}{2}, \quad (4.48)$$

где  $i_A, i_B, i_C$  – реальные токи в фазах  $A, B$  и  $C$  асинхронного ЭД.

Использование уравнений из (4.45) при математическом моделировании АД приводит к необходимости пересчета переменных на каждом шаге счета со значений в трехфазной системе координат в эквивалентные значения по  $\alpha, \beta$  осям, а после расчетов производить обратные преобразования. Исходя из изложенного целесообразно дифференциальные уравнения выражать через реальные фазные величины [114]. При этом уравнения системы (4.45) в  $\alpha, \beta$  осях, преобразованные с учетом (4.48) в уравнения фаз  $A$  и  $B$  трехфазной системы координат имеют вид:

$$\begin{cases} u_A = i_A R_s + \frac{d\psi_A}{dt}; & u_B = i_B R_s + \frac{d\psi_B}{dt}; \\ 0 = i_a R_r + \frac{d\psi_a}{dt} + \frac{\omega_r}{\sqrt{3}}(\psi_a + 2\psi_\epsilon); & 0 = i_\epsilon R_r + \frac{d\psi_\epsilon}{dt} - \frac{\omega_r}{\sqrt{3}}(\psi_\epsilon + 2\psi_a). \end{cases} \quad (4.49)$$

В (4.49)  $\psi_A, \psi_B, \psi_a, \psi_\epsilon$  – потокосцепления фаз  $A$  и  $B$  статора и ротора.

Значения переменных фазы  $C$  в трехфазной системе определяются как

$$\begin{cases} i_C = -(i_A + i_B); & i_c = -(i_a + i_\epsilon); \\ \psi_C = -(\psi_A + \psi_B); & \psi_c = -(\psi_a + \psi_\epsilon). \end{cases} \quad (4.50)$$

С учетом принимаемых при преобразованиях допущений [83], почленным сложением уравнений фаз статоров ЭД системы (4.49), выводится уравнение напряжения фазы  $C$  статора:

$$u_C = i_C R_s + \frac{d\psi_C}{dt}. \quad (4.51)$$

Выражения электрических равновесий фаз  $A$  и  $B$  ротора АД в (4.49) с учетом потокосцепления фазы  $C$   $\psi_c$  ротора (4.50) представляются следующими формулами из (4.52):

$$\begin{cases} 0 = i_a R_r + \frac{d\psi_a}{dt} - \frac{\omega_r}{\sqrt{3}}(\psi_a + 2\psi_c); \\ 0 = i_b R_r + \frac{d\psi_b}{dt} - \frac{\omega_r}{\sqrt{3}}(\psi_b + 2\psi_c). \end{cases} \quad (4.52)$$

Уравнение электрического равновесия фазы  $C$  ротора выводится в результате почленного сложения выражений (4.52). В этом случае

$$0 = i_c R_r + \frac{d\psi_c}{dt} - \frac{\omega_r}{\sqrt{3}}(\psi_c + 2\psi_a). \quad (4.53)$$

В результате, система дифференциальных уравнений АД в трехфазной системе координат, в общем виде, с неизвестными фазными токами представляется следующим образом:

$$\begin{cases} u_{sn} = i_{sn} R_{sn} + L_{s\sigma n} \frac{di_{sn}}{dt} + L_{mn} \frac{di_{rn}}{dt}; \\ 0 = i_{rn} R_{rn} + L_{r\sigma n} \frac{di_{rn}}{dt} + L_{mn} \frac{di_{sn}}{dt} - e_{sprn}. \end{cases} \quad (4.54)$$

В (4.54)  $n$  – индекс, соответствующий фазам  $A$ ,  $B$  или  $C$ ;  $e_{sprn}$  – фазные ЭДС вращения ротора АД.

Для приведения выражений (4.54) к уравнениям статорной цепи, из уравнения электрического равновесия роторной цепи выделяется производная фазного тока ротора  $i_r$

$$\frac{di_{rn}}{dt} = -\frac{1}{L_{r\sigma n}} \left( i_{rn} R_{rn} + L_{mn} \frac{di_{sn}}{dt} - e_{sprn} \right), \quad (4.55)$$

и полученное выражение подставляется в первое уравнение системы (4.54). В этом случае, после некоторых преобразований, приведенная к статорной цепи система уравнений (4.54) имеет следующий вид:

$$u_{sn} = i_{sn} R_{sn} + \left( L_{s\sigma n} - \frac{L_{mn}^2}{L_{r\sigma n}} \right) \frac{di_{sn}}{dt} - \frac{L_{mn}}{L_{r\sigma n}} (i_{rn} R_{rn} - e_{sprn}). \quad (4.56)$$

В (4.56) выделяются фазные ЭДС статора  $e_{sn}$  АД

$$\frac{L_{mn}}{L_{r\sigma n}}(i_{rn}R_{rn} - e_{eprn}) = e_{sn}. \quad (4.57)$$

Фазные ЭДС вращения  $e_{eprn}$  после преобразований выражаются уравнением

$$e_{eprn} = \frac{\omega_r L_{r\sigma n}}{\sqrt{3}} \left( \frac{L_{mn}}{L_{r\sigma n}}(i_{sn} + 2i_{s(n-1)}) + i_{rn} + 2i_{r(n-1)} \right). \quad (4.58)$$

Совместное решение уравнений (4.56)...(4.58) позволяет определять переменные основных количественных характеристик предлагаемых в качестве ГЭД асинхронных ЭД, необходимые для теоретического анализа их режимов работы в исследуемых системах КЭУ.

Уравнение, устанавливающее связь электромагнитного момента  $M_{эм}$  трехфазных АД с токами статора, с учетом выражений зависимостей между токами в трехфазной системе координат и в системе координат  $\alpha, \beta, 0$  (4.48), может быть представлено как

$$M_{эм} = \sqrt{3}L_{mn}(i_{s(n-1)}i_{rn} - i_{sn}i_{r(n-1)}). \quad (4.59)$$

При принятии допущения  $M_{эм} \approx M$  ( $M$  – вращающий момент АД), уравнение движения ЭП выражается зависимостью

$$pM - M_c = \left( m\rho^2 + \frac{1}{\omega_r^2} \sum_{k=1}^n J_k \omega_k^2 \right) \frac{d\omega_r}{dt}, \quad (4.60)$$

где  $p$  – число пар полюсов обмотки статора АД;  $m$  – масса вращающихся частей ЭД;  $\rho$  – радиус инерции;  $k$  и  $n$  – порядковый номер и общее число вращающихся частей ЭП, за исключением ЭД;  $J_k$  – момент инерции  $k$ -й вращающейся части ЭП;  $t$  – текущее время переходного режима.

Предложенная математическая модель обладает относительной простотой и универсальностью, обусловленной возможностью ее применения для анализа функционирования АД, используемых в качестве ГЭД судовых электротехнических комплексов КЭУ, получающих ЭЭ от различных типов преобразователей (ИН, непосредственных ПП частоты и др.).

## 4.6 Выводы

1. Определено на основании разработанной эквивалентной структурной схемы ПУ судов с ГЭУ и основных требований необходимое и достаточное количество компонентов (составных частей) схемы силового канала электротехнического комплекса судовых КЭУ, к которым следует отнести электромеханические преобразователи, включающие необратимые и обратимые ЭМ, статические источники ЭЭ и ПП.

2. Обоснована необходимость исследований режимов функционирования компонентов КЭУ, имеющих характерные эксплуатационные особенности при технической реализации разработанного способа управления.

Для оценки функционирования КЭУ актуальными являются исследования режимов работы компонентов методами теории подобия и моделирования.

3. Выполнен обзор и анализ вариантов моделей, позволяющий сделать вывод о том, что для судовых КЭУ при их комплексной оценке их функционирования целесообразно использование математического моделирования, при котором исследуются свойства объекта, соответствующие поставленным задачам.

Построение математических моделей и формализация связей между компонентами или их элементами позволяет выявлять пробелы в функциональных характеристиках объектов исследований и способствует решению поставленных задач.

4. Определена целесообразность условно представлять судовые КЭУ применительно к постановке вопроса, как системы, включающие совокупности компонентов, режимами работы которых являются состояния, определяющиеся множеством различных переходных и установившихся процессов и зависящие от собственных параметров системы и параметров возмущающих воздействий.

5. Предложена математическая модель ПД для отдельной работы или в составе ДГ агрегата, в которой кроме управляющих воздействий учитывается девиация угловой скорости вала и коэффициенты технического состояния, расширяющая возможности для аналитических исследований ПД, функционирующих в составе судовых ПУ с КЭУ и позволяющая корректно решать задачи управления.

6. Приведены аналитические зависимости для широко используемых в судовой энергетике явнополусных СГ, учитывающие насыщение магнитных систем и позволяющие повысить точность расчетов переходных и установившихся режимов функционирования генераторов в составе ДГ судовых КЭУ за счет учета изменения потока рассеяния обмоток возбуждения генераторов при изменении нагрузок в допустимом диапазоне.

7. Представлена математическая модель АБ, позволяющая определять текущие значения токов в процессах разрядок и зарядок АБ с учетом изменения их температуры при функционировании в составе электротехнических комплексов судовых КЭУ во всех допустимых режимах. Универсальность модели заключается в возможности ее использования для различных типов аккумуляторов батарей.

8. Предложен вариант схемы электротехнического комплекса КЭУ, условно содержащий основной и вспомогательный силовые каналы, отличающийся от известных перечнем взаимодействующих компонентов, общей схемой электрических соединений этих компонентов и особенностями выполняемых ими функций.

9. Представлены математические модели ИП силовых каналов, отличительной особенностью которых является их использование для аналитических исследований режимов функционирования электротехнических комплексов предлагаемых вариантов КЭУ.

Определено, что применительно к предлагаемому варианту научно-технического решения силового канала КЭУ для подзарядки АБ, исходя из специфики функционирования, целесообразно использование ИП в режимах непрерывных и прерывистых токов.

10. Предложена математическая модель трехфазных асинхронных ЭД, отличающаяся относительной простотой и универсальностью, обусловленной возможностью ее применения для анализа функционирования АД, используемых в качестве ГЭД судовых электротехнических комплексов КЭУ, получающих ЭЭ от различных типов преобразовательных устройств.

## **5 АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИЛОВОГО КАНАЛА СУДОВЫХ КЭУ**

### **5.1 Аналитические исследования режимов работы основного силового канала КЭУ**

К основным этапам решения поставленных задач математического моделирования режимов работы КЭУ при помощи средств вычислительной техники относятся: постановка задачи; составление математического описания; выбор численного метода решения; получение и обработка результатов, проверка корректности вычислений и оценка их точности.

Постановка задачи сформулирована в (п. 4.1), после чего составлено математическое описание компонентов для исследований функционирования судовых КЭУ (п. 4.2...4.5).

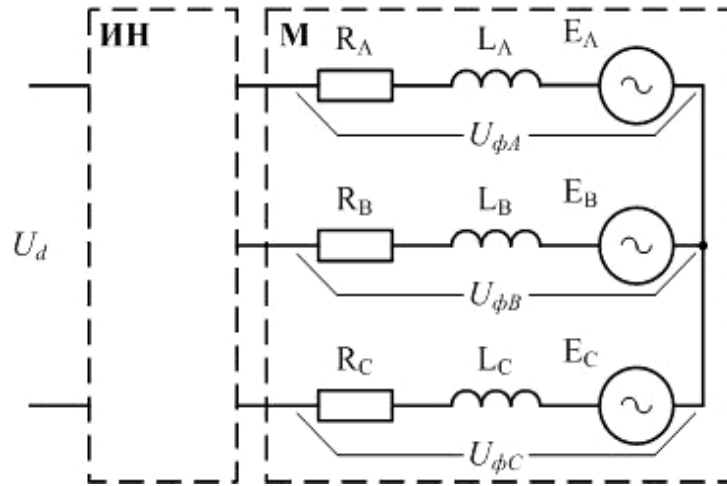
При выборе численного метода решений возможны два основных подхода – ориентирование решений задач методами прикладной математики на язык программирования [115] или использование разработанных программных продуктов [116 и др.].

В случаях применения разработанных программных продуктов обеспечивается достаточно высокая универсальность, главным образом за счет варьирования алгоритмизацией, отсутствия необходимости разработки для решения каждой конкретной задачи отдельного программного обеспечения, а также уменьшения времени, затрачиваемого на отладки.

Исходное описание математической модели трехфазных асинхронных ГЭД в форме, пригодной для аналитических исследований КЭУ при помощи средств вычислительной техники, составляется по уравнениям и допущениям, приведенным в (п. 4.5). Исходя из этого, математическое описание ГЭД судовых КЭУ приводится к удобному для расчетов виду.

На основании предлагаемых решений силовых каналов КЭУ (п. 4.4) составляется схема замещения трехфазного асинхронного ГЭД – рисунок 5.1.





ИН – инвертор; М – трехфазный асинхронный ГЭД (рисунок 4.4, гл. 4)

Рисунок 5.1 – Эквивалентная схема замещения трехфазного асинхронного ГЭД системы КЭУ

Каждая фаза схемы замещения ГЭД состоит из последовательно соединенных аналогов активной составляющей сопротивления  $R_n$ , индуктивности  $L_n$  и фазной ЭДС двигателя  $E_n$ .

При принятии допущения о синусоидальной форме напряжений  $U_{\phi n}$ , подводимых к обмоткам статора ГЭД, закон их изменений выражается зависимостью

$$U_{\phi n} = U_{\max n} \sin(\omega t + \theta_n). \quad (5.1)$$

В формуле (5.1)  $U_{\max n}$  – амплитудные значения фазных напряжений;  $\theta_n$  – начальные фазы.

В уравнение (4.56) (гл. 4, п. 4.5) входит фазный ток ротора  $i_m$ , который может быть выражен через токи  $i_{sn}$  и  $i_{mn}$  как

$$i_m = i_{mn} - i_{sn}. \quad (5.2)$$

Индуктивности обмоток  $L_{s\sigma n}$ ,  $L_{r\sigma n}$  и  $L_{mn}$  связаны зависимостями [83]:

$$\left. \begin{aligned} L_{s\sigma n} + L_{mn} &= L_{sn}; \\ L_{r\sigma n} + L_{mn} &= L_{rn}. \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

Насыщение магнитных систем асинхронных ГЭД может учитываться по аналитическим выражениям [117] или по кривым намагничивания [118].

Значения  $R_n$  аналогов активных составляющих сопротивлений фаз  $R_n$  (рисунок 5.1) могут быть представлены формулой (5.4):

$$R_n = R_{sn} + R_{rn} \frac{L_{mn}}{L_{r\sigma n} + L_{mn}}. \quad (5.4)$$

Значения  $L_n$  аналогов индуктивностей фаз  $L_n$  (рисунок 5.1) выражаются как

$$L_n = L_{s\sigma n} + L_{r\sigma n} \frac{L_{mn}}{L_{r\sigma n} + L_{mn}}. \quad (5.5)$$

Законы изменения значений  $E_{\phi n}$  аналогов фазных ЭДС  $E_n$  могут быть представлен в следующем виде

$$E_{\phi n} = \frac{L_{mn}}{L_{r\sigma n} + L_{mn}} (e_{\text{спрн}} - R_{rn} i_{mn}). \quad (5.6)$$

Таким образом, преобразованное уравнение (4.56) (гл. 4, п. 4.5) электрического равновесия фазы статора асинхронного ГЭД имеет вид:

$$u_{sn} = \left( R_{sn} + R_{rn} \frac{L_{mn}}{L_{r\sigma n} + L_{mn}} \right) i_{sn} + \left( L_{s\sigma n} + L_{r\sigma n} \frac{L_{mn}}{L_{r\sigma n} + L_{mn}} \right) \frac{di_{sn}}{dt} + \frac{L_{mn}}{L_{r\sigma n} + L_{mn}} (e_{\text{спрн}} - R_{rn} i_{mn}). \quad (5.7)$$

С целью определения фазных ЭДС в (5.7), преобразовывается выражение (4.58) (гл. 4) как

$$e_{\text{спрн}} = \frac{\omega_r p}{\sqrt{3}} \left( (L_{r\sigma n} + L_{mn}) (i_{mn} + 2i_{m(n-1)}) - L_{r\sigma n} (i_{sn} + 2i_{s(n-1)}) \right). \quad (5.8)$$

Для определения тока  $i_{mn}$ , из первого уравнения системы (4.54), учитывая (5.2) и (5.3), выражается производная фазного тока статора

$$\frac{di_{sn}}{dt} = \frac{1}{L_{s\sigma n}} \left( u_{sn} - R_{sn} i_{sn} - L_{mn} \frac{di_{mn}}{dt} \right), \quad (5.9)$$

которая подставляется во второе преобразованное уравнение системы дифференциальных уравнений АД (4.54).

В этом случае

$$\frac{di_{mn}}{dt} = \frac{1}{L_{r\sigma n} + L_{mn} + \frac{L_{r\sigma n}}{L_{s\sigma n}} L_{mn}} \left( \frac{L_{r\sigma n}}{L_{s\sigma n}} u_{sn} + \left( R_{rn} - R_{sn} \frac{L_{r\sigma n}}{L_{s\sigma n}} \right) i_{sn} + e_{\text{спрн}} - R_{rn} i_{mn} \right) \quad (5.10)$$

Выражение для определения фазных токов  $i_m$ , входящих в уравнения (5.2), (5.6)...(5.10), представляется как

$$i_{mn} = \int \left( \frac{L_{s\sigma n}}{L_{s\sigma n}L_{r\sigma n} + L_{s\sigma n}L_{mn} + L_{mn}L_{r\sigma n}} \left( \left( R_{rn} - R_{sn} \frac{L_{r\sigma n}}{L_{s\sigma n}} \right) i_{sn} - R_{rn}i_{mn} + \frac{p}{\sqrt{3}} e_{epn} \right) + \frac{L_{r\sigma n}}{L_{s\sigma n}L_{r\sigma n} + L_{mn}L_{r\sigma n} + L_{mn}L_{s\sigma n}} u_n \right) dt. \quad (5.11)$$

Использование при аналитических исследованиях режимов работы судовых КЭУ в качестве независимой переменной угловой скорости ротора  $\omega_r$  ГЭД позволяет отвлечься от момента сопротивления  $M_c$ . В этих случаях решение интегро-дифференциальных уравнений осуществляется при  $\omega_r = \text{const}$ .

При изменяющемся моменте сопротивления  $M_c$  на валу ГЭД ( $M_c = \text{var}$ ), создаваемом ГВ, вводятся звенья, описывающие уравнения (4.59) и (4.60).

В этом случае

$$\omega_r = \int \left( \left( \sqrt{3}pL_{mn} (i_{s(n-1)}i_{rn} - i_{sn}i_{r(n-1)}) - M_c \right) \frac{p}{J_\Sigma} \right) dt. \quad (5.12)$$

На основании преобразованных представленных аналитических зависимостей в среде «MATLAB R2021a» с использованием пакета расширения «Simulink» разработана адаптированная имитационная модель основного силового канала (рисунок 5.2), реализующая предлагаемый вариант схемных решений силовых каналов электротехнического комплекса судовых КЭУ, приведенный на рисунке 4.4 (гл. 4, п. 4.4).

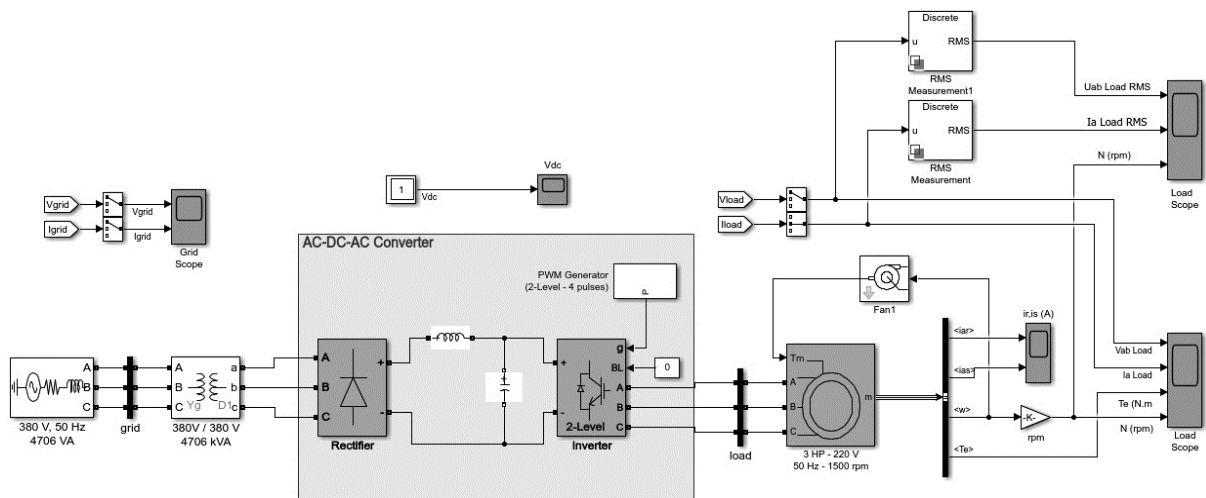


Рисунок 5.2 – Имитационная модель основного силового канала электротехнического комплекса КЭУ

В представленной имитационной модели КЭУ (рисунок 5.2), созданной впервые для аналитических исследований режимов, обусловленных технической реализацией предложенных мероприятий, СГ моделируется блоком «Three-phase voltage source in series with RL branch», позволяющим задавать напряжение, частоту тока, начальную фазу, соотношение индуктивного и активного сопротивлений. Двухзвенный ПП частоты представлен блоком «AC–DC–AC Converter», имитирующим трехфазный мостовой диодный выпрямитель и трехфазный мостовой IGBT-инвертор, управление которым производится посредством блока «PWM Generator» с частотой 2 кГц. Модель включает L–C фильтр, реализованный блоком «Filter». В качестве нагрузки (ГЭД) используются модель АД типа «АО2-41-4» с вентиляторным моментом сопротивления  $M_c$ , представленным блоком «Fan».

В таблице 5.1 приведены необходимые для аналитических исследований данные трехфазного асинхронного ЭД типа «АО2-41-4» [119].

Таблица 5.1 – Справочные данные асинхронного ЭД типа «АО2-41-4»

$P_n$ , кВт	$U_n$ , В	$I_{sn}$ , А	$n_n$ , об/мин	$\cos \varphi_n$ , о.е.	$R_s$ , Ом	$X_{s\sigma}$ , Ом	$R_m$ , Ом	$X_m$ , Ом	$R_r'$ , Ом	$X'_{r\sigma}$ , Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4,00	220	8,30	1450	0,85	0,99	1,99	3,05	68,66	0,90	3,29

Для обеспечения программной совместимости приборов с персональным компьютером использовалась команда «Tmtool», а для аппаратной – подключение осциллографа типа DS-1150 к компьютеру через порт шины USB.

Результаты аналитических исследований КЭУ по представленной имитационной модели и их сравнительный анализ приведены в п. 5.3.

## 5.2 Экспериментальные исследования режимов работы

### основного силового канала КЭУ

С целью проверки адекватности имитационного моделирования судовых КЭУ реальным объектам выполнено физическое моделирование объекта.

Исходя из постановки задачи разработана и создана физическая модель для экспериментальных исследований режимов работы основного силового канала КЭУ, включающая инверторный преобразователь частоты U1 типа SDI-G4.0-4B (приложение 6) и асинхронный ЭД М1 типа «АО2-41-4» – рисунок 5.3.

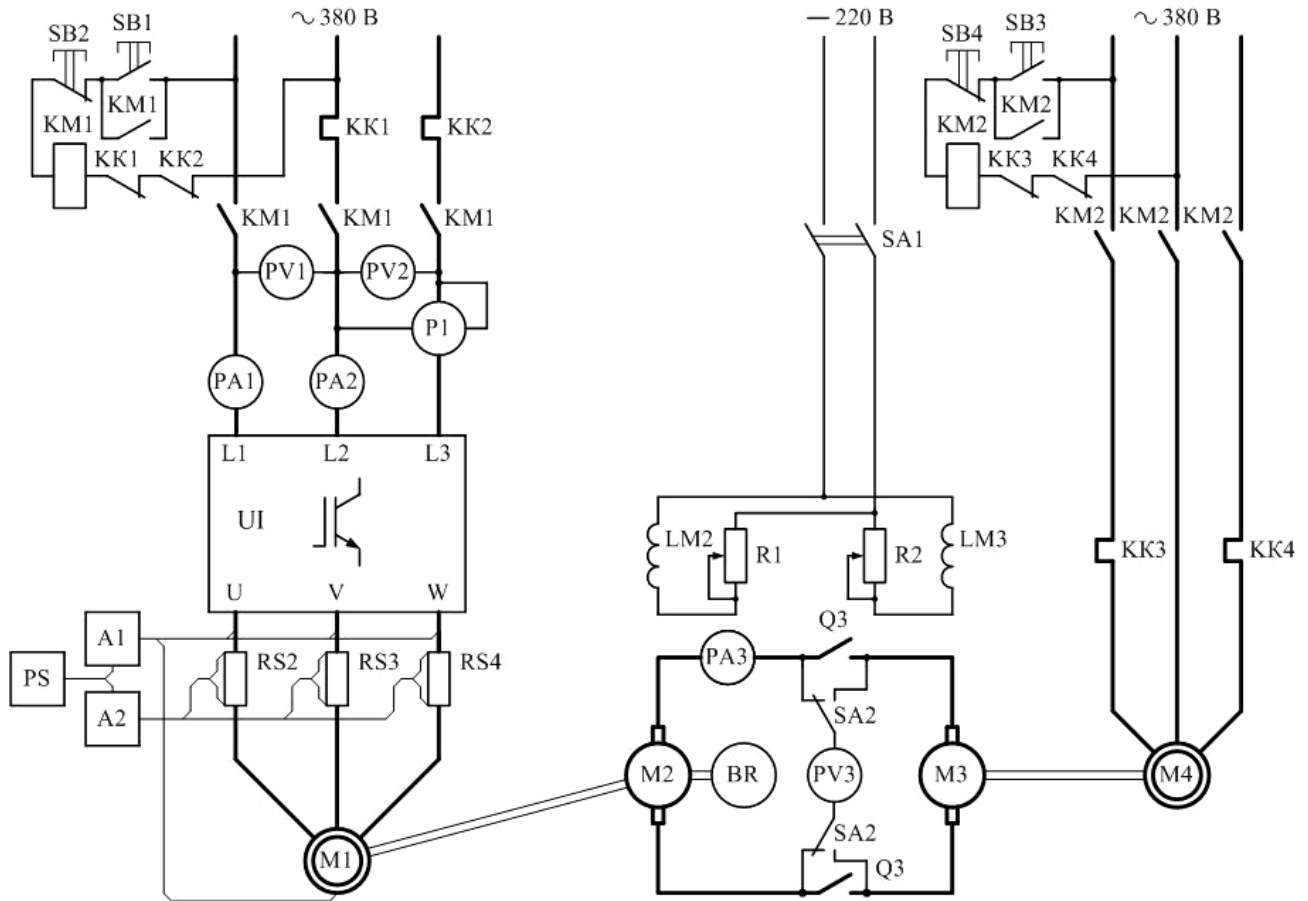


Рисунок 5.3 – Схема экспериментальной установки для физического моделирования основного силового канала КЭУ

Кроме того, в состав установки (рисунок 5.3) входит нагрузочное устройство, состоящее из двух однотипных машин постоянного тока М2 и М3 независимого возбуждения и трехфазного АД М4, которое позволяет плавно и в широких пределах изменять момент сопротивления  $M_c$  на валу исследуемого ЭД М1 и рассчитывать по показаниям приборов PV3 и PA3 в цепи машин М2 и М3, определяющим мощность нагрузочной машины  $P_{M2}$ , мощность на валу АД М1  $P_2$ . Установка включает в себя также добавочные устройства А1 и А2 и осциллограф PS.

