

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
“ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени В.И. ЛЕНИНА “

На правах рукописи

Савенко Александр Евгеньевич



**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ
УСТРАНЕНИЯ ОБМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ МОЩНОСТИ В
СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание научной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Голубев Александр Николаевич

Иваново – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТОЙ СУДОВЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ	13
1.1. Электротехнический комплекс современного судна	13
1.1.1. Состав судовой электроэнергетической системы	13
1.1.2. Характеристики системы регулирования скорости и генератора в составе ДГА	17
1.1.3. Автоматические регуляторы частоты вращения	23
1.1.4. Системы автоматического регулирования напряжения	25
1.2. Параллельная работа генераторных агрегатов	27
1.2.1. Преимущества и недостатки параллельной работы	27
1.2.2. Распределение активной нагрузки	28
1.2.3. Распределение реактивной нагрузки	32
1.2.4. Современные системы управления параллельной работой СГ	34
1.3. Обменные колебания мощности	40
1.4. Выводы к главе 1	54
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПАРОМА “ЕЙСК”	56
2.1. Изучение объекта исследования	56
2.1.1. Единая электроэнергетическая установка паромы “Ейск”	56
2.1.2. Гребная электрическая установка паромы “Ейск”	60
2.1.3. Судовые генераторы паромы “Ейск”	61
2.1.4. Возбудительное устройство генераторов	64
2.1.5. Параллельная работа дизель-генераторных агрегатов S450 M6..	66
2.2. Результаты экспериментального исследования работы электротехнического комплекса паромы “Ейск”	68
2.3. Выводы к главе 2	85
ГЛАВА 3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУДОВОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА	87
3.1. Уравнения синхронных генераторов переменного тока	88
3.1.1. Уравнения в неподвижных осях	88

3.1.2. Уравнения во вращающихся осях	92
3.1.3. Определение численных величин коэффициентов уравнений синхронного генератора	100
3.1.4. Упрощенные уравнения синхронного генератора	101
3.2. Уравнения автоматического регулятора напряжения	102
3.3. Уравнения статической 3-фазной симметричной активно- индуктивной нагрузки	107
3.4. Уравнения первичных двигателей генераторов и автоматических регуляторов скорости вращения.....	109
3.5. Моделирование параллельной работы генераторов в составе СЭЭС	116
3.6. Исследование методами математического моделирования	118
3.7. Выводы к главе 3.....	126
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДА УМЕНЬШЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ОБМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ МОЩНОСТИ В СУДОВОМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ	129
4.1. Метод уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности.....	129
4.2. Изменения в структуре судовой электростанции.....	131
4.3. Выбор типа системы автоматического управления	133
4.4. Разработка алгоритма работы блока УОКМ	139
4.5. Синфазные колебания мощности при параллельной работе дизель- генераторных агрегатов.....	142
4.6. Определение допустимого уровня обменных колебаний.....	148
4.7. Проверка эффективности и работоспособности метода уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности	150
4.8. Выводы к главе 4.....	154
Заключение	156
Список использованных сокращений	159
Литература	160
Приложение А. Результаты экспериментальных исследований на пароме “Ейск”	176
Приложение В. Расчет параметров генератора типа S450MG	186
Приложение С. Расчет момента инерции ДГА парома “Ейск”	189
Приложение D. Результаты математического моделирования	190
Приложение Е. Паспортные данные т/х “Ейск”	195

Приложение F. Акты внедрения результатов диссертации.....	198
---	-----

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Важная роль в инфраструктуре мировой экономики, в том числе и России, принадлежит морскому флоту. Флот выполняет транспортные, рыбодобывающие, военные, различные технологические, научно-исследовательские и другие задачи во всех районах мира. Электротехнический комплекс является важнейшим элементом любого судна, от работы которого зависит его жизнедеятельность как автономного объекта. Для безопасной и экономически выгодной работы судна необходимо обеспечить высокое качество производимой на нем электрической энергии. Сложность решения этой задачи объясняется использованием многогенераторных электростанций и необходимостью обеспечения параллельной работы источников электрической энергии [4,14,74,94,135].

Организация эффективной параллельной работы генераторов является важным вопросом для любого электротехнического комплекса, но особенно для морского судна при соизмеримости мощностей источников и потребителей. Здесь можно выделить два аспекта, которые поясняют важность этой проблемы. Во-первых, обеспечение безопасности судна и людей, находящихся на нем, так как нарушение параллельной работы может привести к развалу энергосистемы, обесточиванию судна, потери управляемости и катастрофе. Во-вторых, важна экономическая составляющая эксплуатации любого судна. Низкое качество производимой электроэнергии приводит к повышенному расходу топлива, увеличению рейсового времени, появлению дополнительных расходов, связанных с ремонтом оборудования. Необходимо учесть, что в большинстве случаев приводными двигателями для судовых синхронных генераторов являются дизельные двигатели внутреннего сгорания, а значит, обеспечение надежной параллельной работы должно рассматриваться в связи с судовой энергетической установкой [47,58,75,100,117]. Современные судовые

электроэнергетические системы (СЭЭС) имеют большое количество систем автоматики, обеспечивающих параллельную работу судовых дизель-генераторных агрегатов (ДГА) [23,40,56,64,108,119,127,136]. По заявлению фирм производителей эксплуатация судов класса автоматизации А1 возможна с безвахтенным обслуживанием. Однако, очень часто, возникают аварийные ситуации, связанные с неудовлетворительным качеством параллельной работы источников электроэнергии. Замеры, проводимые специалистами во время исследований, также выявляют низкое качество электрической энергии, вырабатываемой автономными электростанциями. Причиной таких фактов является неполная изученность всех происходящих процессов, несовершенство систем автоматики и недостаточная квалификация обслуживающего персонала. Одной из малоизученных проблем параллельной работы дизель-генераторных агрегатов на основе синхронных генераторов переменного тока, которые в основном применяются в судовых электротехнических комплексах, являются обменные колебания мощности [6,102]. Требования классификационных обществ и международные стандарты не содержат допустимых норм, ограничивающих уровень таких колебаний. А между тем, ограничение амплитуды обменных колебаний мощности напрямую связано с обеспечением устойчивой работы судовой электростанции. Очевидно, существующие методы организации и управления параллельной работой дизель-генераторов [8,27,38,41,57,73,99,111,131] не могут исключить отрицательные последствия наличия обменных колебаний мощности.

Работа по исследованию и внедрению передовых методов управления параллельной работой ДГА судового электротехнического комплекса активно ведется как в объединенной судостроительной корпорации РФ, так и известными зарубежными фирмами - ABB, Selco, Stucke electronic, Deif, Siemens, Mitsubishi и другими.

Значительный вклад в теорию электромагнитных и электромеханических переходных процессов, а также в разработку систем

управления параллельной работой синхронных генераторов в составе автономных электрических систем внесли П. С. Жданов, В. А. Веников, П. Бушери, Д. Капп, Х. Георгес, А. Блондель, Е. Арнольд, В. В. Дмитриев, Г. А. Люст, Н. М. Крылов, М. Стоун, В. К. Житомирский, Вальтер Бенц, Д. Румпель, И. Д. Урусов, Б. И. Болотин, В. Л. Вайнер, Е. И. Боголюбов, Н. И. Овчаренко, Г. А. Конкс, В. А. Лашко, Л. В. Вишневский и ряд других ученых.

Однако причины возникновения обменных колебаний исследованы не до конца. Поэтому необходимо провести дополнительные исследования параллельной работы синхронных генераторов в составе судового электротехнического комплекса, направленные на выявление причин возникновения обменных колебаний мощности и разработке новых методов для создания системы автоматического управления, работа которой повысит качество производимой электроэнергии и устранил полностью или уменьшит до безопасного значения амплитуду обменных колебаний мощности.

Успешность и результативность такой работы определяется неразрывностью моделирования и проведением экспериментальных исследований на судне. Разрабатываемая система предназначена для вновь строящихся судов. Кроме того она сможет устанавливаться на судах, находящихся в эксплуатации для продления их срока службы.

Исследования по разработке метода уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности при параллельной работе судовых синхронных генераторов является актуальной и полезной для обеспечения надежной, безаварийной и экономически эффективной работы судового электротехнического комплекса. Результаты могут быть применены для любого автономного электротехнического комплекса.