Для расчетов мощности  $P_2$  на валу асинхронного ЭД М1 установки при проведении экспериментальных исследований по показаниям измерительных

приборов PV3 и PA3 (рисунок 5.3) выполнена тарировка двухмашинного агрегата М1–М2 с целью определения зависимости

$$P_2 = f(P_{M2}), \quad (5.13)$$

которая рассчитывается по построенным рабочим характеристикам исследуемого АД М1 типа «АО2-41-4» (рисунок 5.4) и экспериментальным данным при номинальном фазном напряжении сети  $U_n$ .

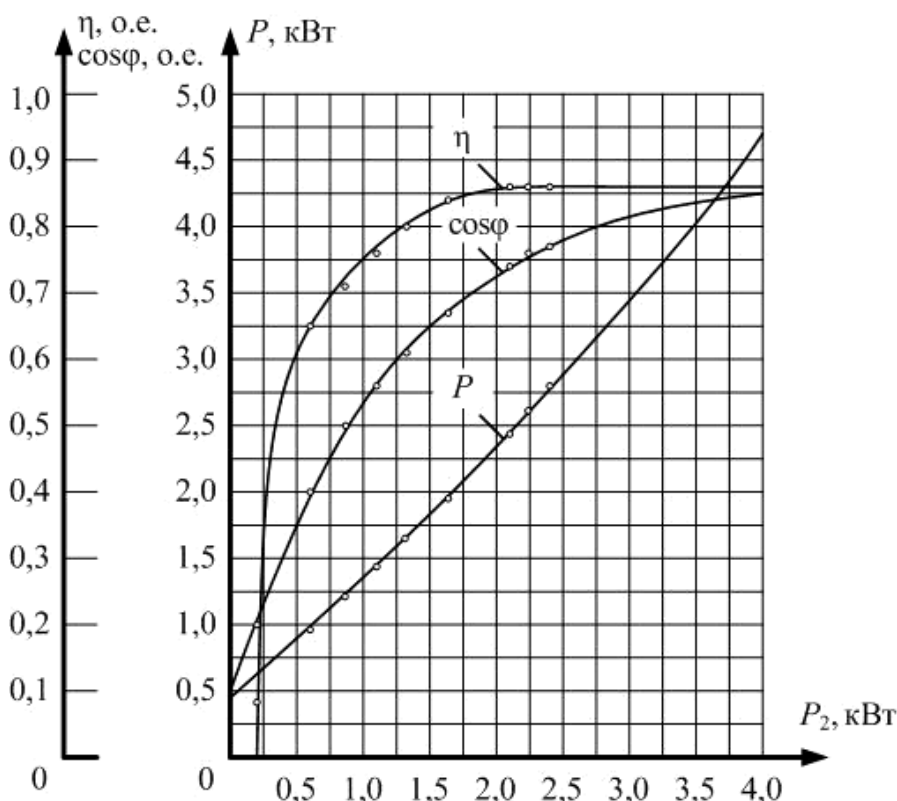


Рисунок 5.4 – Рабочие характеристики трехфазного АД типа «АО2-41-4»

Для расчета мощности  $P$ , потребляемой из сети асинхронным ЭД М1 использована по формула

$$P = m_s U_{sh} I_{PA1} \cos\phi, \quad (5.14)$$

где  $U_{sh} = 220$  В;  $I_{PA1}$  – ток по показаниям амперметра PA1 (рисунок 5.4).

Коэффициент  $\cos\phi$  АД в (5.14) измерялся переносным фазометром.

Мощность  $P_{M2}$ , отдаваемая нагрузочной машиной М2 двухмашинного агрегата М3–М4, рассчитывается по формуле

$$P_{M2} = U_{PV3} I_{PA3}, \quad (5.15)$$

где  $U_{PV3}$  и  $I_{PA3}$  – напряжение и ток по показаниям приборов PV3 и PA3.

Мощность  $P_2$ , соответствующая мощности  $P_{M2}$ , определяется по построенной рабочей характеристике  $P = f(P_2)$  – рисунок 5.4.

В результате выполненной тарировки агрегата М1–М2 получена зависимость (5.13), приведенная на рисунке 5.2.

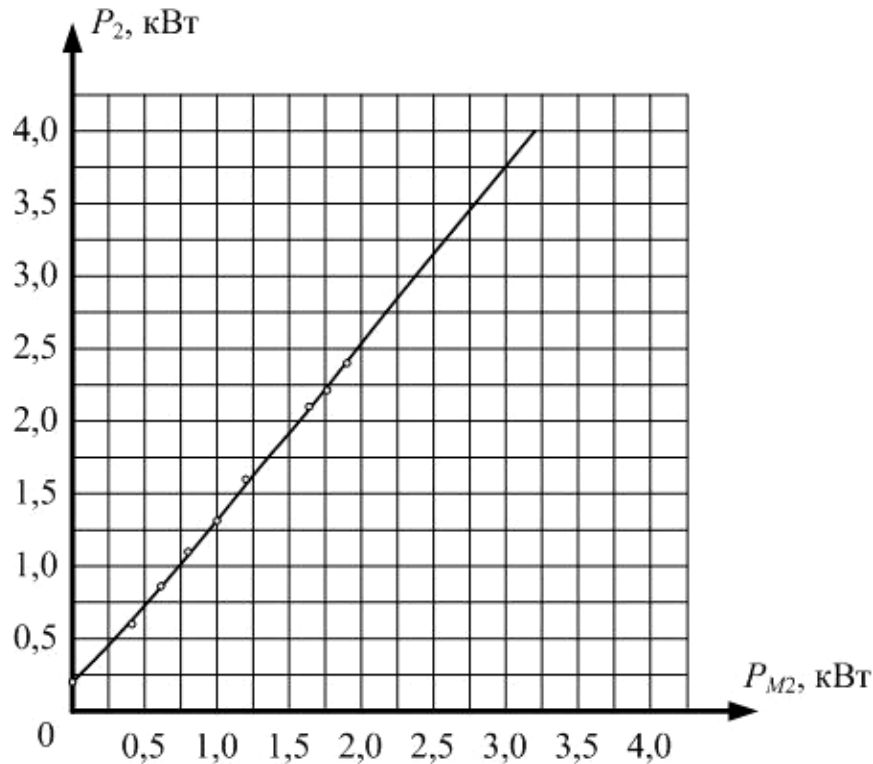


Рисунок 5.5 – График зависимости  $P_2 = f(P_{M2})$

Необходимым и достаточным условием соответствия  $P_2 = f(P_{M2})$  проводимым экспериментам является работа нагрузочной машины М2 с неизменным возбуждением при постоянном напряжении 220 В во всем диапазоне изменений нагрузок на исследуемый ЭД М1, осуществляемых изменением тока возбуждения машины М3. Так как угловая скорость агрегата М1 и М2 благодаря жесткости механической характеристики исследуемого АД М1 изменяется незначительно, зависимость  $P_2 = f(P_{M2})$  (рисунок 5.5) позволяет определять мощность  $P_2$  на валу АД М1 по показаниям приборов РВ3 и РА3 – рисунок 5.3.

Экономичность представленной экспериментальной установки обусловлена рекуперацией затрачиваемой на проведение экспериментов ЭЭ, за вычетом потерь в электромеханических преобразователях, в питающую сеть.

Данные экспериментов и результатов расчетов приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Данные экспериментов и результаты расчета зависимости  $P_2 = f(P_{M2})$  двухмашинного агрегата М1–М2

№ п/п	$I_{PA2}$ , А	$\cos \varphi$ , о.е.	$\eta$ , о.е.	$P$ , кВт	$U_{PV3}$ , В	$I_{PA3}$ , А	$P_{M2}$ , кВт	$P_2$ , кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	3,2	0,20	0,00	0,42	220,0	–	–	0,20
2	3,5	0,40	0,65	0,92	215,0	1,9	0,41	0,60
3	3,7	0,50	0,71	1,22	211,0	2,9	0,61	0,87
4	3,9	0,56	0,76	1,44	210,0	3,8	0,80	1,10
5	4,1	0,61	0,80	1,65	205,0	4,9	1,01	1,32
6	4,4	0,67	0,84	1,95	200,0	6,2	1,24	1,64
7	5,0	0,74	0,86	2,44	191,0	8,6	1,64	2,10
8	5,2	0,76	0,86	2,61	188,0	9,4	1,77	2,24
9	5,5	0,77	0,86	2,80	185,0	10,2	1,89	2,40

На физической модели исследованы режимы работы КЭУ, аналогичные режимам работы, исследованным аналитически при помощи разработанной имитационной модели (п. 5.1).

Результаты основных экспериментальных исследований КЭУ, выполненных на представленной физической модели (экспериментальной установке) и их сравнительный анализ приведены в п. 5.3.

### 5.3 Результаты исследований режимов работы КЭУ и их сравнительный анализ

На рисунках 5.6 и 5.7 представлены примеры параметров имитационной модели при которых производились аналитические исследования: двухзвенного частотного преобразователя (блока «AC–DC–AC Converter»), включающего выпрямитель (блок «Rectifier») и инвертор (блок «Inverter»); генератора импульсов (блока «PWM Generator»).



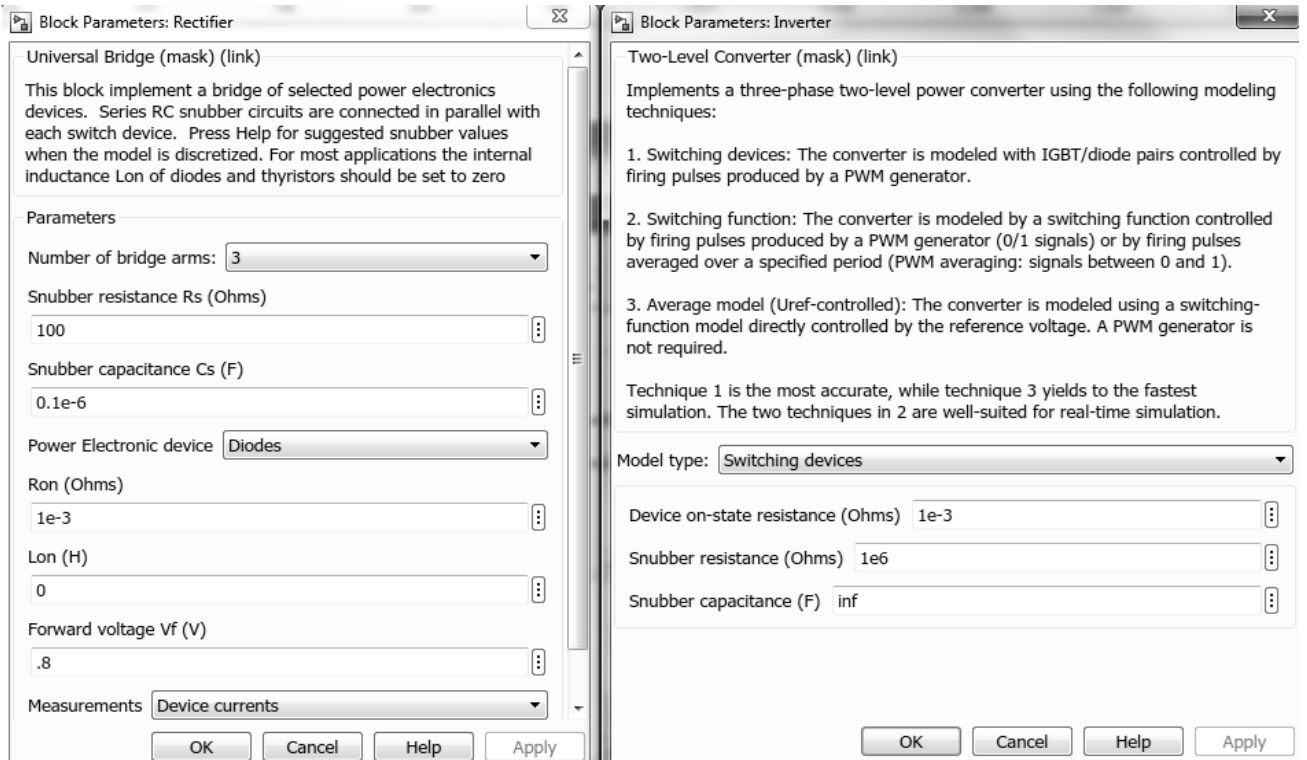


Рисунок 5.6 – Параметры блоков «Rectifier» и «Inverter» имитационной модели двухзвенного преобразователя частоты

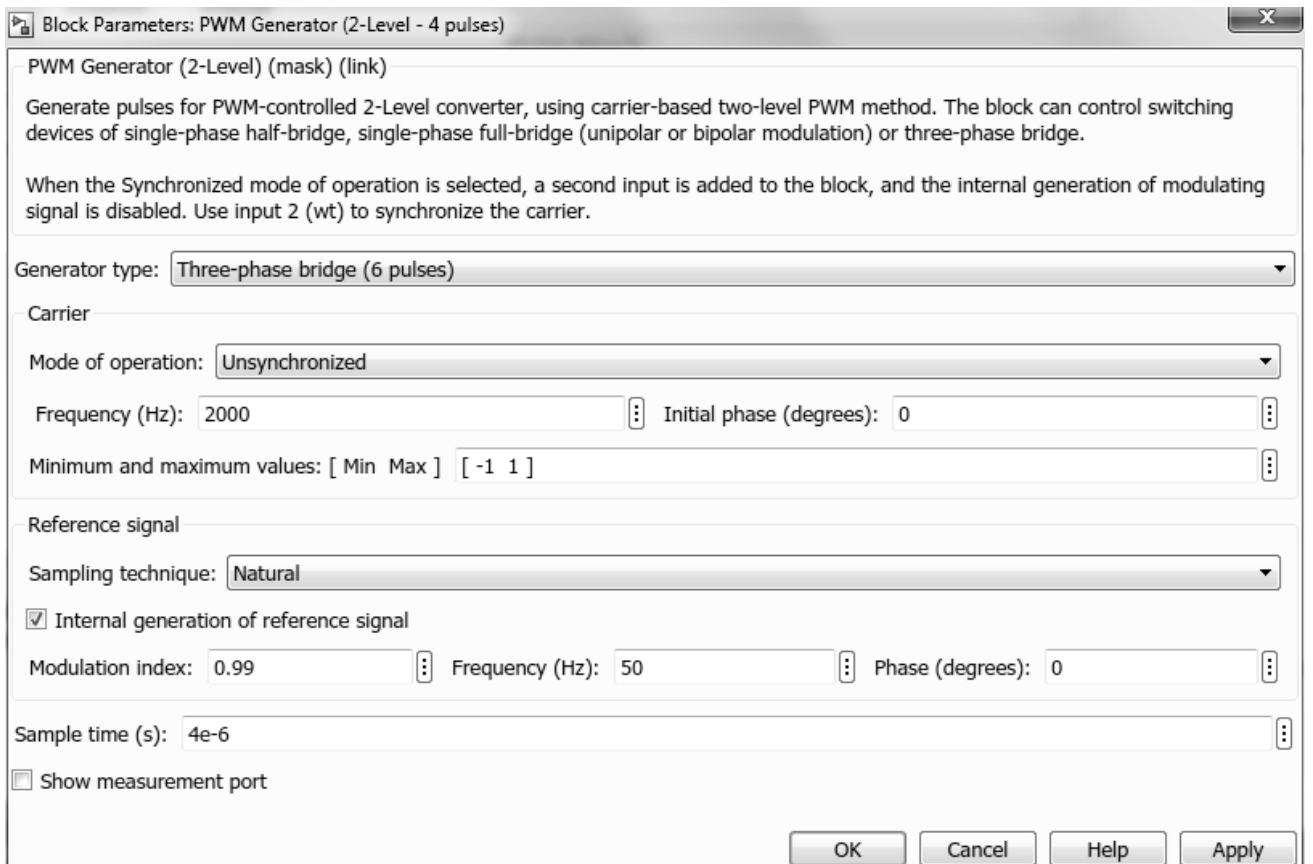
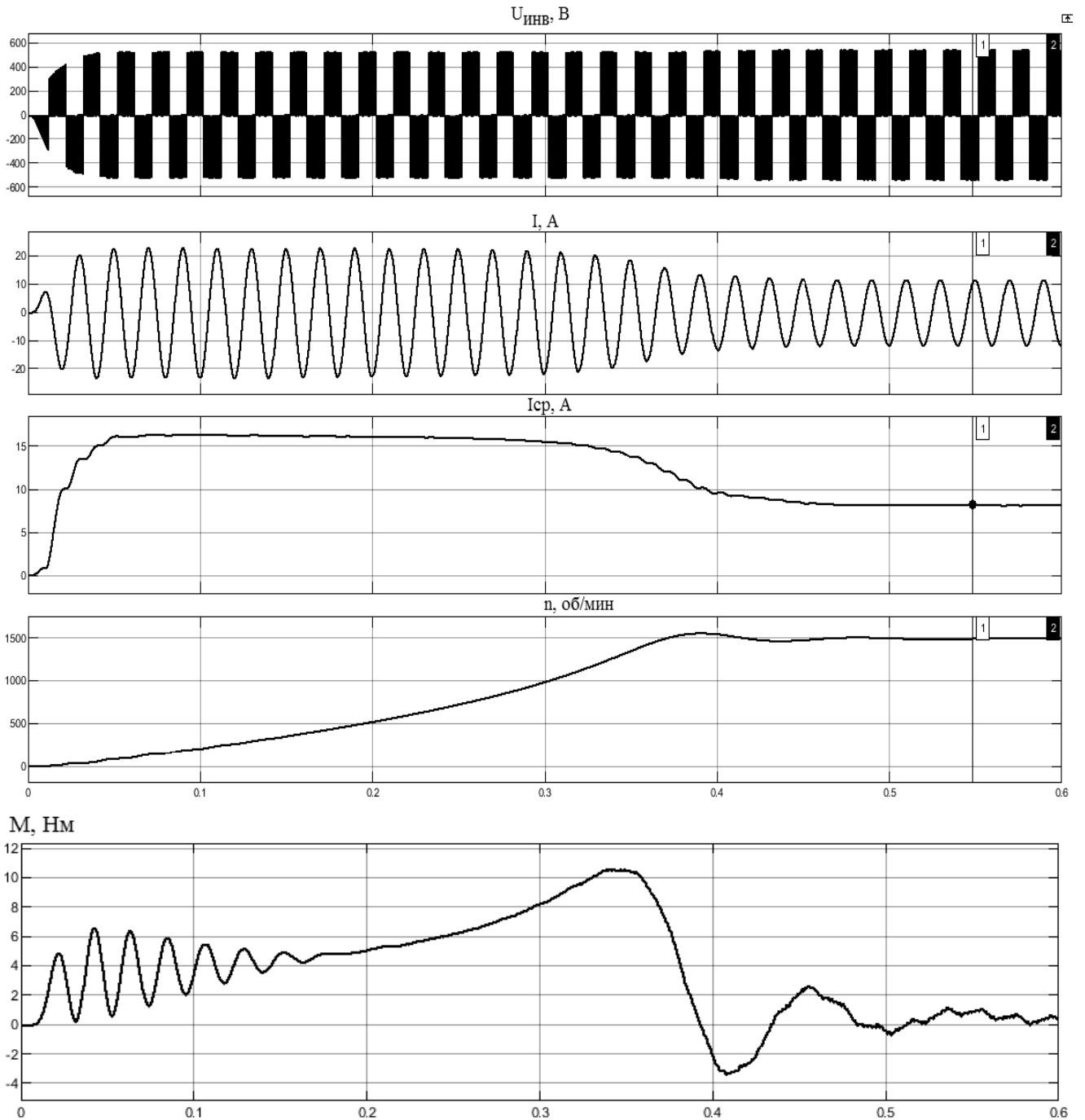


Рисунок 5.7 – Параметры блока «PWM Generator» для индекса модуляции 0,99 и частоты 50 Гц

На рисунках 5.8...5.9 приведены результаты аналитических исследований основного силового канала КЭУ (рисунок 4.4, гл. 4) по представленной имитационной модели (рисунок 5.2) при различных значениях, задаваемых блоком «PWM Generator», индекса модуляции (ИМ) и выходных частотах, формируемых блоком «AC–DC–AC Converter».



$U_{инв}$  – выходное напряжение инвертора (рисунок 5.2);  $I$ ,  $I_{ср}$  – мгновенные и действующие значения тока нагрузки (ГЭД);  $n$  – частота вращения вала ГЭД (ГВ);  $M$  – момент ГЭД

Рисунок 5.8 – Результаты моделирования основного силового канала КЭУ при ИМ, равном 0,99 и выходной частоте инвертора 50 Гц

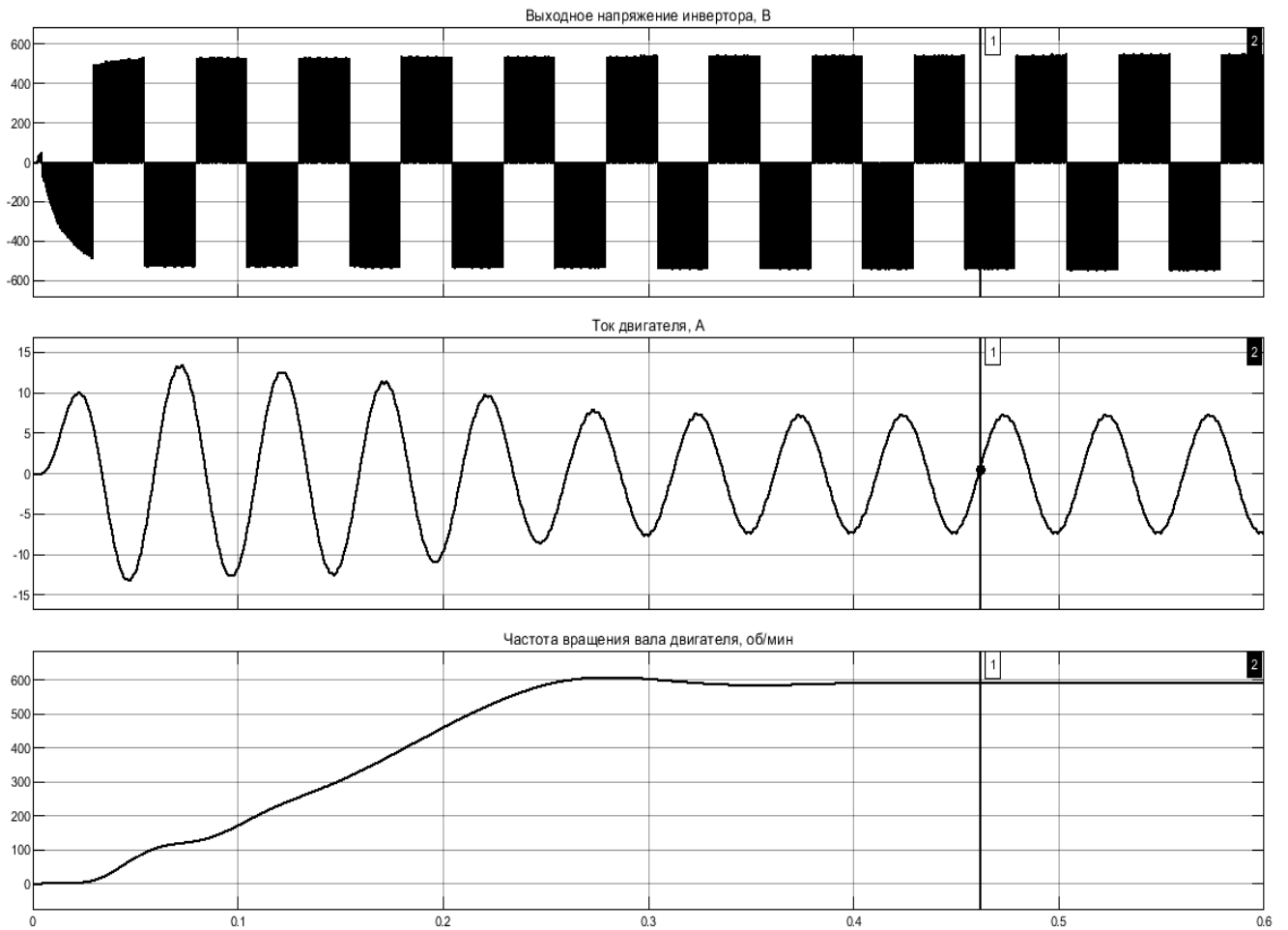


Рисунок 5.9 – Результаты моделирования основного силового канала КЭУ при ИМ, равном 0,25 и выходной частоте инвертора 20 Гц

На рисунках 5.10 и 5.11 представлены примеры результатов сравнительного анализа аналитических исследований и физического моделирования режимов КЭУ.