Объектом исследования является многогенераторный комплекс автономной судовой электроэнергетической системы.

Предметом исследования являются обменные колебания электрической мощности при параллельной работе синхронных дизель-

генераторов судового электротехнического комплекса.

Цель диссертационной работы: разработка метода уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности, повышение технико-экономической эффективности параллельной работы судовых синхронных генераторов путем совершенствования их системы управления.

Задачи исследования, которые поставлены и решены в работе:

- анализ особенностей эксплуатационных режимов судовых электроэнергетических установок переменного тока, существующих методов и средств управления параллельной работой дизель-генераторных агрегатов;
- экспериментальное исследование работы судового электротехнического комплекса для выявления существующих проблем;
- математическое моделирование судового электротехнического комплекса для исследования обменных колебаний мощности и выявления причин их возникновения;
- разработка метода управления дизель-генераторными агрегатами для уменьшения амплитуды обменных и синфазных колебаний мощности и его проверка на математической модели;
- разработка алгоритма оптимизации параллельной работы дизель-генераторных агрегатов для системы управления, обеспечивающей снижение уровня обменных и синфазных колебаний мощности между генераторами;
- разработка критерия оценки уровня обменных колебаний мощности на основе интегрального метода площадей;
- разработка компьютерной программы, соответствующей усовершенствованной математической модели, для проверки разработанных методов.

Методы исследований. Для решения поставленных в работе задач использованы основные положения теорий электрических цепей, электропривода и автоматического управления; электрических машин, численных методов решения дифференциальных уравнений, известные методы программирования.

При выполнении экспериментальных исследований проводились натурные испытания на действующем оборудовании электротехнического комплекса реального судна.

Обоснованность полученных результатов работы определяется адекватностью принятых допущений, корректностью применения теоретических и экспериментальных методов исследования электромеханических и электроэнергетических систем.

Достоверность полученных результатов работы определяется совпадением полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Научная новизна представленной диссертационной работы заключается в следующем:

- определены основные причины возникновения колебаний мощности в судовом электротехническом комплексе, такие, как существование нелинейностей люфт в контурах регулирования частот вращения дизелей и рассогласование настроек их регуляторов частоты вращения, и выявлена необходимость уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности и повышения качества вырабатываемой электроэнергии;

- впервые разработан метод уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности при параллельной работе ДГА СЭЭС, основанный на адаптивном изменении настроек регуляторов частоты вращения дизелей;

- предложена усовершенствованная математическая модель судового электротехнического комплекса, включающая в себя все его компоненты, корректность которой подтверждена результатами проведенных комплексных экспериментальных исследований на действующем судне морского флота;

- впервые разработан критерий оценки допустимого уровня обменных колебаний мощности для самонастраивающейся системы автоматического управления параллельной работой синхронных генераторов на основе интегрального метода площадей.

Практическое значение диссертационной работы:

- предложен метод повышения эффективности параллельной работы судовых ДГА на основе разработанного критерия оценки амплитуды обменных колебаний мощности;
- разработана структура самонастраивающейся адаптивной системы автоматического управления многоагрегатной автономной судовой электростанции, позволяющая оптимизировать ее работу путем снижения уровня обменных колебаний мощности между ДГА;
- разработан алгоритм работы самонастраивающейся адаптивной системы автоматического управления, устраняющей колебания мощности, что позволяет повысить безопасность мореплавания судна и уменьшить себестоимость его эксплуатации;
- разработана компьютерная программа, реализующая предложенный метод по уменьшению амплитуды обменных колебаний мощности и критерий определения их допустимого уровня в автоматическом режиме;
- результаты исследований и натурных испытаний переданы для опытной эксплуатации в филиал государственного унитарного предприятия Республики Крым “Крымские морские порты” “Керченская паромная переправа” и в Керченский участок ООО “Югрематоматика” (акт о внедрении от 05.11.2014 г.), ООО “ТИС-Крым” (акт о внедрении от 31.03.2015 г.). Дополнение системы автоматического управления судового электротехнического комплекса блоком УОКМ, адаптивно изменяющим параметры настройки автоматических регуляторов частоты вращения дизелей для уменьшения амплитуды колебаний мощности, позволит уменьшить затраты на обслуживание дизель-генераторных агрегатов за счет более эффективного их использования;
- результаты исследований и проведенных натурных испытаний используются в учебном процессе ФГБОУ ВО КГМТУ для студентов направления подготовки 13.03.02 “Электроэнергетика и электротехника”, специальностей 26.05.07 “Эксплуатация судового электрооборудования и

средств автоматики”, 26.05.06 “Эксплуатация судовых энергетических установок”, акт о внедрении от 30.03.2015 г.

Положения, выносимые на защиту:

- усовершенствованная математическая модель судового электротехнического комплекса, корректность которой подтверждена результатами экспериментальных исследований, полученных с использованием современных контрольно-измерительных систем;
- метод уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности при параллельной работе судовых синхронных генераторов;
- рекомендации по изменению структуры адаптивной системы управления параллельной работой судовой электростанции;
- алгоритм работы адаптивного блока уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности;
- рекомендации по определению допустимого уровня обменных колебаний мощности в судовом электротехническом комплексе.

Использование результатов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении научных исследований, проведенных кафедрой электрооборудования судов и автоматизации производства Керченского государственного морского технологического университета по госбюджетной теме: “Повышение надежности, технической эффективности и экономичности электрооборудования и автоматики судов” (№ государственной регистрации 0109U002102).

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях, семинарах, совещаниях. В том числе на XV Международной конференции по автоматическому управлению Автоматика – 2008 (Одесса 2008); X Международной конференции “Контроль и управление в сложных системах (КУСС – 2010)” (Винница, 2010); XVIII Международной конференции по автоматическому управлению Автоматика – 2011 (Львов, 2011); I

Международной научно-технической конференции “Оптимальное управление электроустановками – 2011” (Винница, 2011); XIX Международной конференции по автоматическому управлению Автоматика – 2012 (Киев, 2012); XI Международной конференции “Контроль и управление в сложных системах (КУСС – 2012)” (Винница, 2012); XX Международной конференции по автоматическому управлению Автоматика – 2013 (Николаев, 2013); II Международной научно-технической конференции “Оптимальное управление электроустановками – 2013” (Винница, 2013), XXI Международной конференции по автоматическому управлению Автоматика – 2014 (Киев, 2014); XII Международной конференции “Контроль и управление в сложных системах (КУСС – 2014)” (Винница, 2014); III Балтийский морской форум, Международная научная конференция “Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии” (Калининград, 2015).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 20 научных работ, в том числе 8 статей в изданиях, рекомендуемых ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Основная часть изложена на 176 страницах машинописного текста. Работа содержит 79 рисунков.

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТОЙ СУДОВЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

1.1. Электротехнический комплекс современного судна

1.1.1. Состав судовой электроэнергетической системы

Вода покрывает значительную часть земной поверхности и поэтому человечество для осуществления своей хозяйственной, экономической и другой деятельности использует суда самого различного назначения. Современное судно – сложный технический объект, в котором реализуются все направления и последние достижения научной и технической жизни. В соответствии со спецификой выполняемых судами задач они имеют разные габариты и формы, механизмы и оборудование. Однако всем судам для их работы в автономном режиме необходима электрическая энергия, которая расходуется на преобразование в механическую, тепловую и световую энергию. Поэтому на борту судна обязательно создается электроэнергетическая система, которой называется совокупность электротехнических устройств, объединенных процессом производства, преобразования, распределения электроэнергии и питания ею судовых приемников [4,133,134]. Такая система состоит из электрических станций, распределительных устройств и потребителей электрической энергии, связанных между собой линиями передач. Этот электротехнический комплекс объединен общим процессом выработки, распределения и потребления электрической энергии. В состав электростанции входят источники электрической энергии, устройства осуществляющие распределение электроэнергии, контроль и управление работой электроустановок, а также различные преобразователи тока, напряжения и

частоты. В качестве источников электрической энергии на современных судах морского флота чаще всего используются дизель-генераторные агрегаты переменного тока на основе трехфазного синхронного генератора. Количество таких генераторных агрегатов в составе электростанции на большинстве судов не ограничивается одним, а может достигать пяти и более единиц. Количество дизель-генераторных агрегатов, устанавливаемых на конкретном судне зависит от его типа и от суммарной мощности электропотребителей.