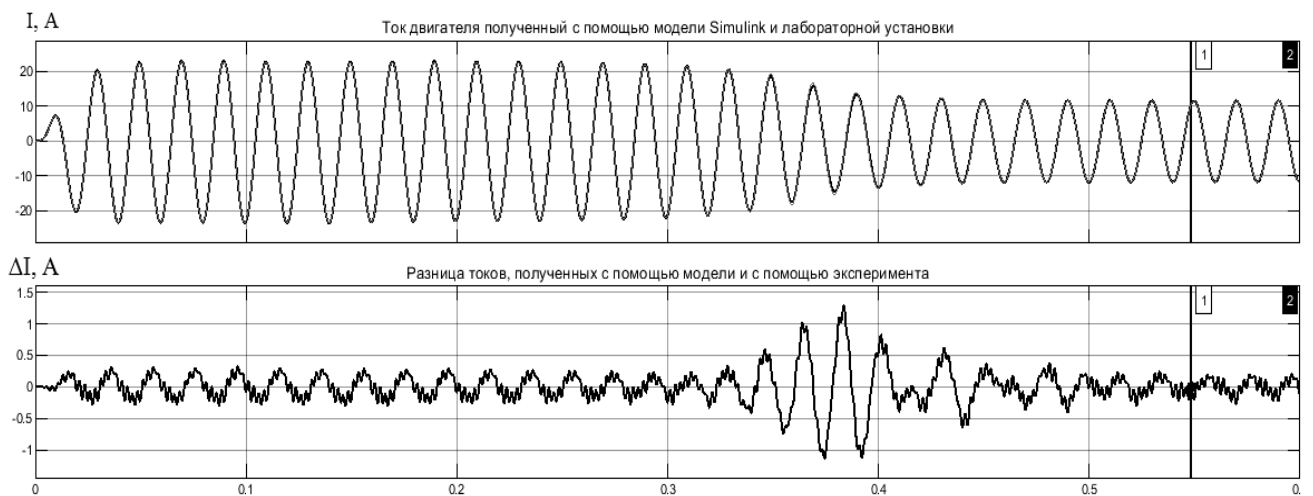


Рисунок 5.10 – Выборочные результаты сравнительного анализа аналитических исследований и физического моделирования КЭУ при ИМ, равном 0,99, и выходной частоте инвертора 50 Гц

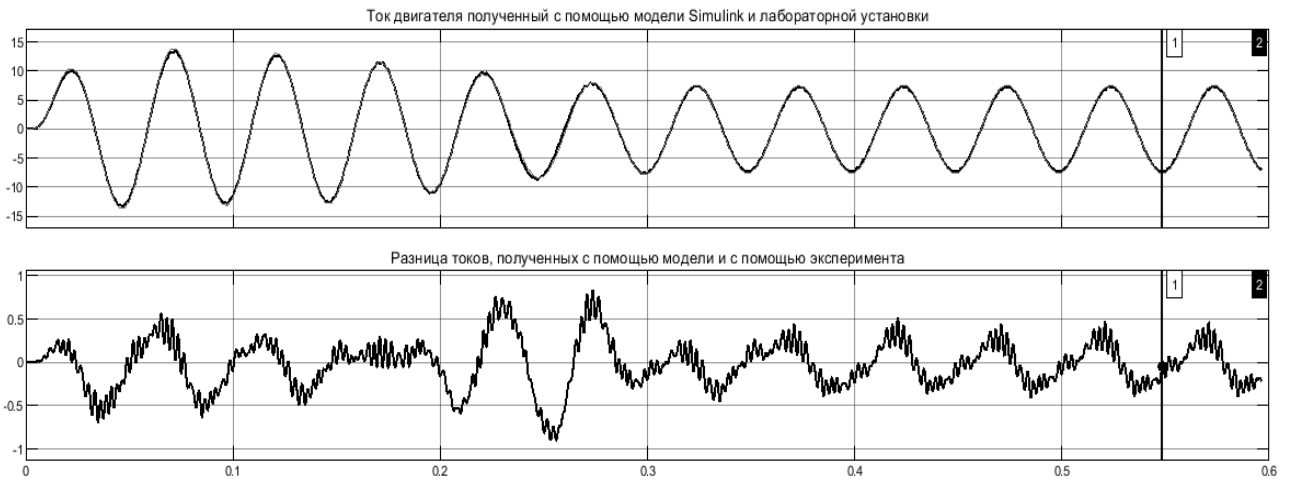


Рисунок 5.11 – Выборочные результаты сравнительного анализа аналитических исследований и физического моделирования КЭУ при ИМ, равном 0,25, и выходной частоте инвертора 20 Гц

Согласно рисункам 5.10 и 5.11, наибольшее расхождение между зависимостями токов двигателя (ГЭД), полученных аналитически и экспериментально, составляет около 1,25 А (15 %) при частоте 50 Гц.

При физическом моделировании расчете и построении совместных механических характеристик АД и ВРШ электропривода системы ПЧ-АД судовых КЭУ были приняты следующие допущения и ограничения:

- не учитывают динамические свойства ГЭД, полагают, что его разгон производится по статической механической характеристике;
- не учитывают инерционность судна и изменение скольжения гребного винта при разгоне судна и его торможении, полагают, что винт не «утяжеляется» при швартовке и не становится «легким» в установившемся режиме работы судна;
- полагают, что винт является полностью погруженным;
- полагают, что судно движется в спокойной воде, циклические воздействия на систему ГЭД – гребной винт, вызванные ударами волн о корпус судна, отсутствуют;
- полагают, что ГЭД питается от сети бесконечной мощности, при его пуске напряжение и частота сети не изменяются.
- расчет ведется для первой гармоники выходного напряжения ПЧ, а высшие гармонические составляющие не учитываются, так как коэффициент несинусоидальной кривой напряжения  $K_u$ , определяемый по формуле

$$K_u = \frac{1}{U_c} \cdot \sqrt{\sum_{n=2}^{200} U_n^2} \cdot 100\%, \quad (5.16)$$

при проведении экспериментов составил 7,4 %.

В формуле (5.16)  $U_c$  – действующее значение напряжения сети;  $U_n$  – напряжение гармонической составляющей  $n$ -го порядка ( $n$  – порядковый номер высшей гармонической составляющей).

Реализуемый оптимальный закон регулирования напряжения в функции частоты тока в общем случае имеет следующий вид [120]:

$$\frac{U}{U_H} = \frac{f}{f_H} \cdot \sqrt{\frac{M}{M_H}} \quad \text{или} \quad U^* = f^* \cdot \sqrt{M^*}. \quad (5.17)$$

Из формулы (5.17) выводится частный случай для механизмов с квадратичной зависимостью статического момента сопротивления от угловой скорости, к которым относится ВРШ:

$$\frac{U}{U_H} = \left( \frac{f}{f_H} \right)^2. \quad (5.18)$$

Для расчета механических характеристик при переменных параметрах питающей сети использована следующая формула:

$$M = \frac{3 \cdot U_\phi^2(f) \cdot \frac{R_2'}{S(f)}}{\omega_0(f) \cdot \left( \left( R_1 + \frac{R_2'}{S(f)} \right)^2 + x_k^2(f) \right)}, \quad (5.19)$$

где  $S(f)$  – скольжение при заданной частоте, которое можно найти по формуле:

$$S(f) = \frac{\omega_0 \cdot f^* - \omega}{\omega_0 \cdot f^*}, \quad (5.20)$$

где  $f^*$  – относительная частота тока  $\left( f^* = \frac{f_i}{f_H} \right)$ .

С учетом (5.20) окончательное выражение из (5.19) для расчета и построения механических характеристик представляется как:

$$M = \frac{3 \cdot (U_{\text{ф.юм}} \cdot \sqrt{f^*})^2 \cdot \frac{R_2' \cdot \omega_{0н} \cdot f^*}{\omega_{0н} \cdot f^* - \omega}}{\omega_{0н} \cdot f^* \cdot \left( \left( R_1 + \frac{R_2' \cdot \omega_{0н} \cdot f^*}{\omega_{0н} \cdot f^* - \omega} \right)^2 + (x_k \cdot f^*)^2 \right)}. \quad (5.21)$$

На основании выполненных аналитических и экспериментальных исследований построены механические характеристики асинхронного ГЭД  $M = f(\omega)$  при его питании от полупроводникового преобразователя частоты с регулируемыми выходными координатами (частотой  $f_i$  тока, изменяющейся в диапазоне от 20 до 50 Гц и напряжением  $U_i$ , регулируемом в соответствии с выражением (5.18)), а также механические характеристики ВРШ при разных углах поворота лопастей  $\alpha$  –  $M_{c1}$ ,  $M_{c2}$  и  $M_{c3}$ , представленные на рисунке 5.12.

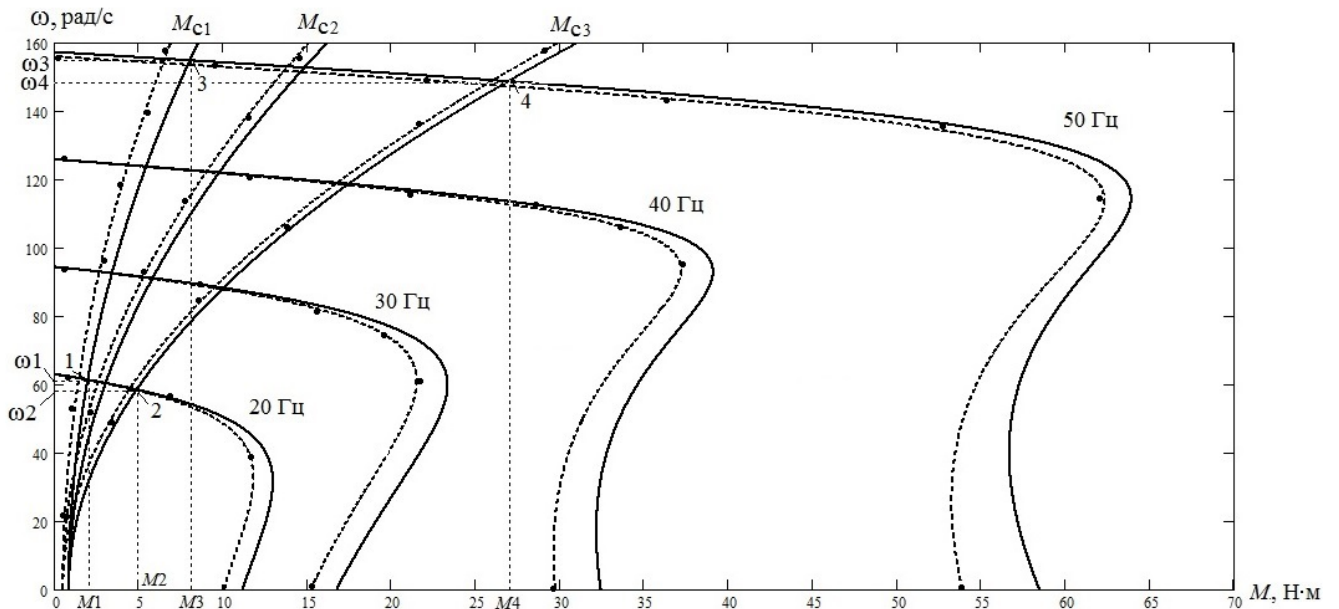


Рисунок 5.12 – Механические характеристики асинхронного ГЭД судовых КЭУ, построенные по данным аналитических и экспериментальных исследований

На рисунке 5.12 пунктирные линии соответствуют результатам экспериментов, а сплошные – результатам моделирования.

Наибольшее расхождение результатов аналитических и экспериментальных исследований составляет 11,7 % и соответствует режиму работы асинхронного ГЭД при частоте 50 Гц.

#### 5.4 Экономическая эффективность от внедрения КЭУ

Экономическая эффективность от внедрения предложенных научно-технических решений КЭУ основана на расчетах и сравнительном анализе с традиционной дизельной ПУ эксплуатируемого в Дальневосточном бассейне малотоннажного пассажирского теплохода «Пассат» проекта 1438 типа «Молодежный» пассажироместимостью 180 человек.

Основные данные судна «Пассат»: длина – 28,7 м; ширина – 6,4 м; осадка – 1,6 м; дедвейт  $D$  – 20 т; скорость судна  $v_c$  – 10 уз.

В состав ПУ судна входит ГД типа 3Д6С (мощность  $N_{ГД}$  – 150 л.с. (110,3 кВт); номинальная частота вращения  $n_{ГДн}$  – 1500 об/мин; номинальный удельный расход топлива  $g_{тн}$  – 165 г/л.с.·ч (224,3 г/кВт·ч); удельный расход масла на угар  $g_{муз}$  – (1,2...1,5) г/л.с.·ч ((1,6...2,0) г/кВт·ч)).

При внедрении предложенных научно-технических решений ГД 3Д6С ПУ судна может быть заменен на ГД меньшей мощности, например, типа Perkins-Talbot TD26T Marine (номинальная мощность  $N_{ГДн}$  – 75 л.с. (55,2 кВт); максимальный расход топлива  $G_{тм}$  при  $N_{ГДн} = 75$  л.с. и  $n_{ГД} = 3000$  об/мин – 17 л/ч; экономичный расход топлива  $G_{тэк}$  при  $N_{ГД} = 65$  л.с. и  $n_{ГД} = 2000$  об/мин – 5 л/ч.

Средний расход топлива  $G_{тср}$  ГД может быть определен как

$$G_{тср} = \frac{G_{тм} + G_{тэк}}{2} \approx 11 \text{ л/ч.} \quad (5.22)$$

При отсутствии паспортных зависимостей удельного расхода топлива  $g_m$  от мощности ГД  $N_{ГД}$  и от частоты вращения  $n_{ГД}$  ( $g_m = f(N_{ГД}, n_{ГД})$ ) могут быть использованы аналитические выражения, в частности, формула И. С. Шлиппе [121]:

$$g_m = k_3 k_4 g_{тн}, \quad (5.23)$$

где  $g_{тн}$  – удельный расход топлива при  $N_{ГДн}$ ;  $k_3$  – коэффициент, учитывающий зависимость удельного расхода топлива от относительной загрузки ГД (рисунок 5.13.1);  $k_4$  – коэффициент, учитывающий зависимость удельного расхода топлива от относительной частоты вращения ГД (рисунок 5.13.2).

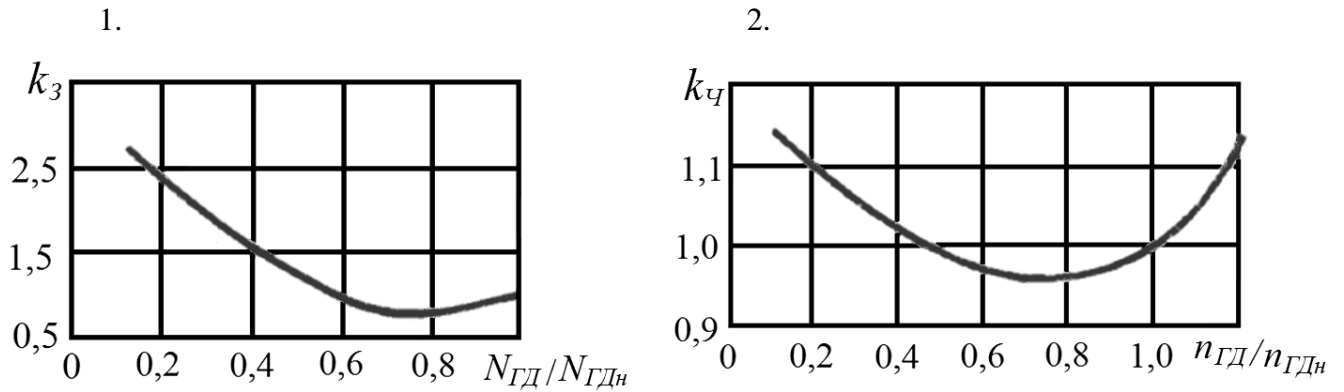


Рисунок 5.13 – Зависимости коэффициентов  $k_3$  и  $k_ч$  в функциях относительной загрузки  $N_{ГД}/N_{ГДн}$  и частоты вращения  $n_{ГД}/n_{ГДн}$

При расчете экономической эффективности представляется целесообразным рассмотреть следующих режимов работы: номинального ходового ( $n_{ГД} = n_{ГДн}$ ); долевых, соответствующих маневренным режимам при подходе судна к причалам и отходе от причалов ( $n_{ГД} = 0,8n_{ГДн}$ ), а также кратковременным стоянкам судна при работающем ГД ( $n_{ГД} = 0,5n_{ГДн}$ ).

Для номинального ходового режима справедливо выражение (1.10). В этом случае, с учетом (1.3) и (1.6)

$$N_{ГД} = N_{ГДн} = k_{n1} n_{ГДн}^3; \quad g_m = g_{mn}. \quad (5.24)$$

В (5.24)  $k_{n1}$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий КПД передачи и валопровода.

При подходе судна к причалам и отходе от причалов усредненное значение  $n_{ГД}$  составляет 80 % от  $n_{ГДн}$ .

Мощность ГД определяется как

$$N_{ГД} = 0,51N_{ГДн}, \quad (5.25)$$

а удельный расход топлива  $g_m$ , вычисляемый по (5.23), с учетом зависимостей  $k_3 = f(N_{ГД}/N_{ГДн})$  и  $k_ч = f(n_{ГД}/n_{ГДн})$  (рисунок 5.13), превышает номинальное значение  $g_{mn}$  на 15 % ( $g_m = 1,15g_{mn}$ ).



В случаях кратковременных стоянок судна при работающем ГД усредненное значение  $n_{ГД}$  составляет 50 % от  $n_{ГДн}$ . При этом

$$N_{ГД} \approx 0,13N_{ГДн}, \quad (5.26)$$

а вычисляемое по (5.23) с учетом  $k_3 = f(N_{ГД}/N_{ГДн})$  и  $k_4 = f(n_{ГД}/n_{ГДн})$  (рисунок 5.13) значение  $g_m$  превышает номинальную величину  $g_{mn}$  в 2,8 раза.

На основании обработанных статистических данных, с учетом [89] и [122], для восьмичасового суточного времени эксплуатации судна в навигационный период, равный 189 суток, среднестатистическое время рейсов судна  $t_p$  из порта Владивосток составляет: до мыса Чуркина – 15 мин; до острова Русский – 60 мин; до острова Попова – 120 мин. При этом время маневренных режимов  $t_m$ , обусловленных разгоном и торможением судна, составляет 6 мин. Среднестатистическое время стоянки судна  $t_c$  между рейсами для высадки и посадки пассажиров равно 10 мин.

При внедрении предлагаемых научно-технических решений [123] используемый ГД Perkins-Talbot TD26T Marine, согласно (5.22), будет работать с постоянным средним расходом топлива  $G_{мсп}$ , равным 11 л/час.

Расчет экономической эффективности проводился табличным методом с использованием «Microsoft Excel». Результаты расчетов приведены в приложении 7.

На рисунке 5.14 приведена графическая зависимость экономии горюче-смазочных материалов (ГСМ) в зависимости от времени рейса  $t_p$ , построенная на основании результатов расчетов.

Таким образом, при времени рейса  $t_p$  на мыс Чуркин, составляющего 15 мин, расходы на ГСМ уменьшатся в 1,6 раза, а при времени рейса на остров Попова, равного 120 мин, расходы снизятся примерно в 2,5 раза.

На рисунке 5.15 представлены результаты расчета экономической эффективности (ЭЭ) при замене главной дизельной установки на КЭУ, основанную на внедрении предлагаемых научно-технических решений.

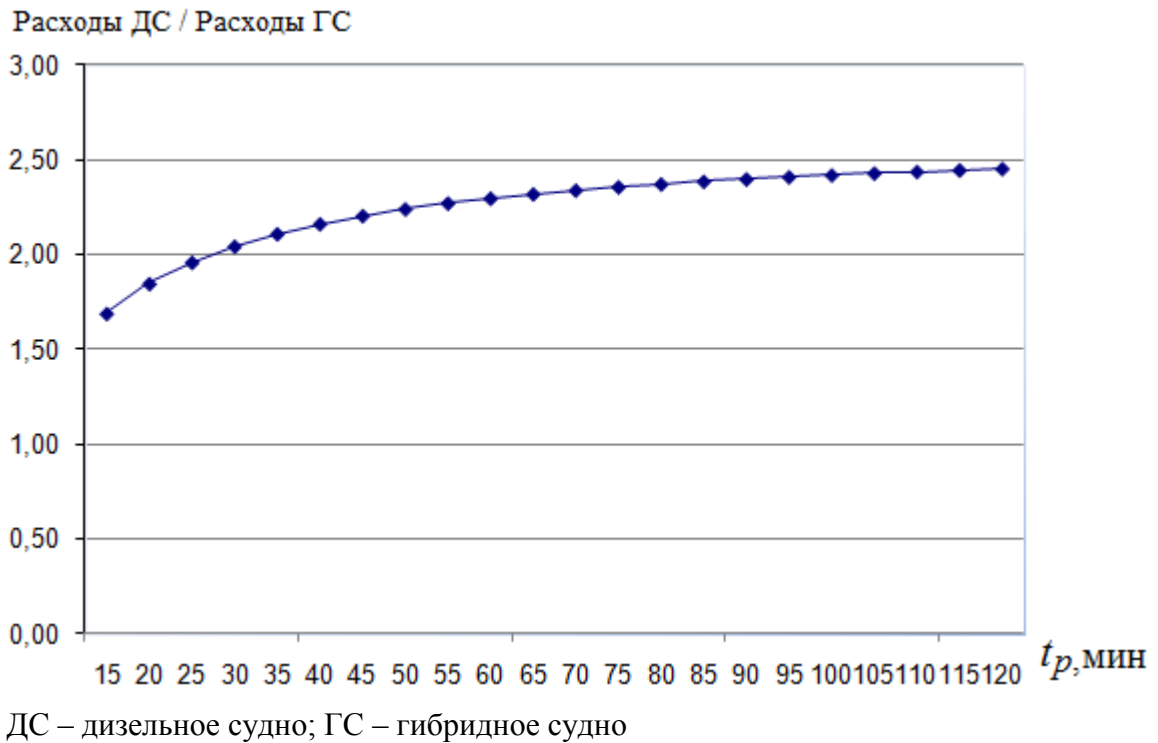


Рисунок 5.14 – График сравнительной зависимости экономии ГСМ в функции  $t_p$  при замене традиционной главной дизельной установки на КЭУ на пассажирском теплоходе «Пассат»

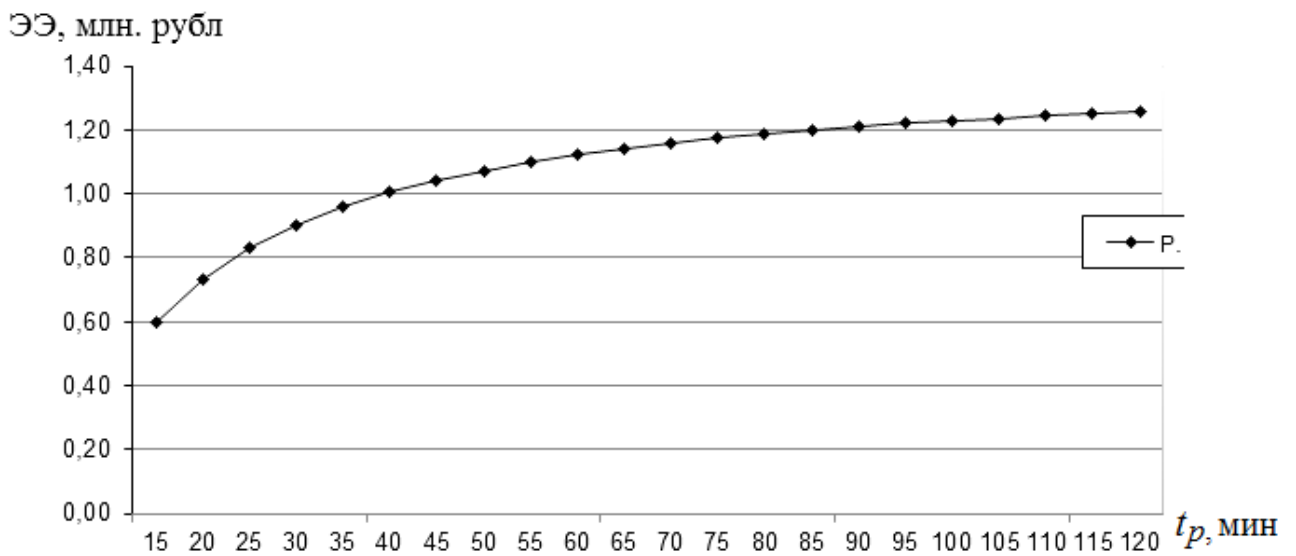
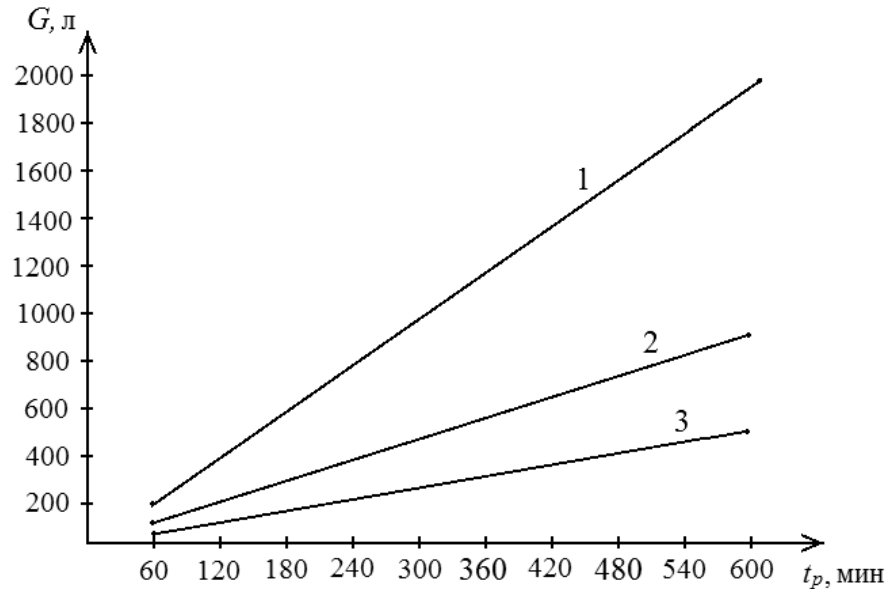


Рисунок 5.15 – Зависимость экономической эффективности в функции  $t_p$  при замене главной дизельной установки теплохода «Пассат» на КЭУ

Согласно рисунку 5.15 для наиболее коротких рейсов, в частности при  $t_p = 15$  мин, годовая ЭЭ составляет около 600 000 рублей в год, а при продолжительности рейсов  $t_p = 120$  мин – 1,26 млн. рублей.

На рисунке 5.16 приведены зависимости снижения расхода топлива  $G_m$  в функции времени рейсов  $t_p$  для быстроходных пассажирских судов [63], показывающие целесообразность использования на них главных гибридных энергоустановок (КЭУ).



1 – «Комета»; 2 – «Восход»; 3 – «Полесье»

Рисунок 5.16 – Зависимости снижения расхода топлива  $G_m$  в функции продолжительности рейсов  $t_p$  для быстроходных пассажирских судов

### 5.5 Экологическая эффективность от внедрения КЭУ

Экологическая эффективность обусловлена снижением вредных выбросов КЭУ по сравнению с дизельной ПУ судна за счет использования в составе КЭУ ГД меньшей мощности и обеспечения квазистационарных режимов работы ГД, близких к номинальным, характерных минимальным удельным расходом топлива и наименьшими вредными выбросами в окружающую судно среду. При этом практически исключается работа ГД в недогруженных режимах, когда происходит неполное сгорание топлива и, как следствие, закоксовка поршневых колец, а также в переходных режимах, при которых мгновенный расход топлива возрастает в 7...12 раз.

Определение вредных выбросов в окружающую атмосферу производилось на основании методик, приведенных в литературных источниках [124, 125].

Выхлоп по каждому  $i$ -му вредному веществу  $m_{ei}$ , выбрасываемому в атмосферу дизельным двигателем, может быть определен по формуле

$$m_{ei} = \frac{q_{ei} N_{ГД} \cdot n_p}{1000} (t_c N_c^* + t_m N_m^* + t_p N_{ГД}^*), \quad (5.27)$$

где  $q_{ei}$  – удельный выхлоп по  $i$ -му вредному веществу, г/кВт·ч;  $t_m$  – время торможений судна в маневренных режимах;  $N_c^*$ ,  $N_m^*$ ,  $N_{ГД}^*$  – относительные мощности ГД, развиваемые во время стоянок, торможений и в установившихся ходовых режимах судна, соответственно, кВт.

При использовании КЭУ

$$N_c^* \approx N_m^* \approx N_{ГД}^* \approx 1. \quad (5.28)$$

Основные результаты выполненных исследований по экологической эффективности КЭУ приведены в приложении 8.

На рисунке 5.17 приведен график сравнительной зависимости в функции времени работы ГД основных компонентов выхлопов в атмосферу ГД дизельных и гибридных судов (ДС и ГС, соответственно).

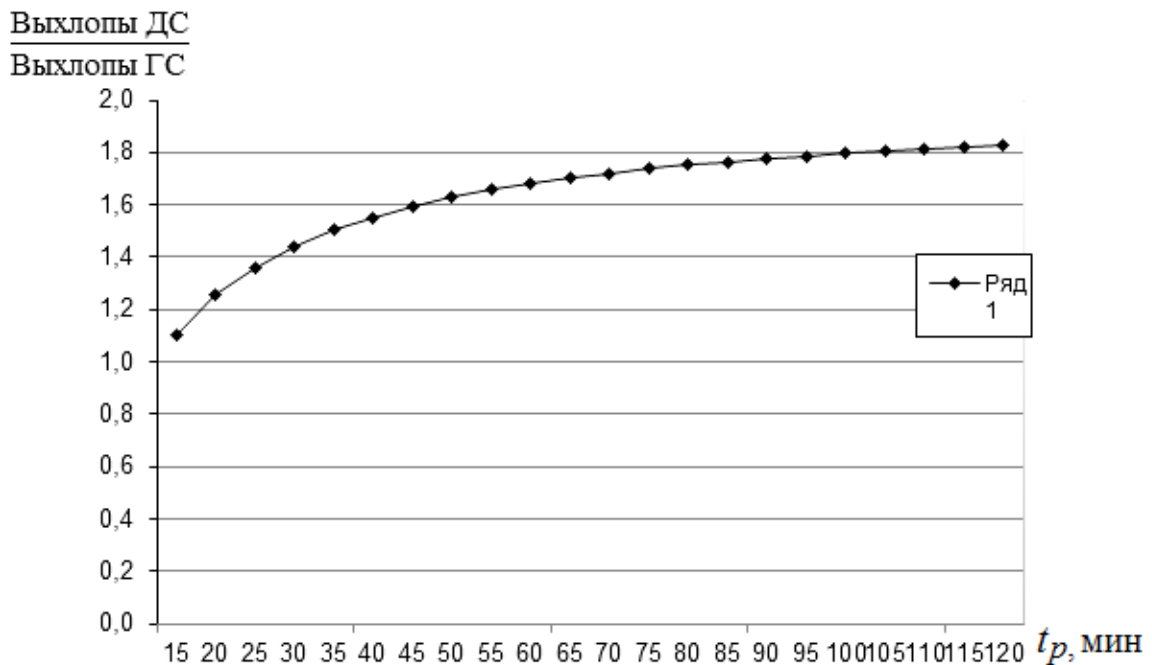


Рисунок 5.17 – График сравнительной зависимости основных компонентов выхлопов в атмосферу ДС и ГС в функции продолжительности рейсов  $t_p$

Исходя из графика, представленного на рисунке 5.16, с увеличением времени работы  $t_p$  выхлопы ГД КЭУ по сравнению с дизельной ПУ уменьшаются от 1,1 раза при  $t_p = 15$  мин до более чем в 1,8 раза при  $t_p = 120$  мин.

При выполнении расчетов по экологической эффективности КЭУ не учитывалось среднестатистическое время стоянки судна  $t_c$  между рейсами для высадки и посадки пассажиров с остановленным ГД.

На рисунке 5.18 в качестве результатов расчетов приведен график зависимости наиболее массовых выбросов в атмосферу веществ (СО и NOx) в функции времени работы ГД  $t_p$  в составе КЭУ.

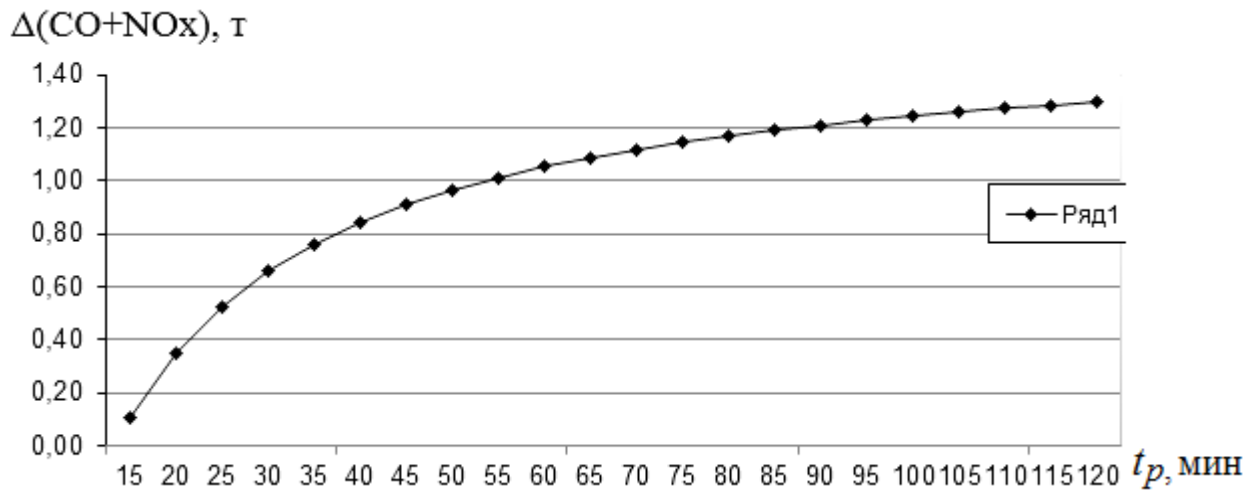


Рисунок 5.18 – График сравнительной зависимости выбросов в атмосферу СО и NOx в функции продолжительности рейсов  $t_p$

Согласно рисунку 5.18 с увеличением времени работы ГД в составе КЭУ наблюдается уменьшение выбросов в атмосферу СО и NOx от 0,10 т при времени  $t_p = 15$  мин до 1,30 т при  $t_p = 120$  мин за один навигационный период.

## 5.6 Выводы

1. Предложена на основании выполненных научно-технических исследований силовых каналов КЭУ и исходных описаний математических моделей схема замещения трехфазного асинхронного ГЭД в форме, пригодной для аналитических исследований КЭУ при помощи имитационного моделирования.

2. Разработана на основании преобразованных представленных аналитических зависимостей в среде «MATLAB R2021a» с использованием пакета расширения «Simulink» адаптированная имитационная модель основного силового канала, реализующая предлагаемый вариант схемных решений силовых каналов электротехнического комплекса судовых КЭУ.

3. Разработана и создана физическая модель для экспериментальных исследований режимов работы основного силового канала КЭУ, включающая инверторный преобразователь частоты промышленного производства и серийный асинхронный ЭД, являющийся физическим аналогом ГЭД.

4. Исследованы аналитически по представленной имитационной модели основного силового канала предлагаемых научно-технических решений и схеме замещения трехфазного асинхронного ГЭД основные режимы работы КЭУ.

5. Выполнено на экспериментальной установке физическое моделирование основных режимов работы КЭУ.

6. Произведен сравнительный анализ результатов аналитических и экспериментальных исследований, позволяющий сделать вывод о приемлемой адекватности предложенной имитационной модели. Наибольшее расхождение результатов аналитических и экспериментальных исследований соответствует статическому режиму работы асинхронного ГЭД при частоте 50 Гц и не превышает 12 %.

7. Выполнены расчеты экономической и экологической эффективности от внедрения предлагаемых научно-технических решений.

Уменьшение расходов на ГСМ изменяется от 1,69 раза при  $t_p = 15$  мин до 2,45 раз при  $t_p = 120$  мин. Экономическая эффективность при  $t_p = 15$  мин составляет около 600 000 рублей в год, а при продолжительности рейсов  $t_p = 120$  мин – 1,26 млн. рублей.

Выхлопы ГД КЭУ по сравнению с дизельной ПУ с увеличением времени работы  $t_p$  уменьшаются от 1,1 раза при  $t_p = 15$  мин до более чем в 1,8 раза при  $t_p = 120$  мин.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе на основании системного анализа и синтеза, сравнительных оценок, выполнены теоретические и экспериментальные исследования, направленные на совершенствование электротехнических комплексов судовых ПУ.

В соответствии с поставленными задачами получены следующие основные результаты.

1. Выполнен аналитический обзор основных вариантов ПУ судов, и рассмотрены выявленные особенности судов с ГЭУ, к которым относится наличие более высоких маневренных качеств, широких возможностей отбора мощности от ГГ ГЭУ для питания общесудовых потребителей ЭЭ и сокращения расходов топлива. Наиболее эффективен отбор мощности на электроходах переменного тока.

2. Выполнен обзор и анализ научно-технических решений основных вариантов ГЭУ эксплуатируемых судов-электроходов с целью разработки методов и средств повышения энергетической, экономической и экологической эффективности ГЭУ пропульсивных установок малотоннажных судов прибрежного плавания в пределах решения поставленных задач.

3. Предложен для оценки степени электрификации судов ГЭУ показатель (коэффициент) электрификации ГЭУ  $k_{ГЭУ}$ , позволяющий более корректно выполнять их сравнительный анализ.

4. Разработана на основании выполненных исследований эквивалентная функциональная схема электротехнических комплексов ГЭУ, включающая в себя силовой канал, содержащий ПД<sub>э</sub>, ГГ<sub>э</sub>, ПЭЭ<sub>э</sub>, ГЭД<sub>э</sub> и ГВ, и каналы управления на основе УУ и ИУ, к основным достоинствам которой относится наглядность и универсальность, обусловленная возможностью ее применения для судов-электроходов любого функционального назначения.

5. Разработана классификация, наиболее полно охватывающая классификационные признаки судовых ГЭУ, используемая как средство для установления связей между разнообразными ГЭУ и уточненной ориентировки в их количественном и функциональном многообразии, которая выражает систему, прису-

щую отображенному действительному состоянию судовых ГЭУ, обуславливающую их зафиксированные свойства и отношения, организацию предпосылок для корректного прогнозирования основных направлений развития.

Предложенная классификация отражает современное состояние судовых ГЭУ, стимулирует развитие теоретических аспектов их исследований, позволяет делать обоснованные прогнозы относительно неизвестных еще фактов или закономерностей, является качественным скачком в их развитии.

6. Предложена КЭУ, включающая в качестве дополнительных источников энергии АБ, к основным преимуществам которой относится возможность использования неререверсивных ГД установленной мощности, меньшей номинальной мощности ГВ (ВРШ), обеспечивая при этом работу ГД с номинальными параметрами и сокращение эксплуатационных расходов.

7. Разработан способ управления судовой КЭУ, защищенный патентом на изобретение, техническая реализация которого повышает эффективность ТЭ (технико-экономические характеристики и экологические показатели) ПК малотоннажных судов, работающих с частыми маневренными режимами, а также высокомоментные электрические машины, в частности, электромеханический преобразователь, с несколькими статорно – роторными парами, характеризующиеся большей надежностью и удельной мощностью по сравнению с традиционными электрическими машинами.

8. Предложены математические модели для отдельного функционирования компонентов или в составе КЭУ, позволяющие корректно решать обозначенные задачи исследований.

9. Разработана на основании аналитических зависимостей адаптированная имитационная модель основного силового канала, реализующая предлагаемый вариант схемных решений силовых каналов КЭУ.

10. Разработана и создана физическая модель для экспериментальных исследований режимов работы основного силового канала КЭУ.

11. Выполнены аналитические и экспериментальные исследования функционирования предлагаемых научно-технических решений судовых КЭУ, произве-



ден их сравнительный анализ. Выполнены расчеты экономической и экологической эффективности от внедрения предлагаемых научно-технических решений.

Результаты выполненных исследований обладают научной новизной и способствуют дальнейшему развитию судовых ПК, включающих различные варианты ГЭУ, в частности КЭУ.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

АБ	– аккумуляторная батарея
АД	– асинхронный двигатель
АВ	– автоматический выключатель
БМРТ	– большой морозильный рыболовный траулер
ВГ	– валогенератор
ВГУ	– валогенераторная установка
ВМ	– валомашина
ВНР	– Венгерская Народная Республика (до октября 1989 г.)
ВРК	– винторулевая колонка
ВРШ	– винт регулируемого шага
ВФШ	– винт фиксируемого шага
Г–Д	– генератор – двигатель (система)
ГВ	– гребной винт
ГГ	– главный генератор
ГД	– главный двигатель
ГДР	– Германская Демократическая Республика (до октября 1990 г.)
ГЭД	– гребной электродвигатель
ГЭУ	– гребная электрическая установка
ДАУ	– дистанционное автоматизированное управление
ДГ	– дизель-генератор
ДН	– датчик напряжения
ДЭГУ	– дизель-электрическая гребная установка
ИМ	– индекс модуляции
ИН	– инвертор
ИП	– импульсный преобразователь
ИУ	– информационное устройство

КПД, $\eta$	– коэффициент полезного действия
КЭУ	– комбинированная энергетическая установка
МДС	– магнитодвижущая сила
МГУ	– Морской государственный университет
МО	– машинное отделение
МПЧ	– матричный преобразователь частоты
НВ	– неуправляемый выпрямитель
НРБ	– Народная Республика Болгария (до ноября 1990 г.)
НС	– намагничивающая сила
о.е.	– относительная единица
ПД	– первичный двигатель
ПК	– пропульсивный комплекс
ПНР	– Польская Народная Республика (до декабря 1990 г.)
ПП	– полупроводниковый преобразователь
ППр	– полупроводниковый прибор
ПУ	– пропульсивная установка
ПЭЭ	– преобразователь электрической энергии
РМРС	– Российский морской регистр судоходства
САУ	– система автоматического управления
СВ	– система возбуждения
СГ	– синхронный генератор
СК	– синхронный компенсатор
СМ	– силовой модуль (полупроводниковый)
СР	– суммирующий редуктор
СРР	– Социалистическая Республика Румыния (до декабря 1989 г.)
СССР	– Союз Советских Социалистических Республик (до декабря 1991 г.)

СУ	– система управления
СФРЮ	– Социалистическая Федеративная Республика Югославия (до июня 1991 г.)
СЭУ	– судовая энергетическая установка
ТЭ	– техническая эксплуатация
ТЭГУ	– турбоэлектрическая гребная установка
УУ	– управляющее устройство
ФАЛ	– функция алгебры логики
ЭД	– электрический двигатель
ЭДС	– электродвижущая сила
ЭМ	– электрическая машина
ЭМУ	– электромашинный усилитель
ЭО	– электрическое оборудование
ЭП	– электрический привод
ЭС	– электрическая станция
ЭЭ	– электрическая энергия
ЭЭС	– электроэнергетическая система
ABB	– Asea Brown Boveri (шведско-швейцарская компания)
Ag-Zn	– серебряно-цинковый (аккумулятор)
BMS	– Battery Management System (система контроля и управления) АБ
cosφ	– коэффициент мощности
Fe-Ni	– железо-никелевый (аккумулятор)
IGBT	– Insulated Gate Bipolar Transistor (биполярный транзистор с изолированным раствором)
LFP (LiFePo4)	– литий-железо-фосфатный (аккумулятор)
Li-ion	– литий-ионный (аккумулятор)
LIP (Li-polymer)	– литий-полимерный (аккумулятор)
LTO	– литий-титанатный (аккумулятор)

Ni-Cd	– никель-кадмиевый (аккумулятор)
Ni-Mh	– никель-металлогидридный (аккумулятор)
SLA	– Sealed Lead Acid (герметизированный свинцово-кислотный (аккумулятор))
SOC	– State of Charge (степень заряженности АБ)

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Камкин, С. В. Эксплуатация судовых дизельных энергетических установок [Текст] / С. В. Камкин [и др.]. – М. : Транспорт, 1996. – 432 с.
2. Иванченко, А. А. Обзор опыта совершенствования конструкции и применения движительных систем в современном судостроении [Текст] / А. А. Иванченко, В. А. Шишкин, В. Н. Окунев // Вестник гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. – 2016. – № 4(38). – С. 156-176.
3. Артемов, Г. А. Судовые энергетические установки [Текст] / Г. А. Артемов [и др.]. – Л. : Судостроение, 1987. – 480 с.
4. Антоненко, С. В. Судовые движители [Текст] / С. В. Антоненко. – Владивосток : Дальневост. гос. техн. ун-т, 2007. – 126 с.
5. Бурков, А. Ф. Проектирование и расчет элементов пропульсивных комплексов с гребными электрическими установками [Текст] / А. Ф. Бурков, В. Ф. Веревкин. – Владивосток : Дальневост. федерал. ун-т, 2018. – 33 с.
6. Возницкий, И. В. Судовые дизели и их эксплуатация [Текст] / И. В. Возницкий, Е. Г. Михеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1990. – 360 с.
7. Овсянников, М. К. Дизели в пропульсивном комплексе морских судов : Справочник [Текст] / М. К. Овсянников, В. А. Петухов. – Л. : Судостроение, 1987. – 256 с.
8. Возницкий, И. В. Судовые двигатели внутреннего сгорания [Текст] / И. В. Возницкий, А. С. Пунда. – Т. 1. – М. : Моркнига, 2008. – 470 с.
9. Пахомов, Ю. А. Судовые энергетические установки с двигателями внутреннего сгорания [Текст] / Ю. А. Пахомов. – М. : ТрансЛит, 2007. – 528 с.
10. Миханошин, В. В. Электроходы на Российских водных путях / В. В. Миханошин, В. Ф. Веревкин // Мат. межд. конф., посвящ. 200-летию подготовки кадров для ВТ России «Водные пути России : строительство, эксплуатация, управление». – СПб. : ФГОУ ВПО СПГУВК. – 2009. – С. 241-244.
11. Бурков, А. Ф. Повышение энергоэффективности морского транспорта и транспортной инфраструктуры [Текст] / А. Ф. Бурков, В. Ф. Веревкин, П. М. Радченко ; под общей ред. А. Ф. Буркова. – СПб. : Лань, 2019. – 132 с.

12. Мацкерле, Ю. Современный экономичный автомобиль [Текст] Ю. Мацкерле. – Пер. с чешск. В. Б. Иванова ; под ред. А. Р. Бенедиктова. – М. : Машиностроение, 1987. – 320 с.
13. Фиясь, И. П. Обратимая валогенераторная установка с полупроводниковым преобразователем частоты [Текст] / И. П. Фиясь, В. В. Евграфов // Сб. науч. трудов. – М. : В/О Мортехинформреклама, 1987. – С. 68-74.
14. Попов, Г. А. Системы управления судовыми дизелями [Текст] / Г. А. Попов. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб. : Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2008. – 80 с.
15. Захаров, Г. В. Техническая эксплуатация судовых дизельных установок [Текст] / Г. В. Захаров. – М. : ТрансЛит, 2009. – 256 с.
16. Веревкин, В. Ф. Электроходы на Дальнем Востоке [Текст] / В. Ф. Веревкин. – Владивосток : Мор. гос. ун-т им. адм. Г. И. Невельского, 2006. – 134 с.
17. Хайкин, А. Б. Современные и перспективные электроходы [Текст] / А. Б. Хайкин. – Л. : Судостроение, 1969. – 395 с.
18. Горбунов, Б. А. Современные и перспективные гребные электрические установки судов [Текст] / Б. А. Горбунов, А. С. Савин, В. В. Сержантов. – Л. : Судостроение, 1979. – 180 с.
19. Рукавишников, С. Б. Автоматизированные гребные электрические установки [Текст] / С. Б. Рукавишников. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Судостроение, 1983. – 240 с.
20. Полонский, В. И. Гребные электрические установки [Текст] / В. И. Полонский. – Л. : Морской транспорт, 1958. – 535 с.
21. Королева, Т. Н. Судовые гребные электрические установки [Текст] / Т. Н. Королева, А. П. Сеньков. – СПб. : СПб гос. мор. техн. ун-т, 2014. – 84 с.
22. Иванченко, А. А. Обзор опыта совершенствования конструкции и применения движительных систем в современном судостроении [Текст] / А. А. Иванченко, В. А. Шишкин, В. Н. Окунев // Вестник гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. – 2016. – № 4(38). – С. 156-176.
23. Радченко, О. П. Техническая эксплуатация судовых энергетических установок [Текст] / О. П. Радченко. – Керчь : КГМТУ, 2010. – 84.

24. Попков, О. З. Основы преобразовательной техники [Текст] / О. З. Попков. – 2-е изд., стереотип. – М. : Издательский дом МЭИ, 2007. – 200 с.

25. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов [Текст] / Ч. XI. Электрическое оборудование. – СПб. : Российский морской регистр судоходства, 2020. – 331 с.

26. Справочник по преобразовательной технике [Текст] / Под. ред. И. М. Чиженко. – Киев : Техника, 1978. – 447 с.

27. Мещеряков, В. Н. Математический анализ и моделирование преобразователя частоты матричного типа с непосредственным управлением по методу пространственно-векторной модуляции [Текст] / В. Н. Мещеряков, Д. В. Байков. – Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2015. – Т. 15. – № 1. – С. 21-33.

28. Миханошин, В. В. Комбинированная судовая энергетическая установка / В. В. Миханошин // Мат. X междунар. конф. студ., асп. и молод. учен. «Интеллектуальный потенциал ВУЗов – на развитие Дальневосточного региона России». – Кн. 2. – Владивосток : Изд-во ВГУЭС. – 2008. – С. 51-53.

29. Миханошин, В. В. Использование комбинированных энергоустановок на транспорте – залог повышения его экологической и экономической эффективности / В. В. Миханошин, В. Ф. Веревкин // Мат. междунар. науч. чтений «Приморские зори – 2009». – Вып. 2. – Владивосток : Изд-во ТАНЭБ. – С. 204-208.

30. Миханошин, В. В. Комбинированная энергетическая установка для судов прибрежного плавания / В. В. Миханошин // Сб. мат. науч. конф. «Вологдинские чтения». – Владивосток : ДВГТУ. – 2009. – С. 134-137.