Примером современного морского судна с многогенераторной электростанцией являются суда, оборудованные винторулевыми колонками Азипод [90]. В состав электроэнергетического комплекса судна с азиподом (рис. 1.1) входят несколько дизель-генераторов, работающих на общие

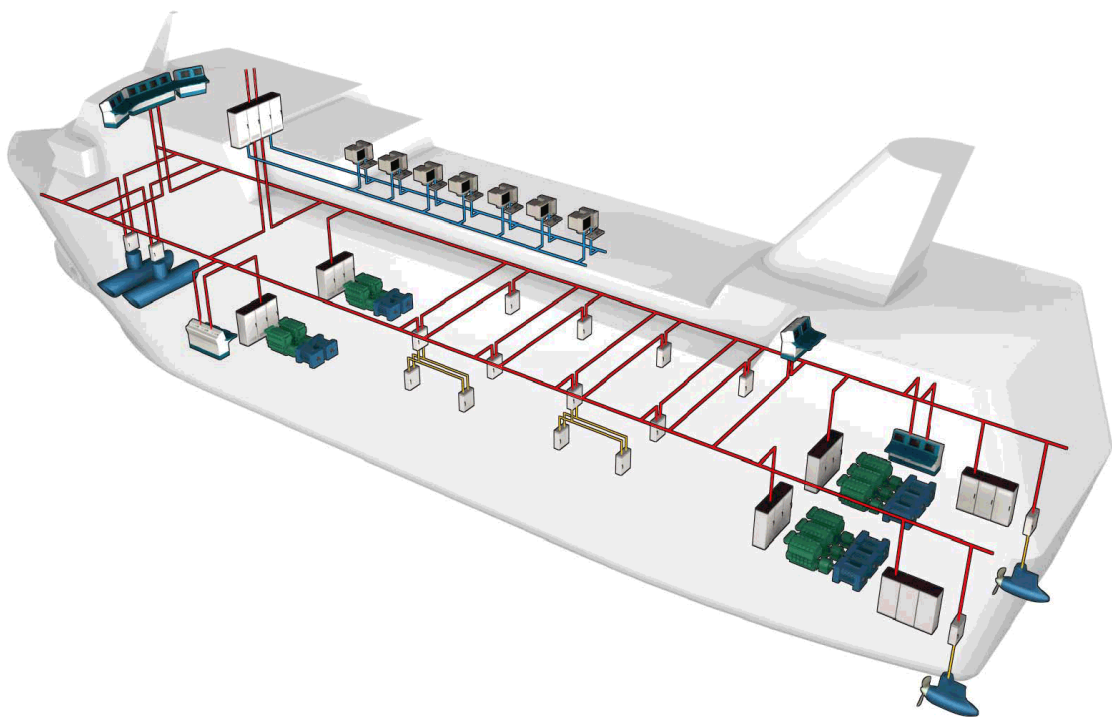


Рис. 1.1. Электротехнический комплекс судна с азиподами

шины, трансформатор, преобразователь частоты (чаще всего циклоконвертор) с микропроцессорной системой управления,

исполнительный двигатель и винт фиксированного шага. В настоящее время в этих комплексах при мощности до 10 МВт используются асинхронные двигатели, а выше 10 МВт до 30 МВт – синхронные двигатели. Таким образом, мощность установленного электрооборудования такого судна может достигать десятки-сотни МВт.

Электропривод азипод, который появился в конце прошлого века - это модуль с электрическим двигателем и гребным винтом, дает возможность регулировать момент на винте при разворотах в любом направлении, обеспечивает быстрое и безопасное маневрирование, увеличение полезного объема судна в связи с отсутствием валопровода и более совершенной компоновкой машинного отделения, дает возможность отказаться от рулевого устройства, обеспечивает более высокий коэффициент полезного действия гребной установки и более низкий уровень вибрации и шумов, сокращает время постройки судна. Суда, оснащенные азиподом, обладают хорошими ледокольными качествами, существенно экономят топливо на переходах.