31. Хаустов, А. Н. Электропаром «АМПЕРЕ» [Текст] / А.Н. Хаустов // Судостроение. – 2015. – № 3. – С. 75.

32. Fuel cells – the future of power generation [Текст] // Marine News. – 2003. – No 2. – P. 38-41.

33. Миханошин, В. В. Возможности использования комбинированных энергоустановок на малотоннажных судах [Текст] / В. В. Миханошин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 1. – С. 259-262.



34. Патент 2483972 Российская Федерация. Способ управления судовой комбинированной энергетической установкой [Текст] / Миханошин В. В. ; заявитель и патентообладатель Мор. гос. ун-т им. адм. Г. И. Невельского. – 10.06.2013. Бюл. № 16.

35. Миханошин, В. В. Комбинированная энергетическая установка судна – электрохода / В. В. Миханошин // Мат. XVI межд. конф. студ., асп. и молод. учен. – Т. 1. – Томск : ТПУ. – 2010. – С. 83-84.

36. Сиверс, П. Л. Судовые электроприводы [Текст] / П. Л. Сиверс. – Изд. 2-е. – М. : Транспорт, 1975. – 456 с.

37. Бурков, А. Ф. Повышение эффективности технической эксплуатации судовых электроприводов [Текст] / А. Ф. Бурков. – Владивосток : Мор. гос. ун-т им. адм. Г. И. Невельского, 2011. – 417 с.

38. Системы электроэнергетические судовые. Термины и определения [Текст] : ГОСТ 22652–77. – М. : Изд-во стандартов, 1977. – 4 с.

39. Бурков, А. Ф. Надежность судовых электроприводов [Текст] / А. Ф. Бурков. – Владивосток : Дальневост. федерал. ун-т, 2014. – 204 с.

40. Барановский, Ю. Г. Морские сухогрузные транспортные суда : Каталог [Текст] / Ю. Г. Барановский, Н. П. Мясникова, Г. С. Лобанова. – Л. : Транспорт, 1985. – 624 с.

41. Афанасьев, Е. П. Морские транспортные суда России : Каталог [Текст] / Е. П. Афанасьев, Г. С. Лобанова, Г. В. Владимиров. – СПб. : АО ЦНИИМФ, 1995. – 745 с.

42. Аврунин А. Г. Тепловозные и судовые двигатели Д50. Конструкция, эксплуатация, разборка, сборка и регулировка [Текст] / А. Г. Аврунин [и др.]. – М. : Изд-во машиностроит. лит., 1952. – 276 с.

43. Судовой дизель-генератор ЗД100. Технические условия на ремонт дизеля 452-56.033УР [Текст] – М. : Моркнига, 1976. – 409 с.

44. Чиликин, М. Г. Общий курс электропривода [Текст] / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. – Изд. 6-е, доп. и перераб. – М. : Энергоиздат, 1981. – 576 с.

45. Акулов, Ю. И. Гребные электрические установки и их эксплуатация [Текст] / Ю. И. Акулов, Ю. К. Головин. – М. : Транспорт, 1967. – 320 с.
46. Кузнецов, Н. А. Основы проектирования гребных электрических установок [Текст] / Н. А. Кузнецов [и др.]; науч. ред. П. В. Куропаткин. – Л. : Судостроение, 1972. – 656 с.
47. Айзенштадт, Е. Б. Гребные электрические установки : Справочник [Текст] / Е. Б. Айзенштадт [и др.]. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л. : Судостроение, 1985. – 304 с.
48. Справочник судового электротехника [Текст] : в 3 т. / под ред. Г. И. Китаенко. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Т. 1. – Л. : Судостроение, 1980. – 528 с.
49. Акулов, Ю. И. Гребные электрические установки и их эксплуатация [Текст] / Ю. И. Акулов. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1982. – 264 с.
50. Куропаткин, П. В. Техническая эксплуатация гребных электрических установок [Текст] / П. В. Куропаткин, А. А. Козлов, Н. П. Коновалов, С. А. Корди ; под ред. П. В. Куропаткина. – М. : Транспорт, 1968. – 176 с.
51. Руденко, В. С. Основы преобразовательной техники [Текст] / В. С. Руденко, В. И. Сенько, И. М. Чиженко. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1980. – 424 с.
52. Васин, И. М. Малое гидрографическое судно «Вайгач» [Текст] / И. М. Васин, А. В. Григорьев, Л. С. Макаров // Судостроение. – 2008. – № 1. – С. 31-32.
53. Григорьев, А. В. Результаты ходовых испытаний единой электроэнергетической установки малого гидрографического судна «Вайгач» [Текст] / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер, Д. И. Улитовский // Судостроение. – 2008. – № 1. – С. 33-35.
54. Григорьев, А. В. Экспериментальные исследования системы электродвижения переменного тока с полупроводниковым преобразователем [Текст] / А. В. Григорьев // Судостроение. – 2007. – № 3. – С. 30-32.
55. Хайкин, А. Б. Автоматизированные гребные электрические установки [Текст] / А. Б. Хайкин, В. Н. Васильев, В. И. Полонский. – М. : Транспорт, 1986. – 424 с.
56. Осокин, Б. В. Электрооборудование судов [Текст] / Б. В. Осокин, О. П. Хайдуков. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1982. – 352 с.

57. Акулов, Ю. И. Гребные электрические установки [Текст] / Ю. И. Акулов. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – М. : Транспорт, 1972. – 304 с.

58. Полонский, В. И. Электроходы и перспективы их развития [Текст] / В. И. Полонский, А. Б. Хайкин. – Л. : Судпромгиз, 1960. – 500 с.

59. Чекунов, К. А. Судовые электроприводы и электродвижение судов [Текст] / К. А. Чекунов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л. : Судостроение, 1969. – 464 с.

60. Burkov A.F., Mikhanoshin V.V., Avetisyan V.R., Nguen V.K. Classification of Electric Propulsion Installations of the Ship Propulsion Systems. International Journal of Engineering Research and Technology. ISSN 0974-3154. Vol. 13. No. 12, 2020. – P. 4794-4798/ International Research Publication House. <http://www.irphouse.com>.

61. De Breucker, S. Possible applications of plug-in hybrid electric ships [Текст] / S. De Breucker, E. Peeters, J. Driesen // 2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. – IEEE, 2009. – Pp. 310-317. DOI : 10.1109/ESTS.2009.4906530.

62. Bennabi, N. Hybrid propulsion systems for small ships : Context and challenges [Текст] / N. Bennabi [et al] // 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM). – IEEE, 2016. – Pp. 2948-2954. DOI : 10.1109/ICELMACH.2016.7732943.

63. Бурков, А. Ф. Повышение энергоэффективности силовых электроэнергетических установок малотоннажных пассажирских судов / А. Ф. Бурков, В. В. Миханошин, Нгуен Ван Ха // Омск : Омский научный вестник. – 2021. – № 4 (178). – С. 46-51.

64. Миханошин, В. В. Сравнение структурных схем гибридных судовых энергоустановок / В. В. Миханошин, В. Ф. Веревкин // Peer Reviewed, Open Access, Free Online Journal Published monthly. – Is. 4 (13). – 2014. – Italian Science Review. – P. 592-593.

65. Bennabi, N. Modeling and Simulation of a Series Hybrid Propulsion Chain for Small Ships [Текст] / J. F. Charpentier, J. Y. Billard, H. Menana, B. Nottellet // 2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). – IEEE, 2017. – 8 p. DOI : 10.1109/VPPC.2017.8331007.

66. Миханошин, В. В. Методы разделения мощности в судовых гибридных энергоустановках / В. В. Миханошин // Мат. 8-й междунар. науч. практ. конф. «Проблемы транспорта Дальнего Востока». – Владивосток : Дальневост. отд. Рос. акад. тр-та. – 2009. – С. 117-119.

67. Бурков, А. Ф. Повышение эффективности управления комбинированными энергетическими установками судов / А. Ф. Бурков, В. В. Миханошин, Нгуен Ван Ха // Вестник Гос. ун-та мор. и речн. флота им. адм. С. О. Макарова. – СПб. : Гос. ун-т мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. – 2020. – Т. 12. – № 2. – С. 381-389.

68. Burkov, A. F., Mikhanoshin V. V., Avetisyan W. R. Improving the Energy Efficiency of Propulsion Systems of the Sea and River Fleets. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. Vol. 8. No. 4, April, 2020. Available Online at <http://www.warse.org/IJETER/static/pdf/file/ijeter35842020.pdf>. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/3584202>.

69. Миханошин, В. В. Расчет величины напряжения и ёмкости аккумуляторной батареи для комбинированной энергоустановки / В. В. Миханошин, В. Ф. Веревкин // Науч. тр. Дальрыбвтуза. – Вып. 21, Ч. 1. – Владивосток : Дальрыбвтуз. – 2009. – С. 195-201.

70. Патент на изобретение RU 2716514. Способ разгона глиссирующего судна / Миханошин В. В., Наумов И. М. – Морск. гос. ун-т им. адм. Г. И. Невельского ; приоритет 25.04.2018 ; зарег. 12.03.2020. Бюл. № 8.

71. Boldea, I., Tutelea L.N., Deaconu S.I., Marignetti F. Dual rotor single- stator axial air gap PMSM motor / generator drive for HEVs: A review of comprehensive modelin. Conference Paper. October 2012; <https://www.researchgate.net/publication/261130743>; DOI: 10.1109/ESARS.2012.6387498.

72. Патент на изобретение RU 2716489. Электромеханический преобразователь / Миханошин В. В. – Морск. гос. ун-т им. адм. Г. И. Невельского ; приоритет 14.05.2018 ; зарег. 12.05.2020. Бюл. № 32.

73. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики) [Текст] / В. А. Веников, Г. В. Веников. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1984. – 440 с.

74. Загорский, А. Е. Управление переходными процессами в электрических машинах переменного тока [Текст] / А. Е. Загорский, Ю. Г. Шакарян. □ М. : Энергоатомиздат, 1986. □ 177 с.

75. Менский, Б. М. Принцип инвариантности в автоматическом регулировании и управлении [Текст] / Б. М. Менский. □ М. : Машиностроение, 1972. □ 247 с.

76. Трещев, И. И. Несимметричные режимы судовых машин переменного тока [Текст] / И. И. Трещев. – Л. : Судостроение, 1965. – 248 с.

77. Шакарян, Ю. Г. Метод расчета переходных процессов регулируемых электрических машин [Текст] / Ю. Г. Шакарян, А. Е. Загорский // Электричество. – 1977. – № 6. – С. 23-25.

78. Марченко, А. П. Двигуни внутрішнього згорання [Текст] / А. П. Марченко. – Харків : Прапор, 2004. – Т. 1. – 364 с.

79. Лыу, До Дык. Построение моделей для управления оптимальным режимом работы судового комплекса [Текст] / До Дык Лыу, Май Ван Чинь / Двигателестроение. – 2007. – № 1. – С. 39-40.

80. Агафонов, А. Н. Экспериментальные исследования работы ДВС с усовершенствованной системой воздухообеспечения [Текст] / А. Н. Агафонов, И. В. Слесаренко, В. Н. Груздь / Двигателестроение. – 2007. – № 2. – С. 11-16.

81. Борисенко, А. Н. Математическое моделирование дизель-генератора как объекта регулирования скорости с учетом случайного характера ее девиации, измерения фаз топливоподачи и дополнительного воздухообеспечения [Текст] / А. Н. Борисенко, С. А. Литвиненко, Е. В. Халанская, А. В. Гусельников // Вестник Науч.-тех. ун-та ХПИ. Тематич. вып. Информатика и моделирование. – Харьков : НТУ ХПИ. – 2010. – № 21. – С. 4-11.

82. Погребняк, В. В. Разработка и исследование устройств для дополнительного разгона агрегатов наддува в переходном процессе тепловозных дизелей и автоматизированных дизель-генераторов : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 [Текст] / В. В. Погребняк. – Харьков, 1971. – 241 с.

83. Копылов, И. П. Электромеханические преобразователи энергии [Текст] / И. П. Копылов. – М. : Энергия, 1973. – 400 с.

84. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины [Текст] : в 2 т. / А. В. Иванов-Смоленский. – Т. 1. – М. : ИД МЭИ, 2006. – 650 с.

85. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока [Текст] / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2007. – 350 с.

86. Груздев, И. А. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах. Методы исследования переходных процессов [Текст] / И. А. Груздев [и др.] ; под ред. Н. И. Соколова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Энергия, 1970. – 400 с.

87. Вагин, Г. Я. Математическая модель явнополюсного синхронного генератора мини-ТЭЦ [Электронный ресурс] / Г. Я. Вагин, Е. Б. Солнцев, А. М. Мамонов, А. А. Петров // Инженерный вестник Дона – № 2. – ч. 2. – 2015. – 15 с. [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/2950](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/2950).

88. Бурков, А. Ф. Электрохимические источники энергии для судовых комбинированных гребных электрических установок [Текст] / А. Ф. Бурков, В. В. Миханошин, В. Х. Нгуен // Тенденции развития науки и образования. – 2021. – № 70. – Ч. 2. – С. 97-100.

89. Миханошин, В. В. Определение автономности плавания дизель-аккумуляторного судна / В. В. Миханошин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск : Новосиб. гос. акад. водн. тр-та. – 2011. – № 1. – С. 360-363.

90. Таганова, А. А. Свинцовые аккумуляторные батареи: стационарные, тяговые, для портативной аппаратуры : Справочник [Текст] / А. А. Таганова, А. Е. Семенов. – СПб. : ХИМИЗДАТ, 2004. – 120 с.

91. Коровин, Н. В. Электрохимическая энергетика [Текст] / Н. В. Коровин. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 264 с.

92. Хрусталева, Д. А. Аккумуляторы [Текст] / Д. А. Хрусталева. – М. : Изумруд, 2003. – 244 с.

93. Каневский, Л. С. Деградация литий-ионного аккумулятора и методы борьбы с ней [Текст] / Л. С. Каневский, В. С. Дубасова // Электрохимия. – 2005. – Т. 41. – № 1. – С. 3-19.

94. Брянцев, А. А. Алгоритм определения параметров модели Шеферда для построения имитатора литий-ионного аккумулятора [Текст] / А. А. Брянцев, В. Г. Букреев // Докл. Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. Электротехника. – 2019. – Т. 22. – № 1. – С. 95-99.

95. He, H. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach [Текст] / H. He, R. Xiong, J Fan // Energies. – 2011. – No. 4. – P. 582-598.

96. He, H. Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electric vehicles [Текст] / H. He, R. Xiong, H. Guo, S. Li // Energies. – 2012. – P. 113-121.

97. Hongwen, H. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach [Текст] / H. Hongwen, X. Rui, F. Jinxin // Energies. – 2011. – No 4. – P. 582-598.

98. Безручко, К. В. Разработка и апробация математической модели для прогнозирования характеристик электрохимических аккумуляторов энергоустановок ракетно-космических объектов [Текст] / К. В. Безручко [и др.] // Вест. Моск. авиац. ин-та. – 2013. – Т. 20. – № 1. – С. 38-49.

99. Галушкин, Д. Н. Разряд щелочных аккумуляторов [Текст] / Д. Н. Галушкин, Н. Е. Галушкин // Электрохимическая энергетика. – 2007. – Т. 7. – № 2. – С. 99-102.

100. Хандорин, М. М. Экспериментальная проверка алгоритма оценки остаточной емкости литий-ионной аккумуляторной батареи для применения на космическом аппарате [Текст] / М. М. Хандорин, В. Г. Букреев // Авиакосмическое приборостроение. – 2017. – № 3. – С. 45-55.

101. Завьялов, Ю. С. Методы сплайн-функций [Текст] / Ю. С. Завьялов, Б. И. Квасов, В. Л. Мирошниченко. – М. : Наука, 1980. – 376 с.

102. Роджерс, Д. Математические основы машинной графики [Текст] / Д. Роджерс, Дж. Адамс. – М. : Мир, 2001. – 604 с.

103. Хандорин, М. М. Оценка остаточной емкости литий-ионного аккумулятора в режиме реального времени [Текст] / М. М. Хандорин, В. Г. Букреев // Электрохимическая энергетика. – 2014. – Т. 14. – № 2. – С. 78-84.

104. Saw, L. H. Electro-thermal analysis of Lithium Iron Phosphate battery for electric vehicles [Текст] / L. H. Saw, K. Somasundaram, Y. Ye [et al.] // Journal of Power Sources. – Vol. 249. – P. 231–238.

105. Zhang, H. On-line PHEV Battery Hysteresis Effect Dynamics Modeling [Текст] / H. Zhang, M. Chow // IECON 2010. 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. – 2010. – P. 1838-1843.

106. Попков, О. З. Основы преобразовательной техники [Текст] / О. З. Попков. – Изд. 2-е, стереотип. – М. : Издательский дом МЭИ, 2007. – 200 с.

107. Бурков, А.Ф. Потери в преобразовательных устройствах и их влияние на качество электрической энергии / А. Ф. Бурков, Ван Ха Нгуен, В. В Миханошин // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона». – Хабаровск : ФГБОУ ВО ДВГУПС. – № 4 (25). – 2020. – С.44-49.

108. Миханошин, В. В. Математические модели импульсного преобразователя судовой комбинированной энергетической установки / В. В. Миханошин // Сб. науч. ст. «Эксплуатация морского транспорта». – СПб. : ГМА им. адм. С. О. Макарова. – № 3 (65). – 2011. – С.71-73.

109. Шубенко, В. А. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением [Текст] / В. А. Шубенко, И. Я. Браславский. – М. : Энергия, 1972. – 200 с.

110. Глазенко, Т. А. Математическая модель асинхронного электропривода с маловентильным непосредственным преобразователем частоты [Текст] / Т. А. Глазенко, В. И. Хрисанов, А. А. Усольцев // Известия вузов. Электромеханика. – 1983. – № 4. – С. 34-40.

111. Chattopadhyay, A. K. State-variable steady analysis of a phase-controlled cyclo-converter induction motor drive [Текст] / A. K. Chattopadhyay, J. T. Rao // IEEE Trans. on Ind. Appl. – 1979. – Vol. 15. – № 3. – P. 313-319.



112. Сипайлов, Г. А. Математическое моделирование электрических машин [Текст] / Г. А. Сипайлов, А. В. Лоос. – М. : Высшая школа, 1980. – 176 с.

113. Копылов, И. П. Расчет на ЦВМ характеристик асинхронных машин [Текст] / И. П. Копылов, О. П. Щедрин. – М. : Энергия, 1973. – 120 с.

114. Беляев, В. П. О рациональной записи уравнений асинхронной машины при управлении от циклоконвертора [Текст] / В. П. Беляев, В. Г. Сидоров, Б. И. Фираго // Научные и прикладные проблемы энергетики. – Минск : Высшая школа, 1981. – № 9. – С. 142-146.

115. Иванов, В. В. Методы вычислений на ЭВМ : Справочное пособие [Текст] / В. В. Иванов. – Киев : Наукова думка, 1986. – 584 с.

116. Мустафа, Г. М. Система программ для моделирования устройств преобразовательной техники [Текст] / Г. М. Мустафа, И. М. Шаранов, В. Н. Тингаев // Электротехника. – 1978. – № 6. – С. 6-10.

117. Фильц, Р. В. Параметры многофазной насыщенной неявнополюсной машины в фазных координатах [Текст] / Р. В. Фильц, В. И. Чабан, Л. А. Билый // Известия вузов. Электромеханика. – 1974. – № 7. – С. 18-23.

118. Корицкий, Ю. В. Справочник по электротехническим материалам [Текст] : в 3 т./ под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – Изд. 3-е, перераб., Т. 3. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – 728 с.

119. Петров, И. И. Специальные режимы работы асинхронного электропривода [Текст] / И. И. Петров, А. М. Мейстель. – М. : Энергия, 1968. – 264 с.

120. Бурков, А. Ф. Гребные электрические установки: обзор, анализ, перспективы развития: мон. / А. Ф. Бурков, В. В. Миханошин. – М. : ИНФРА-М, 2022. – 199 с. – (Науч. мысль.). DOI 10.12737 / 1832490.

121. Вахламов, В. К. Конструкция и элементы расчета [Текст] / В. К. Вахламов. – М. : Издательский центр «Академия», 2006. – 480 с.

122. Миханошин, В. В. Обеспечение стационарной работы главной дизельной установки в условиях переменной нагрузки / В. В. Миханошин [Текст] // Сб. докл. 60-й междунар. молодеж. науч.-технич. конф. «Молодежь. Наука. Ин-

новации». – Владивосток : Мор. гос. ун-т им. адм. Г. И. Невельского. – 2012. – Т.1. – С. 68-71.

123. Burkov, A. F., Mikhanoshin V. V., Van Kha Nguen. Energy Losses in Electrical Networks. Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). – Pp. 384-393. Челябинск, 2022. Изд-во : Springer. DOI : 10.1007/978-3-030-85230-6\_45.

124. Методика расчета выбросов вредных веществ в атмосферу в морских портах [Текст] : РД 31.06.06-86. – Л. : Лен. филиал «ЛЕНМОРНИИПРОЕКТ». – 1986. – 30 с.

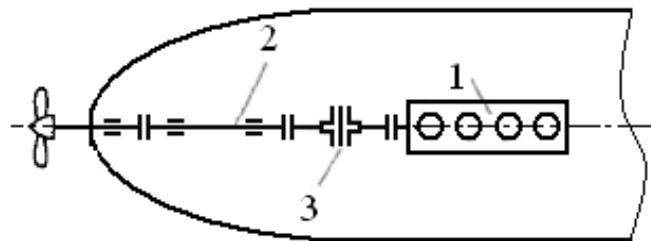
125. Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от эксплуатируемых речных судов [Текст] / – Л. : Мин-во реч. флота РСФСР. – 1987. – 18 с.

## П.1.1 Системы главных судовых передаточных устройств

### П.1.1.1 Пропульсивные установки судов с «жесткими» механическими связями главных двигателей и гребных винтов

ПУ судов с «жесткими» связями ГД и ГВ включают прямые (непосредственные) или механические (редукторные) главные передачи и получили широкое распространение в современном мировом судостроении [7, 8, 9 и др.].

Прямые (непосредственные) главные судовые передачи используются, как правило, при наличии малооборотных ГД (дизелей). Для передачи мощности ГД движителям при прямых передачах используются непосредственные связи ГД с валопроводами, на других концах которых установлены ГВ. При прямых (непосредственных) передачах частота вращения валов ГД совпадает с частотой вращения ГВ ( $i_n = 1$ ) – рисунок П.1.1 [9].



1 – тихоходный ГД; 2 – линия вала (валопровод); 3 – главный упорный подшипник

Рисунок П.1.1 – Судовая ПУ, включающая прямую (непосредственную) передачу

В этих случаях связь вращающих моментов ГД  $M_{ГД}$  и на движителях (ГВ)  $M_{ГВ}$  выражается следующим образом:

$$M_{ГД} \eta_{enj} = M_{ГВ} \quad (\text{П.1.1})$$

Характерными особенностями ПУ, включающих непосредственные передачи и относящимися к их достоинствам, относятся: конструктивная простота и повышенная надежность передач; высокие значения КПД  $\eta_{en}$ , обусловленные преимущественно сравнительно небольшими потерями в подшипниках валопрово-

дов; приемлемая экономичность ГД (для дизелей определяемая возможностью использования высоковязких сравнительно дешевых сортов топлива, относительно небольшим расходом смазочных масел ( $0,8 \dots 1,0$  г/(кВт·ч)) [9], низкими эксплуатационными расходами, высоким ресурсом).

При этом вращающий момент на ступице ГВ  $M_{ГВ}$  и момент на валу ГД  $M_{ГД}$  примерно равны между собой. Передача упоров движителей (ГВ) на корпус судна осуществляется посредством валопроводов через главные упорные подшипники (для  $j = 1$  – рисунок П.1.1).

К основным недостаткам судовых ПУ, включающих прямые передачи, относятся ограниченные возможности регулирования частоты вращения ГВ  $n_{ГВj}$  и скорости судов  $v_c$ , которые осуществляются изменением частоты  $n_{ГДj}$  ГД при регулировании подачи топлива. Отклонения от оптимальных значений частот вращения винтов  $n_{ГВj}$  снижают значения пропульсивных КПД гребных энергоустановок. Сложность или невозможность привода вспомогательных механизмов (валогенераторов (ВГ), насосов и др.) от ГД также является недостатком ПУ с прямыми передачами.

Прямые (непосредственные) передачи (рисунок П.1.1) используются при установке в составе ПУ реверсивных ГД, обеспечивающих изменение направлений хода судов, которые имеют относительно высокие массо-размерные характеристики.

В состав прямых передач ПУ в ряде случаев входят жесткие или упругие муфты (разобщительные или реверсивные, исключая необходимость наличия реверсивных ГД).

С помощью жестких фланцевых муфт обычно соединяются с валопроводом относительно мощные крейцкопфные дизели. В многовальных установках иногда используют соединительно-разобщительные муфты, которые включаются и выключаются только при стоянке судов (без их активного движения).

Нередко фактические частоты вращения валов ГД  $n_{ГДj}$  (в первую очередь турбин), при которых достигается оптимальное соотношение между экономическими и массогабаритными показателями двигателей, и в целом энергетических установок, значительно превышают оптимальные частоты вращения ГВ  $n_{ГВj}$ . В

этих случаях для приемлемых соотношений частот  $n_{ГД}$  и  $n_{ГВ}$  в состав ПУ включаются главные судовые передачи, предназначенные для трансформации частот вращения  $n_{ГДi}$  и вращающих моментов  $M_{ГДi}$  ГД в частоты вращения  $n_{ГВj}$  и во вращающие моменты  $M_{ГВj}$  на ГВ. Связь мощностей ГД и движителей посредством вращающих моментов и частот вращения ( $M_{ГДj}$  и  $M_{ГВj}$ ,  $n_{ГДj}$  и  $n_{ГВj}$ , соответственно) может быть выражена на основании (1.1) следующим образом:

$$M_{ГДj} n_{ГДj} \eta_{nj} \eta_{внj} = M_{ГВj} n_{ГВj}. \quad (\text{П.1.2})$$

Такие научно-технические решения обеспечивают передачи вращающих моментов от источников (ГД) к приемникам с минимальными потерями, которые определяются преимущественно механическими потерями на трение в подшипниках и редукторах.

Несмотря на указанные недостатки, ПУ с «жесткими» механическими связями и ВФШ занимают доминирующее положение в транспортном флоте.

ПУ с ВФШ оборудованы, в частности: сухогрузы «Юный партизан» (Социалистическая Республика Румыния (СРР), 1975 г.), «Вавчуга» (Союз Советских Социалистических Республик (СССР), 1980 г.), «Волга» (СССР, 1988 г.); суда для перевозки навалочных грузов «Николай Вознесенский» (СССР, 1978 г.), «Харитон Греку» (СССР, 1986 г.), «Художник Моор» (Народная Республика Болгария (НРБ), 1986 г.); ролкеры «Капитан Смирнов» (СССР, 1980 г.), «Шестидесятилетие СССР» (СССР, 1986 г.); танкеры «Дмитрий Медведев» (СССР, 1983 г.), «Победа» (СССР, 1983 г.), «Новороссийск» (Греция, 1985 г.); рефрижераторы «Академик Вавилов» (Дания, 1986 г.), «Курск» (Польская Народная Республика (ПНР), 1986 г.), «Посъет» (Греция, 1989 г.); суда лихтеровозной системы «Алексей Косыгин» (СССР, 1988 г.); лесовозы и щеповозы «Павлин Виноградов» (ПНР, 1990 г.), «Капитан Гончаров» (Мальта, 1990 г.) и многие другие.

С целью расширения диапазонов использования основных рабочих характеристик ГД и улучшения маневренных свойств судов при наличии ПУ с «жесткими» механическими связями используются ВРШ.

Возможности дополнительных изменений нагрузок ГД путем воздействия на шаг ГВ расширяют область эксплуатационных режимов, улучшают использо-

вание мощностей и маневренные качества судов, компенсируя влияние внешних факторов на основные характеристики винтов, и исключают режимы работы ПУ в граничных областях («тяжелых» винтов), при которых ГД не способны развить номинальные мощности.

К основным недостаткам судовых ПУ с ВРШ, по сравнению с ПУ, включающими ВФШ, относится повышенная вероятность возникновения условий для перегрузок ГД.

ПК с ВРШ внедрены на: сухогрузах ««Росток» (Германская Демократическая Республика (ГДР), 1976 г.), «Стахановец Котов» (Финляндия, 1979 г.); ролкерах «Магнитогорск» (Финляндия, 1978 г.), «Композитор Кара Караев» (ГДР, 1986 г.), «Петр Машеров» (ПНР, 1986 г.); танкерах «Кубань» (СССР, 1980 г.), «Бауска» (Швеция, 1987 г.); судах лихтеровозной системы «Анатолий Железняков» (Италия, 1984 г.), «Борис Полевой» (Финляндия, 1984 г.), «Севморпуть» (СССР, 1988 г.); рефрижераторных судах типа «Георгий Агафонов» (Австрия, 1987 г.); ледоколах «Анатолий Колесниченко» (Финляндия, 1985 г.), «Норильск» (Финляндия, 1987 г.); лесовозах «Игорь Ильинский» (Испания, 1990 г.) и др.

### **П.1.1.2 Пропульсивные установки судов с электрическими передачами**

Известное распространение на судах отечественного и зарубежного флота получили ПК на основе ГЭУ благодаря ряду достоинств, связанных в основном с отсутствием жесткой связи между первичными двигателями (ПД) и судовыми движителями [10]. К основным положительным качествам ГЭУ в первую очередь относятся более широкие возможности: выбора параметров элементов ПУ (соотношения КПД и частоты вращения), близких к оптимальным значениям; применения относительно легких нереверсивных быстроходных ГД, так как реверсирование движителя осуществляется электрическим путем (при увеличении частоты вращения ГД их массо-размерные характеристики уменьшаются); унификации и стандартизации элементов установки.

Как правило, значения частот вращения ГД  $n_{ГД}$  и движителей (ГВ)  $n_{ГВ}$ , при которых отмечаются максимальные значения их КПД, не совпадают. При наличии

жесткой связи между ПД и двигателем приходится выбирать компромиссный вариант. В ГЭУ передаточное число регулируемое ( $i_n = \text{var}$ ) и может быть установлено таким, что все элементы установки могут работать с КПД, близкими к наилучшим. Возможности относительно свободного размещения элементов ГЭУ на судне приводят к увеличению полезного объема и сокращению линии гребного вала примерно до 25 %. Бóльшее сокращение линий гребных валов возможно при использовании главных винторулевых колонок (ВРК) («Aquamaster», «Azipod» [11], «Schottel» и др.).

Суда с ГЭУ обладают более высокими маневренными качествами, обусловленными меньшим временем перехода с одного режима на другой в сочетании с дистанционным управлением работой всей пропульсивной установки. Наибольшей маневренностью обладают дизель-электроходы с ГЭУ постоянного тока («Амгуэма» (СССР, 1962 г.), «Сахалин» (СССР, 1973 г.), «Ермак» (Финляндия, 1974 г.) и др.).

Практически все ледоколы, а также суда активного ледового плавания и большинство буксиров, оборудованные ГЭУ, имеют высокие тяговые характеристики и возможность движения во льдах.

К достоинствам судов с ГЭУ относится также хорошая приспособляемость к условиям плавания во льдах, при волнениях и буксировках, позволяющая использовать ГД без перегрузок.

ГЭУ судов обладают повышенной надежностью и живучестью, связанной с дроблением всей установки на отдельные агрегаты. Например, у теплохода с одним ГД есть только один вариант работы. На электроходе с четырьмя дизель-генераторными агрегатами в зависимости от способа коммутации цепей главного тока число вариантов режимов работы может быть от 7 до 33 [11].

Энергоэффективность электроходов повышается при работе ГЭУ в частичных (долевых) режимах. В этих случаях оставшиеся в работе генераторные агрегаты будут работать в режимах, близких к номинальным с оптимальными эксплуатационными и экономическими показателями. Кроме того, у электроходов широкие возможности отбора мощности от главных генераторов (ГГ) ГЭУ для пита-

ния общесудовых потребителей электрической энергии (ЭЭ). Применение на судне-электроходе единой электроэнергетической системы (ЭЭС) позволяет в среднем сократить расход топлива на 25 % и настолько же сократить суммарную мощность генераторных агрегатов [11]. Наиболее эффективно отбор мощности осуществляется на электроходах переменного тока.

Возможность применения агрегатного ремонта элементов ГЭУ в заводских условиях повышает качество ремонтов, сокращает их сроки, увеличивая при этом навигационное время.

Суда с ГЭУ обладают улучшенными экологическими показателями, обеспечивая меньшее загрязнение окружающей среды. На дизель-электроходах ГД работают, как правило, в оптимальных режимах, когда происходит наиболее полное сгорание топлива. При этом выбросы в атмосферу вредных веществ можно минимизировать. В настоящее время самыми экономичными и экологичными судовыми энергетическими установками являются дизель-электрические гребные установки на среднеоборотных дизелях.

Кроме того, имеющее место использование элементов ГЭУ массовых серий способствует значительному снижению их стоимости.

Использование ГЭУ с нетрадиционными источниками ЭЭ (аккумуляторами различного типа, электрохимическими генераторами, солнечными элементами и т. п.) позволяет расширить перечень судов-электроходов, а также улучшить экологическую обстановку в тех местах, где такие электроходы будут применяться.

К основным и наиболее существенным недостаткам применения электродвижения на судах относится пониженная экономичность энергоустановки при движении судов полным ходом, что связано с необходимостью двойного преобразования энергии (механической в электрическую в генераторных агрегатах и электрической в механическую в гребных электродвигателях (ГЭД)). Поэтому электродвижение нецелесообразно, как правило, для судов, предназначенных для эксплуатации с преобладанием режимов полного хода.

К основным недостатком судов-электроходов относится также повышенная первоначальная (строительная) стоимость всей энергетической установки, обу-



словленная практически тройным преобразованием установленной мощности (ГД, ГГ и ГЭД).

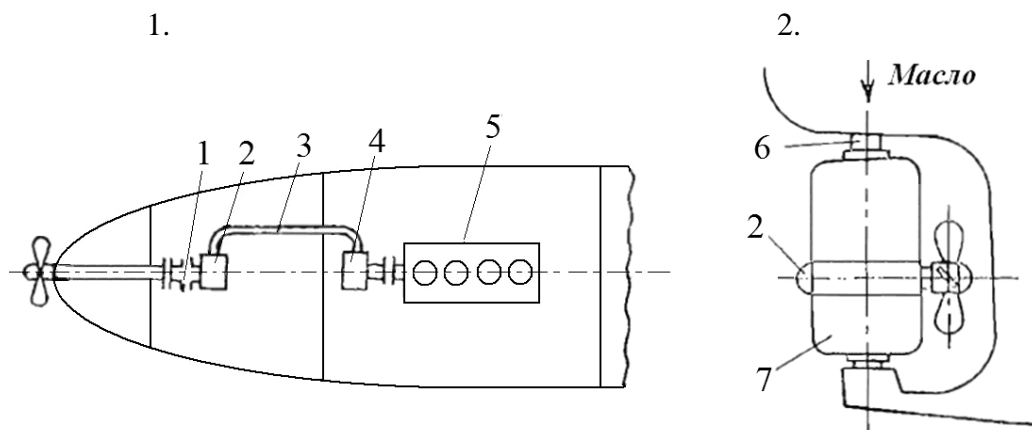
Однако при качественном научно-обоснованном проектировании всей судовой энергетической установки и квалифицированных условиях эксплуатации (рациональном учете районов и условий плавания судна и др.) можно добиться того, что достоинства судна-электрохода будут превалировать над его недостатками.

В настоящее время электродвижение получило определенное устойчивое применение на морских и речных судах, к которым в первую очередь относятся ледоколы и суда активного ледового плавания, буксиры, паромы, пассажирские круизные суда, плавзаводы, рефрижераторы, кабелеукладчики, крановые суда, буровые суда, а также многочисленные суда технического флота.

### П.1.1.3 Судовые пропульсивные установки, включающие гидравлические и комбинированные передачи

Одной из основных разновидностей гидравлических передач, используемых в судовых ПУ, являются гидростатические передачи, в которых используется энергия давления потока жидкости.

Пример главной гидростатической передачи представлен на рисунке П.1.2, за основу которого принят рисунок 4.24, приведенный в [9].



1 – объемная передача с независимым гребным гидродвигателем; 2 – передача с гребным гидродвигателем, расположенным в ВРК

Рисунок П.1.2 – Судовые ПУ с главными гидростатическими передачами

Представленная на рисунке П.1.2.1 ПУ включает две группы соединенных между собой магистралью 3 (гибкими трубопроводами) высокого давления компонентов. В первую группу входит ГВ, валопровод, упорный подшипник 1, и гидродвигатель 2. Вторую группу составляют гидронасос 4 и ГД 5.

ГД 5 (рисунок П.1.2.1) приводит в действие гидронасос 4, который под высоким давлением (10...20 МПа) подает рабочую жидкость (минеральное масло) по магистрали 3 в гидродвигатель 2, вращающий ГВ судна [9].

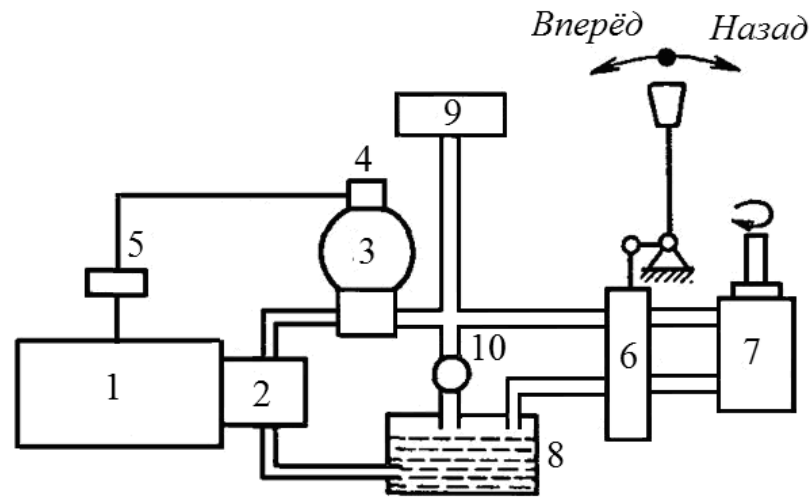
Использование гибких трубопроводов высокого давления упрощает конструкцию энергоустановок (отпадает необходимость применения зубчатых передач, шарниров, излишних механических осей). Обе группы агрегатов могут быть расположены более компактно независимо друг от друга.

Мощности таких главных приводов определяются объемами гидронасосов и гидродвигателей. Насосы и гидродвигатели, как правило, являются односторонними обратимыми поршневыми механизмами с объемным регулированием частоты вращения движителей путем изменения количества подаваемой рабочей среды к гидродвигателям.

На рисунке П.1.2.2 представлено размещение гидродвигателя 2 в винторулевой колонке. Рабочая среда в этих случаях подводится к гидродвигателю через каналы в баллере 6 руля 7. Изменение передаточного отношения в гидростатическом главном приводе ( $i_n = \text{var}$ ) ПУ бесступенчатое. Его реверсирование и гидравлические блокировки производятся относительно быстро и просто.

По своим основным характеристикам гидростатические передачи аналогичны электрическим передачам на постоянном токе, однако имеют преимущества по массе и габаритам. КПД гидростатических передач составляют ориентировочно 0,83...0,88 и незначительно зависят от изменения нагрузок [9].

В гидростатических передачах ПУ судов, работающих с частыми маневренными режимами, возможно и целесообразно использование гидроаккумуляторов высокого давления, которые служат буферными накопителями энергии. Пример гидростатического привода с аккумулятором давления (накопителем энергии) представлен на рисунке П.1.3.



1 – приводной ГД; 2 – гидронасос; 3 – гидроаккумулятор; 4 – датчик давления; 5 – электронный регулятор; 6 – центральное управляющее устройство; 7 – гидродвигатель; 8 – масляный бак; 9 – привод дополнительного гидрооборудования; 10 – редукционный клапан

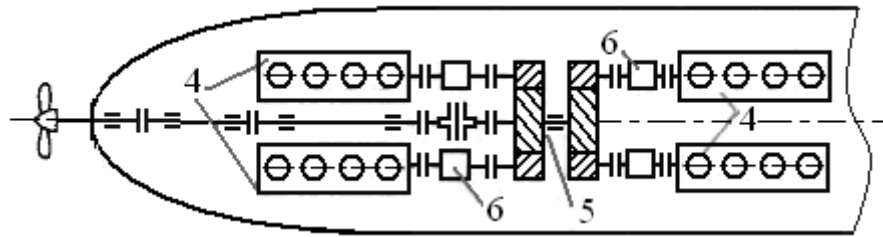
Рисунок П.1.3 – Схема гидростатического привода с аккумулятором давления [12]

Приводимый двигателем 1 гидронасос 2 постоянной производительности с неизменным объемом подает рабочую среду (масло) в гидроаккумулятор 3 – рисунок П.1.3. При заполненном аккумуляторе датчик давления 4 подает импульс на электронный регулятор 5 (команду на остановку ГД). Из аккумулятора 3 масло под давлением подается через центральное управляющее устройство 6 к гидродвигателю 7, из которого перепускается в масляный бак 8 и вновь забирается насосом.

Характерной особенностью гидроаккумуляторов является их ограниченная емкость. Если аккумулятор заряжен, то он больше не может накапливать энергию. Ее избыток в рассматриваемом случае гидростатического привода (рисунок П.1.3) ликвидируется применением редукционного клапана 10, который при наполненном гидроаккумуляторе 3 перепускает масло в бак 8.

Основным недостатком гидростатических главных передач (трансмиссий) являются относительно невысокие (по сравнению с механическими передачами) значения КПД.

С целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных показателей ПУ судов в соответствии с их назначением используются сочетания типов передач (комбинированные передачи) – рисунок П.1.4 [9].



4 – средне- или высокооборотные главные дизельные двигатели; 5 – редукторы; 6 – гидравлические муфты

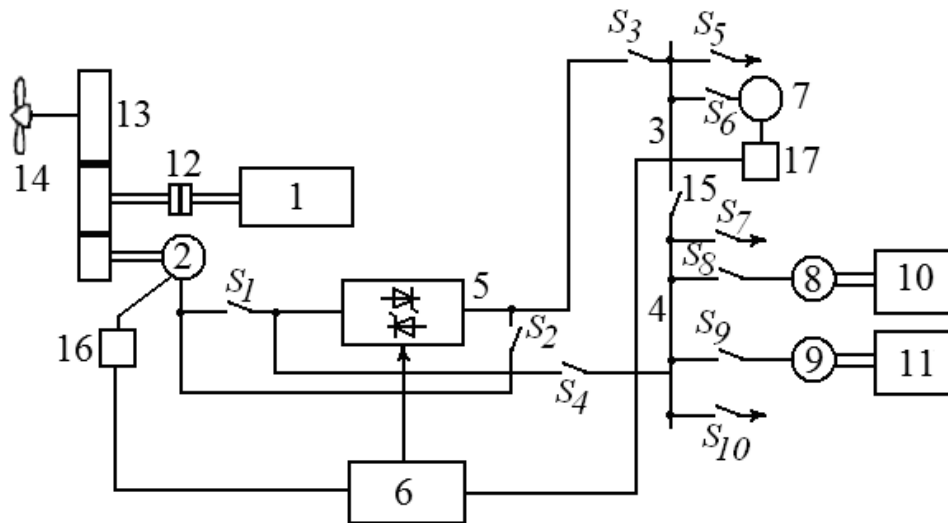
Рисунок П.1.4 – Вариант схемы комбинированной передачи вращающего момента от ГД на ГВ

Для повышения экономической эффективности судовых ПК в ряде научно обоснованных технических решений к ПУ подключаются ВГ, стоимость вырабатываемой ЭЭ которыми ниже стоимости ЭЭ, вырабатываемой судовыми дизель-генераторными агрегатами, поскольку топливо главных (первичных) дизельных двигателей (мазут) в несколько раз ниже стоимости дизельного топлива общесудовых дизель-генераторов (ДГ).

Относительно дешевая судовая ЭЭ, вырабатываемая с помощью валогенераторных установок (ВГУ), по сравнению с ДГ, используется судовыми потребителями в ходовых режимах.

К наиболее перспективным некоторое время относилась схема судовой энергетической установки (СЭУ) с ВГУ, включающая полупроводниковые преобразователи (ПП) частоты [13]. В процессе эксплуатации судов с такими энергоустановками выявились их следующие основные недостатки: пониженная надежность судовой энергетической установки из-за невозможности использования энергии вспомогательных генераторов для движения судна в случае выхода из строя главного теплового двигателя; отсутствие возможности использования дополнительной мощности вспомогательных генераторов, необходимой для движения судна в экстремальных условиях; необходимость для функционирования ряда схем ВГУ с ПП частоты работы вспомогательных генераторов при отборе мощности от ВГ, что приводит к дополнительному расходу топлива.

На рисунке П.1.5 представлена схема СЭУ, включающая ВГУ, в которой частично устранены вышеперечисленные недостатки.



1 – ГД; 2 – ВГ; 3, 4 – шины судовых потребителей ЭЭ; 5 – силовой модуль ПП частоты; 6 – система управления ПП частоты; 7 – синхронный компенсатор; 8, 9 – вспомогательные генераторы; 10, 11 – вспомогательные приводные двигатели; 12 – муфта; 13 – главная судовая передача (редуктор); 14 – ГВ; 15 – разъединитель; 16, 17 – датчики частоты и фазы;  $S_1 \dots S_{11}$  – автоматические выключатели

Рисунок П.1.5 – Схема СЭУ с ВГУ, включающая ПП частоты [13]

В качестве синхронных компенсаторов (СК) могут использоваться синхронные генераторы (СГ) общесудовых электрических станций (ЭС). При этом между вспомогательными приводными двигателями 10, 11 и вспомогательными генераторами 8, 9 (рисунок П.1.5) устанавливаются разъединительные муфты, а генераторы снабжаются дополнительно датчиками частоты и фазы.

В схеме с обратимой ВГУ (рисунок П.1.5) возможно использование инверторных или непосредственных ПП частоты. Датчики частоты и фазы могут быть использованы в качестве регистраторов положения ротора и напряжения статорных обмоток.

В ходовом режиме ВГ 2 (рисунок П.1.5) приводится во вращение двигателем ГД 1 посредством сообщенной муфты 12 через редуктор 13. При частоте вращения ГД  $n_d$  выше нижней эксплуатационной включаются автоматические выключатели (АВ)  $S_1$ ,  $S_3$ , устанавливается заданная величина напряжения ПП частоты и автоматически вводится в работу ВГ 2. Включается АВ  $S_6$  и напряжение ВГ 2 через силовой модуль (СМ) ПП частоты 5 подается на СК 7. Осуществляется плавный пуск компенсатора СК 7, работающего в режиме вентильного двигателя.

Коммутация токов тиристоры модуля СМ 5 ПП частоты при низких значениях частот осуществляется напряжением  $U_{вг}$  ВГ 2, а при высоких – напряжением  $U_{ск}$  СК 7. При достижении СК 7 номинальной частоты вращения  $n_{скн}$  и установке номинальных значений величин напряжения  $U_{инн}$  и частоты  $f_{инн}$  на шинах 3 посредством АВ  $S_5$  подключаются судовые потребители ЭЭ. Если энергии ВГ достаточно для питания судовых электропотребителей, то вспомогательные генераторы 8 и 9 отключаются от шин 4. При этом вспомогательные приводные двигатели 10 и 11 не работают, а разъединитель 15 замкнут, электрически соединяя шины 3 и 4. Таким образом, отбор мощности ВГ через ПП частоты осуществляется без работы вспомогательных генераторов, исключая расход топлива, обусловленный работой вспомогательных приводных двигателей 10 и 11.

В схеме (рисунок П.1.5) предусмотрена как параллельная работа ВГ 2 и вспомогательных генераторов 8 и 9, так и автономная. Напряжение и частота на шинах 3, 4 поддерживаются постоянными ( $U_{инн} = \text{const}$ ;  $f_{инн} = \text{const}$ ) при изменяющейся частоте вращения ГД 1 ( $n_{ГД} = \text{var}$ ) и ГВ 17 ( $n_{ГВ} = \text{var}$ ), работающего с помощью системы управления (СУ) ПП частоты, датчиков частоты и фазы СК и системы возбуждения ВГ в режиме гидротурбины.

При возникновении аварийных ситуаций во время работы ГД 1 отключается от редуктора 13 соединительной муфтой 12, и необходимая мощность от вспомогательных генераторов 8 и 9 передается на ГВ 17 через СМ 5 ПП частоты посредством ВГ 2. При этом АВ  $S_2$  и  $S_4$  включены, а АВ  $S_1$  и  $S_3$  отключены. Управление частотой вращения ВГ осуществляется с помощью СУ ПП частоты и датчика частоты и фазы 16 ВГ. Коммутация токов тиристоры СМ 5 ПП частоты при низких частотах осуществляется напряжением вспомогательных генераторов 8 и 9, а при высоких – напряжением ВГ 2.

В экстремальных ситуациях (обеспечение максимального хода, заклинивание винта и др.) ВГ 2 работает совместно с ГД 1. В этом случае управление ПП частоты и ГД производится согласованно.

В общем случае работу судовых ВГУ можно условно разделить на пять основных режимов: статический, динамический, параллельная работа со вспомога-

тельными генераторами судовых ЭС, аварийный и работа ВГ в двигательных режимах на ГВ.

Частота вращения ГД  $n_{ГД}$  в различных режимах работы судов ориентировочно составляет 63, 80, 91, 100 и 103 % при мощности ГД 25, 59, 75, 100 и 110 %, что соответствует режимам работы судна от самого малого хода до самого полного [13]. Следовательно, при изменении режимов работы судов и их ГД возникают вопросы, связанные с выбором минимальных частот вращения ГВ и валов ГД, при которых будут обеспечены требуемые показатели качества вырабатываемой ЭЭ и необходимое количество отдаваемой в судовую сеть активной мощности.

Применение в схемах судовых ВГУ ПП частоты, коммутация вентилях которых при высоких частотах обеспечивает номинальную частоту сети за счет электродвижущей силы (ЭДС) вращения СК, практически снимает ограничения по минимальной частоте вращения ВГ (выходной частоте ВГ), требуемой для поддержания номинальной частоты тока в судовой сети.

Для того чтобы ВГУ обеспечивала поддержание номинального напряжения на шинах, необходим расчет магнитных цепей и систем возбуждения ВГ исходя из полной загрузки ВГУ при минимальной эксплуатационной частоте вращения ГВ (вала ГД). Это ведет к недоиспользованию ВГ по мощности при номинальных частотах вращения и как следствие – к завышению установленной мощности, массогабаритных и стоимостных показателей ВГУ.

Одним из способов уменьшения установленной мощности ВГ является запуск системой автоматического управления (САУ) СЭУ вспомогательного генератора при полном переднем ходе судна, однако при этом уменьшается экономический эффект от использования ВГУ по причине дополнительного расхода топлива вспомогательными ДГ.

Выбор минимальной эксплуатационной частоты вращения ГВ (вала ГД), при которой ВГУ будет полностью обеспечивать судно ЭЭ, производится с учетом следующих основных факторов: увеличения установленной мощности, стоимостных и массогабаритных показателей ВГ при снижении нижнего эксплуатационного предела частоты вращения ГВ (вала ГД); изменения эксплуатационных

расходов в случаях параллельной работы вспомогательных ДГ судовых ЭС и ВГУ при уменьшении частоты вращения ВГ ниже номинальной; предполагаемого соотношения времени работы судна со скоростями ниже номинальной и времени его эксплуатации с полной скоростью.

Частота на выходе ПП частоты не зависит от частоты тока ВГ. Для обеспечения постоянства напряжения при снижении оборотов на 50 % ВГ должен обладать возможностью форсировки возбуждения и порядка двух- трехкратной перегрузочной способностью в течение (5...10) с [13]. С целью обеспечения надежной работы ВГ в условиях резкого снижения оборотов и исключения возможности выпадения их из синхронизма САУ судовых ВГУ отключают второстепенные потребители ЭЭ, которые автоматически подключаются к сети после перевода нагрузки на вспомогательные генераторы.

Специфической функциональной особенностью судовых ВГУ является работа ВГ в режиме вентильного двигателя на ГВ, в частности при выходе из строя ГД. Мощность ВГ  $P_{ВГ}$  рассчитывается исходя из суммарной мощности судовых потребителей ЭЭ, работающих при активном движении судна. В среднем мощность  $P_{ВГ}$  составляет (10...15) % от мощности ГД [13], а мощность, передаваемая на ГВ при работе ВГ в двигательном режиме, отличается от мощности  $P_{ВГ}$  на величину КПД ВГ.

Скорость судна  $v_c$  при этом отличается от номинальной скорости  $v_{сн}$  и может быть определена по формуле [13]

$$v_c = \sqrt[3]{\frac{(0,10...0,15)N_{ГДе}}{N_{ГДе}}} v_{сн} = (0,46...0,53)v_{сн}, \quad (\text{П.1.3})$$

где  $N_{ГДе}$  – эффективная мощность на валу ГД.

Таким образом, использование ВГУ для движения судов при выходе из строя ГД ПУ позволит сохранить их ход со скоростью  $v_c$ , составляющей около 50 % от номинальной скорости  $v_{сн}$ . Необходимо отметить дополнительное уменьшение скорости движения судна  $v_c$ , обусловленное уменьшением численного значения КПД ГВ  $\eta_g$  при изменении частоты его вращения  $n_g$ .



При совместной работе ГД и ВГ на ГВ скорость движения судна  $v_c$  по отношению к номинальной скорости  $v_{сн}$  составит

$$v_c = \sqrt[3]{\frac{(1,1...1,15)N_{ГДе}}{N_{ГДе}}} = (1,03...1,05)v_{сн}, \quad (\text{П.1.4})$$

т. е. может быть увеличена на (3...5) %, сокращая время нахождения судов в рейсах, увеличивая при этом эффективность их работы.

К достоинствам применения ВГУ в составе ПУ для движения судов относится дополнительный экономический эффект, обусловленный отсутствием необходимости затрат на буксировку судов при выходе из строя ГД.

ПУ, включающие ВГ, использованы на сухогрузах типа «Астрахань II» (проект 121), судах контейнеровозах-навалочниках СКН (2660 – с ВФШ, 1700 – с ВРШ), лесовозах-пакетовозах проектов 15750 и 16540 – с ВРШ.

Несмотря на выявленные достоинства, рассмотренные ПУ не обеспечивают функционирование ГД при различных скоростных режимах движения судов с желаемыми технико-экономическими показателями в пределах поставленных задач.

### П.2.1 Использование ГЭУ на судах

По данным, приведенным в [16], в 1971 г. в отечественном флоте насчитывалось около 470 судов-электроходов, из которых более 365 были отечественной постройки. В Дальневосточном бассейне в это время эксплуатировалось около 160 электроходов различного функционального назначения (буксиры, ледокольно-транспортные суда, линейные и портовые ледоколы, транспортные и производственные рефрижераторы, суда технического флота и др.), т. е. бóльшая их часть, что дает основание сделать вывод о целесообразности обзора и анализа основных вариантов ГЭУ на примере судов-электроходов Дальневосточного бассейна.

В таблице П.2.1.1 согласно данным, приведенным в [16], представлены краткие обобщенные сведения о количестве электроходов, эксплуатируемых в Дальневосточном бассейне во второй половине двадцатого столетия.

Таблица П.2.1.1 – Краткие сведения о количестве электроходов в Дальневосточном бассейне с 1965 г. по 2000 г.

Принадлежность электроходов	Количество электроходов по времени эксплуатации				
	1965	1975	1985	1995	2000
1	2	3	4	5	6
Морской торговый флот	16	38	47	34	27
Рыбопромысловый флот	101	116	67	38	34
Вспомогательный и технический флот	18	42	56	40	39
Общее количество	135	196	170	112	100

Согласно данным, приведенным в таблице П.2.1.1, количество эксплуатируемых судов-электроходов на Дальнем Востоке в рассматриваемый временной пе-

риод изменялось от 16 до 47 единиц. Около 50 % из них составляли паромы различного функционального назначения (железнодорожные, автомобильно-пассажирские) пяти основных серий. Наибольшее число электроходов на Дальнем Востоке России эксплуатировалось в 70-х годах XX века.

Значительное устойчивое сокращение судов с электродвижением в Дальневосточном бассейне отмечено с 70-х годов XX века в рыбопромысловом флоте (со 116 единиц в 1975 году до 34 единиц в 2000 году).

Тенденция изменения числа электроходов в сторону уменьшения обусловлена двумя основными причинами – списанием устаревших судов, которые строились большими сериями в 60-х – 70-х годах XX века, и в связи с расширяющимся внедрением в качестве судовых движителей ВРШ.

Применение ВРШ снижает по сравнению с электродвижением строительную стоимость судов и расширяет возможности для создания относительно экономичных судовых единых ЭЭС (приложение П.1.1) с отбором мощностей от главных энергоустановок, предназначенных для питания общесудовых потребителей ЭЭ посредством использования навешенных генераторов (валогенераторов). Однако основные маневренные характеристики судовых ПК (гл. 1, п. 1.1) с ВРШ по сравнению с ПК, включающими ГЭУ, значительно снижаются (по данным, приведенным в [16], ориентировочно до двух раз).

В таблице П.2.1.2 приведены сведения об основных типах судов-электроходов, поступивших на Дальний Восток в 70-х годах XX века.

Таблица П.2.1.2 – Основные сведения о судах-электроходах, поступивших на Дальний Восток в 70-х годах XX века

№ п/п	Функциональное назначение, тип/судно	Страна, год постройки	Тип, род тока, мощность ГЭД, кВт	Водоизмещение, т
1	2	3	4	5
1	Плавающий кран «Богатырь» (проект 1520)	СССР, 1971	ДЭГУ, ≈, 1280	3170

## Продолжение таблицы П.2.1.2

1	2	3	4	5
2	Паром накатный пассажирский, тип «Сахалин» (проект 1809)	СССР, 1973	ДЭГУ, =, 10200	7914
3	Паром накатный пассажирский, тип «Техумарди» (проект 1876)	СССР, 1973	ДЭГУ, =, 590	1580
4	Ледокол, тип «Ермак» (проект Р-1039)	Финляндия, 1974	ДЭГУ, =, 26482	20247
5	Морской спасательный буксир, тип «Напористый» (проект 1454)	СССР, 1974	ДЭГУ, =, 1900	1670
6	Самоходный плавучий кран, тип СПК-1/16 («Ганц») (проект Д-9021 (721))	ВНР, 1976	ДЭГУ, ≈, 290	916
7	Судно-нефтемусоросборщик (проект 14630)	СССР, 1976	ДЭГУ, ≈, 200	209
8	Ледокол, тип «Капитан Сорокин» (проект 1101)	Финляндия, 1978	ДЭГУ, ≈, ≠, 16200	17280
9	Плавучий кран «Витязь» (проект 1600)	СССР, 1977	ДЭГУ, ≈, 2428	4220
10	Зверобойно-рыболовное судно, тип «Зверобой» (проект 422)	ПНР, 1977	ДЭГУ, =, 2427	2598

Примечание: в таблице П.2.1.2 (графа 3, строка 6) ВНР – Венгерская Народная Республика.

В 80-е годы XX века Дальневосточный бассейн пополнялся судами-электроходами различного функционального назначения и типов, основные из которых представлены в таблице П.2.1.2.

Таблица П.2.1.3 – Основные данные судов-электроходов Дальневосточного бассейна, вступивших в эксплуатацию в 80-х годах XX века

№ п/п	Функциональное назначение, тип/судно	Страна, год постройки	Тип, род тока, мощность ГЭД, кВт	Водоизмещение, т
1	2	3	4	5
1	Поисково-спасательное судно «Алагез» (проект 537)	СССР, 1980	ДЭГУ, $\approx$ ≠, 18608	14300
2	Речной ледокол, тип «Капитан Евдокимов» (проект 1191)	Финляндия, 1983	ДЭГУ, $\approx$ ≠, 3800	2341
3	Паром накатный пассажирский, тип «Вохилайд» (проект 10380)	СССР, 1983	ДЭГУ, $\approx$ ≠, 1980	1010
4	Буровое судно, тип «Валентин Шашин» (проект RR22)	Финляндия, 1983	ДЭГУ, $\approx$ , 5516	16866
5	Малое кабельное судно, тип «Бирюса» (проект 1275)	Финляндия, 1986	ДЭГУ, $\approx$ ≠, 1603	2400
6	Килекторное судно (проект 141)	ГДР, 1986	ДЭГУ, $\approx$ ≠, 2207	6200
7	Ледокольно-транспортное судно-снабженец, тип «Витус Беринг» (проект 10620)	СССР, 1986	ДЭГУ, $\approx$ ≠, 11460	20200
8	Самоходный плавучий кран (проект Д-9040)	ВНР, 1986	ДЭГУ, $\approx$ , 290	1174

К 90-м годам XX века отечественный флот занимал одно из ведущих мест в мире по числу судов различного назначения, оборудованных ГЭУ. В это время в

стране эксплуатировалось около 600 различных по функциональному назначению судов с электродвижением более 70 типов. Из них 44 типа электроходов было построено отечественной судостроительной промышленностью, а 32 типа – за рубежом. Практически все отечественные электроходы, за исключением семи атомных турбоэлектроходов, были оборудованы ДЭГУ, отличающимися своим многообразием. Дальневосточный бассейн в это время насчитывал около 150 судов с электродвижением, а к началу XXI века – ориентировочно 100 единиц 25 типов [16].

В мировом флоте суда-электроходы составляют около 2 % от общего числа эксплуатируемых судов, в отечественном флоте – примерно (6...7) %, а на Дальнем Востоке России электроходы в разное время составляли до 15 % от общего числа находящихся в эксплуатации судов.

Основным показателем, характеризующим эффективность функционирования судов с электродвижением, является их техническая эксплуатация (ТЭ) – деятельность экипажей судов и сотрудников береговых транспортных инфраструктур, обеспечивающая безаварийное и эффективное использование судов по назначению с проектными или заданными технико-эксплуатационными показателями при соблюдении требований действующего законодательства Российской Федерации и международных ратифицированных договоров. ТЭ судов направлена в первую очередь на обеспечение безопасности мореплавания, сохранение человеческого здоровья, предотвращение загрязнения окружающей среды и обеспечение сохранности перевозимых грузов.

### **П.2.2 Общие характеристики и характерные особенности ГЭУ**

В настоящее время в качестве ПД ГЭУ на подавляющем большинстве отечественных электроходов (до 98 % [16]) применяются дизели, а в Дальневосточном бассейне 100 % электроходов оснащены первичными дизельными двигателями. На электроходах отечественной постройки установлены, как правило, среднеоборотные тяжелые транспортные двигатели типа Д (5Д50, 3Д100 и 14Д100), коленчатые валы которых жестко соединены с якорями ГГ.

Судовые двигатели 5Д50 мощностью 2000 л. с. (частота вращения 740 об/мин) являются разновидностью базовой модели Д50 [42] и установлены, например, на китобойных судах типа «Мирный» проекта 393 и морских буксирах типа МБ проекта 733. Двигатели ЗД100 (мощность генераторов 1250 кВт, частота вращения 810 об/мин) [43] используются в частности на ледоколах типа «Василий Прончищев» проекта 97А. Модернизированные двигатели типа 14Д100 мощностью по 2600 л. с. (единичная мощность генераторов 1800 кВт, частота вращения 810 об/мин) [18] установлены на накатных пассажирских паромах типа «Сахалин» проекта 1809 и др.

На электроходах зарубежной постройки, эксплуатируемых на Дальнем Востоке, нашли применение преимущественно среднеоборотные дизельные двигатели. На судах финской постройки широкое применение нашли ПД (дизели) «Вяртсиля-Зульцер». Например, на ледоколах типа «Москва» установлены дизели 9МН-51 мощностью по 3250 л. с. (частота вращения 330 об/мин).

Применение высокооборотных дизельных двигателей позволяет значительно уменьшить их массо-размерные показатели (более чем на 40 %). Однако, моторесурс высокооборотных дизелей ниже, чем среднеоборотных, а шумность в МО судов с высокооборотными дизельными двигателями, используемыми в качестве ПД, до 20 % выше, чем на судах со среднеоборотными дизелями [16].

В ГЭУ судовых ПУ используются ГГ постоянного или переменного тока.

На основных эксплуатационных типах и сериях судов-электроходов Дальневосточного бассейна применяются в большинстве случаев генераторы постоянного тока независимого возбуждения одноякорного исполнения. Исключение составляют в частности портовые ледоколы, на которых в качестве ГГ используются двухъякорные генераторы постоянного тока. Единичная мощность ГГ постоянного тока составляет от 200 кВт у накатных пассажирских паромов проекта 618М до 3080 кВт у ледоколов типа «Ермак» проекта Р-1039. Максимально допустимые значения мощностей генераторов постоянного тока ограничиваются их коммутационной способностью. Наименьшее значение напряжения на один якорь, составляющее 220 В, имеют ГГ накатных пассажирских паромов проекта 618М, а наибольшее (800 В) – ГГ ледоколов типа «Ермак». В общем случае величины

напряжений нормируются РМРС и классификационными обществами других стран. Частота вращения ГГ постоянного тока большинства судов-электроходов Дальневосточного бассейна лежит в пределах от 330 об/мин (у ледоколов типа «Москва» и др.) до 810 об/мин (у паромов накатных пассажирских типа «Сахалин» проекта 1809 и др.).

Согласно данным, приведенным в [16], относительная масса на единицу мощности у отечественных ГГ почти в три раза меньше, чем у зарубежных генераторов в основном за счет использования по сравнению с зарубежными генераторами повышенного до 25 % значения напряжения, большей около 2,2 раз частоты вращения. Относительная масса ГГ постоянного тока ГЭУ основных дальневосточных ледокольных судов составляет от  $5,7 \cdot 10^{-3}$  кг/Вт у транспортных ледокольных судов типа «Амгуэма» (проект 550) до  $11,2 \cdot 10^{-3}$  кг/Вт у ледоколов типа «Москва». На судах-электроходах зарубежной постройки относительно поздних лет (ледоколах типа «Ермак» и др.) за счет использования более высоких напряжений удельный массовый показатель генераторов имеет меньшие значения.

Ледоколы типа «Ермак» и накатные пассажирские паромы типа «Сахалин» относятся к одним из последних в Дальневосточном бассейне дизель-электроходам, на которых в качестве ГГ установлены генераторы постоянного тока.

На последующих судах-электроходах, поступивших на Дальний Восток, за редким исключением установлены и эксплуатируются, как правило, ГЭУ переменного-постоянного или переменного тока, включающие синхронные ГГ явнополюсного одностаторного конструктивного исполнения. Исключение составляют, например, ледокольно-транспортные суда-снабженцы типа «Витус Беринг» проекта 10620, ГЭУ которых включают в себя двухстаторные ГГ, обмотки каждого из двух статоров которых с целью снижения пульсаций выпрямленного напряжения сдвинуты относительно друг друга на  $30^\circ$  электрических.

Основной диапазон полных единичных мощностей синхронных генераторов составляет (100...6600) кВА. Меньшее значение мощности относится к ГГ судов-нефтемусоросборщиков проекта 14630, а большее – к ГГ судна-снабженца ледокольного типа «FESCO Sakhalin». Наименьшее значение напряжения на один ста-



тор, составляющее 380 В, имеют ГГ судов-нефтемосборщиков, а наибольшее (6000 В) – ГГ переменного тока буровых судов типа «Валентин Шашин» проекта RR22. Частота выходного напряжения подавляющего большинства синхронных ГГ дальневосточных электроходов равна 50 Гц. Синхронные генераторы ГЭУ ледокольно-транспортных судов-снабженцев типа «Витус Беринг» имеют частоту 55 Гц. Генераторы переменного тока ГЭУ, как и ГГ постоянного тока, в большинстве случаев приводятся во вращение среднеоборотными дизелями, используемыми как ПД.

Относительная масса синхронных ГГ переменного тока ГЭУ дальневосточных судов-электроходов, как и генераторов постоянного тока, зависит в первую очередь от их напряжения и частоты вращения. В качестве примеров синхронные ГГ электроходов типа «Витус Беринг» имеют относительную массу  $6,9 \cdot 10^{-3}$  кг/Вт при частоте вращения 550 об/мин, а генераторы переменного тока малых кабельных судов типа «Бирюса» –  $4,4 \cdot 10^{-3}$  кг/Вт при частоте вращения 1000 об/мин.

В судовых ГЭУ постоянного и двойного (переменно-постоянного) рода тока в качестве ГЭД используются как одноякорные так и двухъякорные реверсивные ЭД постоянного тока независимого возбуждения, один из подшипников валов которых имеет диэлектрические прокладки с целью ограничения «блуждающих» токов. К основным достоинствам таких ГЭД относится возможность плавно и в широких пределах регулировать их механическую угловую скорость  $\omega_{ГЭД}$ . В ГЭУ дальневосточных судов-электроходов ГЭД непосредственно (без редукторов) работают на движители – ГВ.

ГЭД в одноякорном исполнении установлены на различных судах с ГЭУ постоянного тока: ледоколах типа «Москва», паромов накатных пассажирских проекта 618М («Золотой рог», «Амурский залив», «Уссурийский залив»), спасательных судах типа «Атлант» проекта 843, и др.

Двухъякорные ГЭД нашли применение в ГЭУ постоянного тока накатных пассажирских паромов типа «Сахалин» проекта 1809, приемно-транспортных рефрижераторов типа «Сибирь» проекта 569А, транспортных ледокольных судов типа «Амгуэма» проекта 550 и др. По сравнению с одноякорными у двухъякор-

ных ГЭД меньшие диаметры якорей (радиусы инерций), и, как следствие, меньшие моменты инерции. Двухъякорные ГЭД имеют несколько большую стоимость, а в отдельных случаях – повышенную относительную массу.

Среди ГЭУ постоянного тока наименьшее значение единичной мощности, равное 313 кВт, имеют ГЭД накатных пассажирских паромов проекта 618М, а наибольшее, равное 8827 кВт – ГЭД ледоколов типа «Ермак» проекта Р-1039.

ГЭД постоянного тока на судах-электроходах отечественной постройки, эксплуатируемых в Дальневосточном бассейне, имеют меньшие по сравнению с построенными за границей электроходами относительные массы и более компактны. К преимуществам ГЭД ледоколов зарубежной, в частности финской постройки, следует отнести их более удобное для обслуживания и ремонта конструктивное исполнение. Они по сравнению с ГЭД судов отечественной постройки имеют значительно меньший износ щеток. По сведениям, приведенным в [16], степень износа щеток главных ЭМ ГЭУ накатных пассажирских паромов типа «Сахалин» почти в четыре раза превышает степень износа щеток главных ЭМ ГЭУ ледоколов типа «Ермак».

В ГЭУ переменного тока, установленных на электроходах Дальневосточного бассейна, в качестве ГЭД используются преимущественно асинхронные двигатели (АД). Отсутствие щеточно-коллекторных аппаратов предопределило их более высокую надежность по сравнению с ЭД постоянного тока. К основным недостаткам асинхронных ЭД относятся ограниченные возможности регулирования плавно и в широких пределах угловой скорости их роторов. Наименьшее значение единичной активной мощности, равное 100 кВт, имеют асинхронные ГЭД переменного тока судов-нефтемусоросборщиков проекта 14630, а наибольшее, равное 6500 кВт – асинхронные ГЭД судна-снабженца ледокольного типа «FESCO Sakhalin».

Отличительной особенностью обладают ГЭУ переменного тока буровых судов типа «Валентин Шашин» проекта RR22, у которых по два сдвоенных асинхронных ГЭД мощностью по 2758 кВт работают на два ВРШ.

На 15 единицах рыболовных морозильных траулерах (супертраулерах) типа «Сотрудничество» проекта D 1305 испанской постройки (1991–2004 гг.), имеющих наибольшее водоизмещение 11410 т, установлены синхронные ГЭД мощностью по 2,5 МВт с разгонными асинхронными ЭД [16], используемые в качестве вспомогательных, которые обеспечивают скорость хода судов в спокойной воде до 8 узлов.

Синхронные ГЭД единичной мощностью 2400 кВт эксплуатируются в ГЭУ переменного тока больших морозильных рыболовных траулерах (БМРТ) типа «Алтай» проекта 1376.

На современном этапе развития судового электродвижения ГЭУ переменного и двойного (переменно-постоянного) рода тока на Дальнем Востоке составляют около 20 % от общего числа дальневосточных электроходов, что ниже общероссийского и мирового уровня.

По данным, приведенным в [16], около 90 % судов мирового флота оснащено ГВ, относящимися к реактивным движителям.

На судах-электроходах Дальневосточного бассейна в большинстве случаев (до 95 %) в качестве движителей используются ВФШ, к основным достоинствам которых следует отнести их относительно небольшие массо-размерные характеристики, и значения КПД, достигающие в общем случае 80 % [4].

ВРШ по сравнению с ВФШ отличаются повышенной конструктивной сложностью, увеличенными размерами ступиц, высокой стоимостью, превышающей стоимость ВФШ по данным различных источников примерно до четырех раз. Однако использование ВРШ в сочетании с ГЭУ переменного тока создает предпосылки для внедрения судовых единых ЭЭС, сокращая при этом установленную мощность общесудовых генераторных агрегатов и снижая массо-размерные показатели ориентировочно до 30 %.

В Дальневосточном бассейне ВРШ установлены на БМРТ типа «Алтай» проекта 1376, буровых судах типа «Валентин Шашин» проекта RR22 и др.

Большинство ГВ (ВРШ и ВФШ), используемых в качестве движителей на дальневосточных электроходах имеют традиционное конструктивное исполнение и посредством гребных валов (валопроводов) расположены на одних осях с ГЭД.

На некоторых типах судов и отдельных судах различного функционального назначения конструкции движителей с ГВ представляют собой ВРК (малых кабельных судах типа «Бирюса» проекта 1275, судне-снабженце ледокольного типа «FESCO Sakhalin», морских самоходных плавучих кранах типа СПК проекта 02690 и др.). При таких научно-технических и инженерных решениях оси ГВ и валов ГЭД как правило не совпадают – гл. 1, п. 1.4.

В качестве примеров, на судне-снабженце ледокольного типа «FESCO Sakhalin» установлены азимутальные полноповоротные ВРК серии «Azipod», на ледоколах-снабженцах типа «Pacific Endeavour» проекта UT 758 – серии «Aquamaster», а на малых гидрографических судах типа «Вайгач» проекта 19910 – серии «SP» фирмы Steerprop [21].

На единичных типах дальневосточных судов-электроходов нашли применение крыльчатые движители (Фойта-Шнайдера), направление упоров которых может изменяться в пределах от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  в противоположных направлениях при изменении углов расположения лопастей, чем обеспечиваются высокие маневренные качества судов. КПД крыльчатых двигателей достигает 70 %. Их стоимостные показатели выше, чем ВРШ.

Крыльчатые движители установлены в частности на плавкранах типа «Богатырь» проекта 1520, «Витязь» проекта 1600, «Черноморец» проекта 1511 и некоторых других.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица П.3 – Характеристики степени электрификации ГЭУ судов различного назначения Дальневосточного бассейна

№ п/п	Эксплуатационные типы и серии судов/суда	Год и страна постройки головного судна	Число судов серии / ДВ	Водоизмещение, D, т	Установленная мощность ГЭД, $P_{\Sigma ГЭД}$ , кВт	Значение $k_{ГЭУ}$ , кВт/т
1	2	3	4	5	6	7
1	Кабельные суда					
1.1	1) Большое кабельное судно, тип «Ингул» 2) (проект 1274)	Финляндия, 1962	8/3	7031	2×2150 л.с.; 3163 кВт	0,45
1.2	Малое кабельное судно, тип «Бирюса» (проект 1275)	Финляндия, 1986	2/1	2400	2×1090 л.с.; 1603 кВт	0,67
2	Килекторные суда					
2.1	Килекторное судно 3) (проект 419)	ГДР, 1965	10/3	3151	2×885 л.с.; 1302 кВт	0,41
2.2	Килекторное судно (проект 141)	ГДР, 1986	8/2	6200	2×1500 л.с.; 2207 кВт	0,36
3	Ледоколы					
3.1	Транспортное ледокольное судно, тип «Амгуэма» (проект 550)	СССР, 1962	15/12	14165	1×3510 л.с.; 2582 кВт	0,18
3.2	Ледокол, тип «Ермак» (проект Р-1039)	Финляндия, 1974	3/3	20247	3×12000 л.с.; 26478 кВт	1,31

1	2	3	4	5	6	7
3.3	Ледокол, тип «Капитан Сорокин» (проект 1101)	Финляндия, 1977	4/1	17280	3×7342 л.с.; 16200 кВт	0,94
3.4	Речной ледокол, тип «Капитан Евдокимов» (проект 1191)	Финляндия, 1983	8/1	2341	4×1292 л.с.; 3800 кВт	1,62
3.5	Ледокольно- транспортное судно- снабженец, тип «Витус Беринг» (проект 10620)	СССР, 1986	5/5	20200	2×7791 л.с.; 11460 кВт	0,57
3.6	Судно-снабженец ле- докольного типа «ФЕСКО Сахалин»	Финляндия, 2005	1/1	6882	2×8837 л.с.; 13000 кВт	1,89
4	Паромы					
4.1	Паром накатный пас- сажирский (проект 618М)	СССР, 1967	9/4	513	2×425 л.с.; 625 кВт	1,22
4.2	Паром накатный пас- сажирский, тип «Сахалин» (про- ект 1809)	СССР, 1973	10/10	8530	2×6934 л.с.; 10200 кВт	1,20
4.3	Паром накатный пас- сажирский, тип «Техумарди» (про- ект 1876)	СССР, 1973	7/3	1496	1×2400 л.с.; 1765 кВт	1,18

1	2	3	4	5	6	7
4.4	Паром накатный пассажирский, тип «Вохилайд» (проект 10380)	СССР, 1983	7/1	1010	2×1346 л.с.; 1980 кВт	1,96
5	Плавающие краны					
5.1	Плавающий кран, тип «Черноморец» (проект 1511)	СССР, 1967	39/(6)	1362	2×300 л.с.; 441 кВт	0,32
5.2	Плавающий кран «Богатырь» (проект 1520)	СССР, 1971	6/(1)	3170	2×870 л.с.; 1280 кВт	0,40
5.3	Самоходный плавающий кран, тип СПК-1/16 («Ганц») (проект Д-9021 (721))	ВНР, 1976	16/2	916	2×197 л.с.; 290 кВт	0,32
5.4	Плавающий кран «Витязь» (проект 1600)	СССР, 1977	2/(1)	4220	2×1651 л.с.; 2428 кВт	0,58
5.5	Самоходный плавающий кран (проект Д-9040)	ВНР, 1986	14/1	1174	2×197 л.с.; 290 кВт	0,25
5.6	Морской самоходный плавающий кран, тип СПК (проект 02690)	Россия, 2013	14/4	2000	2×1632 л.с.; 2400 кВт	1,20

1	2	3	4	5	6	7
6	Промысловые суда					
6.1	Китобойное судно, тип «Мирный» (проект 393)	СССР, 1956	(90)/ (16)	1278	2×2107 л.с.; 3100 кВт	2,43
6.2	Большой морозильный рыболовный траулер «Алтай» (проект 1376)	СССР, 1969	31/(3)	6470	1×3263 л.с.; 2400 кВт	0,37
6.3	Зверобойно- рыболовное судно, тип «Зверобой» (проект 422)	ПНР, 1977	27/2	2598	3×1100 л.с.; 2427	0,93
7	Рефрижераторные суда					
7.1	Транспортный рефри- жератор, тип «Актюбинск» (проект 569)	СССР, 1956	14/9	10400	2×3494 л.с.; 5140 кВт	0,49
7.2	Производственный транспортный рефри- жератор, тип «Севастополь» (проект 581)	СССР, 1959	6/3	8970	1×7002 л.с.; 5150 кВт	0,57
7.3	Производственный ре- фрижератор, тип «Таврия» (проект 582)	СССР, 1959	45/(15)	5315	1×3807 л.с.; 2800 кВт	0,53



1	2	3	4	5	6	7
7.4	Приемно-транспортные рефрижераторы типа «Сибирь» (проект 569А)	СССР, 1962	47/(17)	9800	1×7002 л.с.; 5150 кВт	0,53
8	Спасательные суда					
8.1	Морской буксир, тип МБ (проект 733)	СССР, 1959	(50)/ (6)	890	1×1500 л.с.; 1103 кВт	1,24
8.2	Спасательное судно (морской буксир) (проект 527)	СССР, 1959	9/2	3034	2×3500 л.с.; 5149 кВт	1,70
8.3	Морской спасательный буксир, тип «Напористый» (проект 1454)	СССР, 1974	41/7	1670	2×1292 л.с.; 1900 кВт	1,14
8.4	Поисково-спасательное судно «Алагез» (проект 537)	СССР, 1980	2/1	14300	2×12650 л.с.; 18608 кВт	1,30
9	Иные					
9.1	<b>4) Экспедиционное океанографическое судно</b> (проект 1537)	ГДР, 1962	3/2	6349	1×3400 л.с.; 2500 кВт	0,39
9.2	Плавучая база подводных лодок (проект 1886)	СССР, 1963	10/3	8310	2×2000 л.с.; 2942 кВт	0,35

## Продолжение таблицы П.3

1	2	3	4	5	6	7
9.3	Судно размагничивания (проект 1799)	СССР, 1969	17/7	1180	1×1535 л.с. 1129 кВт	0,96
9.4	Судно-нефтемусоросборщик (проект 14630)	СССР, 1976	(11)/ (1)	209	2×136 л.с.; 200 кВт	0,96
9.5	Буровое судно, тип «Валентин Шашин» (проект RR22)	Финляндия, 1983	3/1	16866	2×3750 л.с.; 5516 кВт	0,33

Примечания.

1. ДВ – Дальний Восток (графа 4 заголовка).
2. В скобках указаны ориентировочные данные.

Таблица П.4.1 – Усредненные характеристики основных типов аккумуляторов

№ п/п	Характеристика	АБ									
		SLA	Fe-Ni	Ni-Cd	Ni-Mh	LTO	LFP	Li-ion	Ag-Zn	LIP	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	Плотность энергии $W_e$ , Вт·ч/кг	30	35	50	70	70	75	100	150	175	
2	Напряжение элемента $U_э$ , В	2,00	1,20	1,25	1,25	2,40	3,3	3,70	1,55	3,70	
3	Ток нагрузки $I_{нэ}$ , А <sup>1</sup>	20	20	>200	75	1000	100	<100	500	20	
4	Число рабочих циклов «заряд-разряд» $n_{ц}$ <sup>2</sup>	500	3000	1500	500	25000	4500	750	100	125	
5	Минимальное время зарядки $t_{мин}$ , ч	12.0	11.0	1.5	3.0	0.1	4.0	3.5	20.0	11.5	
6	Наличие «эффекта памяти»	-	+	+	+	-	-	-	+	-	
7	Саморазрядка, % <sup>3</sup>	5.0	10.0	20.0	30.0	3.5	4.0	3.0	4.0	30.0	

Продолжение таблицы П.4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
8	Диапазон рабочих температур $\Delta t_p$ , °С	-20... + 60	- 40 ... + 50	-40... + 60	-20... + 60	-40... + 55	-20... + 60	-20... + 60	-10... + 50	- 40... + 46
9	Периодичность обслуживания, сут.	135	-	30	90	-	-	-	-	2740

Примечание.

В гравфе 2 таблицы П.4.1 сноски:

1 – в % от ёмкости С, А·ч;

2 – до уменьшения ёмкости на 20 % (до 80 %) (строка 4);

3 – в течение месяца (строка 7).

### Основные передаточные функции предложенного варианта схемы силовых каналов электротехнического комплекса судовых КЭУ

Передаточная функция синхронного дизель-генератора имеет вид:

$$W_{дг}(p) = \frac{1}{T_{дг}^2 p^2}, \quad (\text{П.5.1})$$

где  $T_{дг}^2 = \frac{J}{\delta}$  ( $J$  – приведенный момент инерции;  $\delta$  – жесткость характеристики генератора).

Жесткость характеристики  $\delta$  определяется по формуле

$$\delta = \frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q}, \quad (\text{П.5.2})$$

где  $X_d, X_q$  – индуктивное сопротивление генератора по продольной и поперечной осям соответственно.

Передаточная функция реверсивного импульсного преобразователя может быть представлена выражением:

$$W_{шип}(p) = \frac{k_{шип}}{1 + \tau p}, \quad (\text{П.5.3})$$

где  $k_{шип}$  – коэффициент передачи импульсного преобразователя;  $\tau$  – постоянная времени.

При пренебрежении инерционностью ШИП

$$W_{шип}(p) \approx k_{шип}. \quad (\text{П.5.4})$$

Передаточная функция двухзвенного преобразователя частоты, содержащего выпрямитель, фильтр и инвертор, определяется как произведение передаточных функций этих звеньев. Передаточная функция неуправляемого полупроводникового выпрямителя

$$W_B(p) = k_B, \quad (\text{П.5.5})$$

где  $k_B$  – коэффициент передачи.

Передаточная функция фильтра может быть представлена как

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)}, \quad (\text{П.5.6})$$

где  $|H(j\omega)|$  – модуль комплексной передаточной функции (амплитудно-частотная характеристика, а ее аргумент – фазочастотная характеристика).

При несущей частоте ШИМ в несколько кГц автономный инвертор напряжения (АИН) может быть представлен апериодическим звеном

$$W_{\text{АИН}}(p) = \frac{k_{\text{ИН}}^*}{1 + T_{\text{ИН}}^* p}, \quad (\text{П.5.7})$$

где  $k_{\text{ИН}}^* = \frac{f_{1\text{max}}^*}{f_{\Sigma}}$  – коэффициент передачи инвертора ( $f_{1\text{max}}^* = 1$  – максимальная выходная частота АИН, о. е.;  $f_{\Sigma} = f_{\text{max}} + f_{\text{min}}$  – максимальный сигнал задания на входе АИН в о. е.);  $T_{\text{ИН}}^* = \frac{1}{f_{\text{НЧ}}^*}$  – постоянная времени запаздывания АИН, о. е. ( $f_{\text{НЧ}}^*$  – несущая частота АИН, о. е.).

Динамические свойства генератора и параллельно работающей с ним АБ могут быть описаны звеном со следующей передаточной функцией

$$W(p)_{\text{ист1}} = K \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}, \quad (\text{П.5.8})$$

где  $T_1$  – постоянная времени, характеризующая динамические свойства источника по восстановлению напряжения;  $T_2$  – постоянная времени, характеризующая динамические свойства источника при набросе нагрузки.

Передаточная функция гребного АД может быть представлена как:

$$W_{\text{АД}}(p) = \frac{k_M}{(T_2 p + 1)(T_0^2 p^2 + 1)} \cdot \frac{1}{Jp}, \quad (\text{П.5.9})$$

где  $k_M = \frac{M_{\Pi}}{U_{1\text{ном}}}$  – коэффициент передачи двигателя по моменту;  $T_2$  – постоянная времени, характеризующая апериодическую составляющую момента;  $T_0$  – постоянная времени затухания периодической составляющей;  $J$  – момент инерции.

## Преобразователи частоты INSTART серии SDI.

### Основные сведения

Сведения об изделии содержит код модели преобразователя частоты – рисунки П.6.1 и П.6.2.

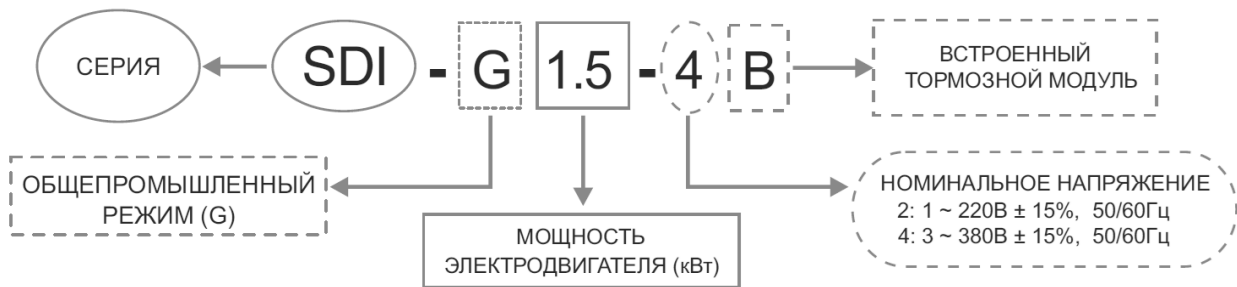


Рисунок П.6.1 – Код модели преобразователей частоты INSTART серии SDI

<b>INSTART</b>		<b>ЕАС</b>
<b>Преобразователь частоты серии SDI</b>		
Модель	SDI-G1.5-4B	
Входное напряжение	3~380В -15~20% 50/60Гц	
Выходное напряжение	3~0-380В 0-600Гц	
Мощность	P <sub>н</sub> =1.5 кВт	
Ток	I <sub>н</sub> =3.7 А	
Степень защиты	IP20	
Серийный номер	xxxxxxxxxxxxxx	
<a href="http://www.instart-info.ru">www.instart-info.ru</a>		

Рисунок П.6.2 – Пример паспортной таблички изделия

Общепромышленный режим работы G (рисунок П.6.1) используется с нагрузкой, имеющей постоянный вращающий момент (ЭП группы конвейеров, экструдеров и др.).

Основные характеристики преобразователей частоты INSTART серии SDI приведены в таблицах П.6.1 и П.6.2.

Таблица П.6.1 – Таблица соответствия преобразователей частоты серии SDI и ЭД

Модель преобразователя частоты	Номинальный ток на входе (А)	Номинальный ток на выходе (А)	Соответствующий двигатель (кВт)
1 ~ 220В ± 15% 50/60Гц			
SDI-G0.4-2B	3.2	1.8	0.37
SDI-G0.75-2B	8.2	4.7	0.75
SDI-G1.5-2B	14.0	7.5	1.5
SDI-G2.2-2B	23.0	10.0	2.2
3 ~ 380В ± 15% 50/60Гц			
SDI-G0.75-4B	3.4	2.3	0.75
SDI-G1.5-4B	5.0	3.7	1.5
SDI-G2.2-4B	5.8	5.1	2.2
SDI-G4.0-4B	10.5	8.5	4.0

Таблица П.6.2 – Характеристики преобразователей частоты серии SDI

Параметр	Характеристика	
Управление	Диапазон напряжения и частоты на входе	1 ~ 220В ± 15% 50/60Гц 3 ~ 380В ± 15% 50/60Гц
	Диапазон напряжения и частоты на выходе	3 ~ 220В ± 15% 0-600Гц 3 ~ 380В ± 15% 0-600Гц
	Диапазон мощностей	0.4 ~ 4.0 кВт
	Режим управления	Управление напряжением / частотой (V/F) Векторное управление без обратной связи
	Выходная частота	0-600 Гц
	Разрешение по частоте	Цифровое значение 0.01% Аналоговое значение 0.025%
	Кривая напряжения/ частоты	Линейная, квадратичная, многоточечная, по выборочным значениям: напряжение/частота (V/F)
	Перегрузочная способность	4 с при 180% от номинального тока 60 с при 150% от номинального тока 60 мин. при 120% от номинального тока
	Пусковой момент	1,0 Гц / 150% (SVC)
	Диапазон регулировки скорости	1:50 (SVC)
	Форсирование крутящего момента	Ручное форсирование крутящего момента (0.1%~20.0%), автоматическое форсирование крутящего момента



## ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Таблица П.7.1 – Расчет экономического эффекта от внедрения КЭУ

№ п/п	$t_p$ , мин	$n_p$	$t_{cp\Sigma}$ , ч	$t_{p\Sigma}$ , ч	$g_{cp}$ , кг	$g_m$ , кг	$g_{xn}$ , кг	$g_\Sigma$ , кг	Ст <sub>дс</sub> , млн. руб	Ст <sub>гс</sub> , млн. руб	Ст <sub>дс</sub> /Ст <sub>гс</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	15	19	3,20	4,80	27,6	27,9	71	148,7	1,46	0,86	1,69
2	20	16	2,67	5,33	23,0	23,2	92	162,6	1,60	0,86	1,85
3	25	14	2,29	5,71	19,7	19,9	107	172,5	1,70	0,86	1,96
4	30	12	2,00	6,00	17,2	17,4	118	179,9	1,77	0,86	2,04
5	35	11	1,78	6,22	15,3	15,5	127	185,7	1,82	0,86	2,11
6	40	10	1,60	6,40	13,8	13,9	134	190,3	1,87	0,86	2,16
7	45	9	1,45	6,55	12,5	12,7	140	194,1	1,91	0,86	2,21
8	50	8	1,33	6,67	11,5	11,6	145	197,2	1,94	0,86	2,24
9	55	7	1,23	6,77	10,6	10,7	149	199,9	1,96	0,86	2,27
10	60	7	1,14	6,86	9,9	9,9	152	202,2	1,99	0,86	2,30
11	65	6	1,07	6,93	9,2	9,3	155	204,2	2,01	0,86	2,32
12	70	6	1,00	7,00	8,6	8,7	158	205,9	2,02	0,86	2,34
13	75	6	0,94	7,06	8,1	8,2	160	207,4	2,04	0,86	2,36
14	80	5	0,89	7,11	7,7	7,7	162	208,8	2,05	0,86	2,37
15	85	5	0,84	7,16	7,3	7,3	164	210,0	2,06	0,86	2,39
16	90	5	0,80	7,20	6,9	7,0	166	211,1	2,07	0,86	2,40
17	95	5	0,76	7,24	6,6	6,6	167	212,1	2,08	0,86	2,41
18	100	4	0,73	7,27	6,3	6,3	168	213,0	2,09	0,86	2,42
19	105	4	0,70	7,30	6,0	6,1	170	213,8	2,10	0,86	2,43
20	110	4	0,67	7,33	5,7	5,8	171	214,6	2,11	0,86	2,44
21	115	4	0,64	7,36	5,5	5,6	172	215,3	2,12	0,86	2,45
22	120	4	0,62	7,38	5,3	5,4	173	215,9	2,12	0,86	2,45

Примечания.

В таблице П.7.1  $t_p$  (2-я графа) – время рейса судна ( $t_p = (15...120)$  мин = var);  $n_p$  (3-я графа) – число рейсов за сутки при продолжительности кратковременных стоянок судна у причала во время высадки/посадки пассажиров, равной 10 мин;  $t_{cp\Sigma}$  (4-я графа) – суммарное время кратковременных стоянок судна за сутки с работающим ГД ( $t_{cp} = 10$  мин = const);  $t_{p\Sigma}$  (5-я графа) – суммарное время рейсов суд-

на за сутки;  $g_{cp}$  (6-я графа) – расход топлива в сутки за время  $t_{cp\Sigma}$ ;  $g_m$  (7-я графа) – расход топлива в сутки за время маневров  $t_m$ ;  $g_{хн}$  (8-я графа) – расход топлива в сутки за время номинального ходового режима судна  $t_{хн}$  ( $t_{хн} = t_{p\Sigma} - t_{m\Sigma}$ , где  $t_{m\Sigma}$  – суммарное время маневров за сутки);  $g_\Sigma$  (9-я графа) – суммарный расход топлива в сутки, определяемый как

$$g_\Sigma = (g_{cp} + g_m + g_{хн}) / \rho_m, \quad (\text{П.7.1})$$

где  $\rho_m$  – плотность топлива, 0,85 кг / литр;  $C_{T_{дс}}$  (10-я графа) – стоимость эксплуатации дизельного судна за навигационный период;  $C_{T_{гс}}$  (11-я графа) – стоимость эксплуатации гибридного судна за навигационный период;  $C_{T_{дс}} / C_{T_{гс}}$  (12-я графа) – экономический эффект от внедрения КЭУ.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Таблица П.8.1. – Расчет экологического эффекта от внедрения КЭУ

№ п/п	$t_{\text{рейса}}$ , МИН	$n_{\text{рейсов}}$	$t_{\text{хи}}$ , МИН	NO <sub>x1</sub> , КГ	CO <sub>1</sub> , КГ	NO <sub>x1</sub> + CO <sub>1</sub> , КГ	NO <sub>x2</sub> , КГ	CO <sub>2</sub> , КГ	NO <sub>x2</sub> + CO <sub>2</sub> , КГ	(NO <sub>x1</sub> + CO <sub>1</sub> ) / (NO <sub>x2</sub> + CO <sub>2</sub> )
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	15	19	9	5,16	3,75	1683,9	4,84	3,52	1580,04	1,1
2	20	16	14	5,91	4,30	1930,0	4,84	3,52	1580,04	1,2
3	25	14	19	6,45	4,69	2105,7	4,84	3,52	1580,04	1,3
4	30	12	24	6,85	4,98	2237,5	4,84	3,52	1580,04	1,4
5	35	11	29	7,17	5,21	2340,0	4,84	3,52	1580,04	1,5
6	40	10	34	7,42	5,40	2422,0	4,84	3,52	1580,04	1,5
7	45	9	39	7,62	5,55	2489,1	4,84	3,52	1580,04	1,6
8	50	8	44	7,80	5,67	2545,0	4,84	3,52	1580,04	1,6
9	55	7	49	7,94	5,78	2592,3	4,84	3,52	1580,04	1,6
10	60	7	54	8,07	5,87	2632,9	4,84	3,52	1580,04	1,7
11	65	6	59	8,17	5,94	2668,0	4,84	3,52	1580,04	1,7
12	70	6	64	8,27	6,01	2698,8	4,84	3,52	1580,04	1,7
13	75	6	69	8,35	6,07	2725,9	4,84	3,52	1580,04	1,7
14	80	5	74	8,42	6,13	2750,0	4,84	3,52	1580,04	1,7
15	85	5	79	8,49	6,17	2771,6	4,84	3,52	1580,04	1,8
16	90	5	84	8,55	6,22	2791,0	4,84	3,52	1580,04	1,8
17	95	5	89	8,60	6,26	2808,6	4,84	3,52	1580,04	1,8
18	100	4	94	8,65	6,29	2824,6	4,84	3,52	1580,04	1,8
19	105	4	99	8,70	6,33	2839,2	4,84	3,52	1580,04	1,8
20	110	4	104	8,74	6,35	2852,6	4,84	3,52	1580,04	1,8
21	115	4	109	8,78	6,38	2864,9	4,84	3,52	1580,04	1,8
22	120	4	114	8,81	6,41	2876,2	4,84	3,52	1580,04	1,8

Примечания.

1. Выхлоп дизеля ЗД6 и Perkins-Talbot TD26T Marine по NO<sub>x</sub> принят равным 11 г/кВт·ч, по CO – 8 г /кВт·ч.

2. В таблице П.8.1  $t_{хн}$ . (4-я графа) – время номинального ходового режима судна;  $NOx_1$  (5-я графа) – выхлоп  $NOx$  за сутки дизельным судном;  $CO_1$  (6-я графа) – суточный выхлоп  $CO$  дизельным судном;  $NOx_1 + CO_1$  (7-я графа) – выхлоп  $NOx$  и  $CO$  за навигационный период дизельным судном;  $NOx_2$  (8-я графа) – выхлоп  $NOx$  за сутки гибридным судном;  $CO_2$  (9-я графа) – выхлоп  $CO$  за сутки гибридным судном;  $NOx_2 + CO_2$  (10-я графа) – выхлоп  $NOx$  и  $CO$  за навигационный период гибридным судном;  $(NOx_1 + CO_1) / (NOx_2 + CO_2)$  (11-я графа) – сравнение выбросов дизельного и гибридного судов (экологический эффект от внедрения КЭУ).

Акт внедрения результатов диссертационной работы



ООО НПФ  
**Управляющие системы**

690003, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 66 – 29, тел/факс 51-52-87

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ООО НПФ  
«Управляющие системы»  
к.т.н, доцент



А.В. Артемьев  
«17» февраля 2021 г.

### АКТ


внедрения результатов диссертационной работы  
«Совершенствование электротехнических комплексов судовых  
пропульсивных установок»

Миханошина Виктора Викторовича,  
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комиссия в составе председателя Артемьева А.В. и начальника производства Седова В. А. рассмотрела результаты диссертационной работы Миханошина В.В. «Совершенствование электротехнических комплексов судовых пропульсивных установок».

Положения, разработки и научно практические рекомендации кандидатской диссертации, в частности, разработка структурной схемы гребной электрической установки (ГЭУ), классификация ГЭУ, способ управления судовой комбинированной энергоустановки, и алгоритмы функционирования используются при исследовании и определении перспективных направлений развития систем управления и судовых пропульсивных комплексов в целом.

Составлен комиссией в составе:

Директор ООО НПФ «Управляющие системы», к.т.н.  А.В. Артемьев

Начальник производства, к.ф.-м.н.

 В.А. Седов



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО МОРСКОГО И РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА  
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
 БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
 УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**МОРСКОЙ  
 ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
 УНИВЕРСИТЕТ**  
 имени адмирала Г.И. Невельского  
 (МГУ им. адм. Г.И. Невельского)

ул. Верхнепортовая, д. 50а, г. Владивосток, 690003  
 тел.: (423) 230-12-51, факс: (423) 251-76-39  
 e-mail: office@msun.ru, http://www.msun.ru

№ \_\_\_\_\_  
 На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_  
 [ \_\_\_\_\_ ]

**УТВЕРЖДАЮ**

Ректор  
 МГУ им. адм. Г.И. Невельского

  
 \_\_\_\_\_ Д.В. Буров  
 «10» февраля 2021 г.



**АКТ**

внедрения результатов диссертационных исследований  
 Миханошина Виктора Викторовича  
 на тему «Совершенствование электротехнических комплексов  
 судовых пропульсивных установок»

Настоящим Актом подтверждается внедрение результатов основных научных положений, выводов, рекомендаций и научно-технических решений диссертационной работы Миханошина В.В. «Совершенствование электротехнических комплексов судовых пропульсивных установок» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» (технические науки) в учебный и научно-исследовательский процессы кафедры «Электрооборудование и автоматика судов» (ЭОАС) Электромеханического факультета (ЭМФ) Морского государственного университета (МГУ) имени адмирала Г.И. Невельского.

Заведующий кафедрой ЭОАС,  
 к.ф.-м.н., доцент

  
 \_\_\_\_\_ Седов В.А.

Декан ЭМФ,  
 д.т.н., профессор

  
 \_\_\_\_\_ Глушков С.В.

Помощник ректора по научной работе  
 к.т.н.

  
 \_\_\_\_\_ Холоша М.В.