Как было отмечено, основным источником электроэнергии на судах служат дизель-генераторные агрегаты ДГА1, ДГА2, ... (рис. 1.2), состоящие из синхронных генераторов СГ1, СГ2, ..., приводимых во вращение дизелями Д1, Д2, Все генераторы подключены параллельно на общие шины главного распределительного щита (ГРЩ). Приёмники (П) получают электрическую энергию от ГРЩ. На все генераторы подводится напряжение возбуждения u_f , а все дизели получают топливо с величиной расхода h . Генераторные агрегаты имеют в своем составе систему автоматического регулирования частоты вращения (АРЧ) и напряжения (АРН). Необходимость в наличии этих систем обусловлена постоянным изменением величины и характера нагрузки, причем предсказать эти изменения невозможно. Отклонения напряжения синхронного генератора определяют в основном реакция статора и индуктивное падение напряжения, наиболее сильно размагничивающее действие реакции статора проявляется при

индуктивном характере нагрузки, когда реакция направлена по продольной оси против основного магнитного потока. Напряжение генератора может значительно снижаться при пусках короткозамкнутых асинхронных двигателей, которые часто производятся прямым включением в сеть. От величины динамических нагрузок зависит также частота вращения дизеля.

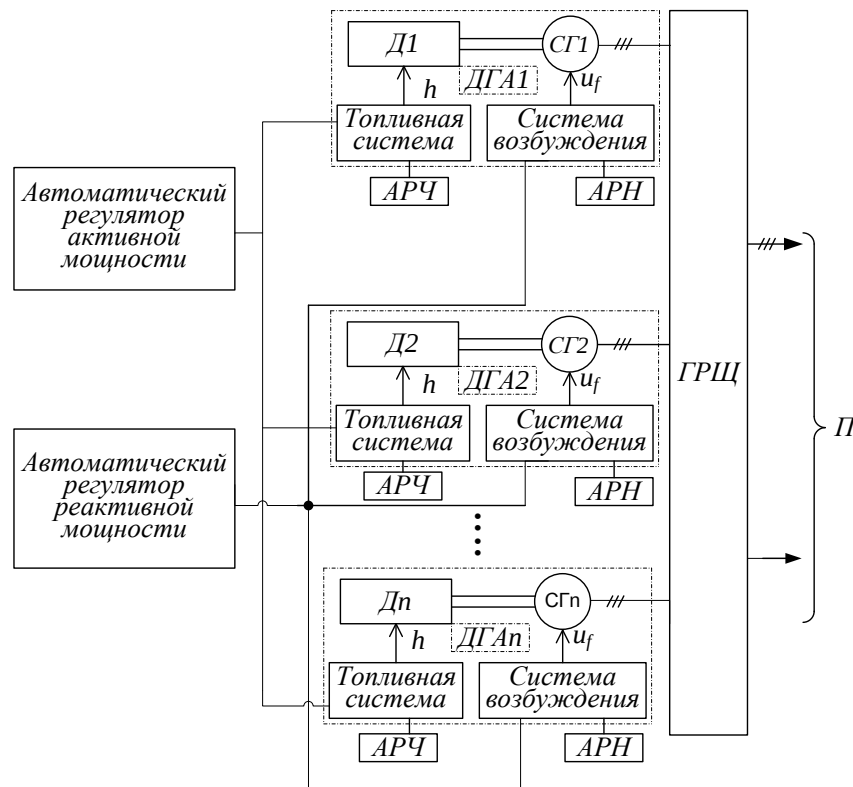


Рис. 1.2. Структура судового электротехнического комплекса

Частота напряжения вырабатываемого генератором прямопропорциональна скорости вращения дизеля, она является одним из основных параметров вырабатываемой электроэнергии. Точность поддержания на установленном уровне частоты и напряжения вырабатываемой электроэнергии каждым из параллельно работающих генераторов определяет точность распределения между ними соответственно активной и реактивной мощности [5,22,59,67].

Для ДГА осуществляются регулирование активной и реактивной мощности с использованием регуляторов, соответственно, АРАМ и АРРМ, воздействующих на дизель через топливную систему, а на генератор – через систему возбуждения.

1.1.2. Характеристики системы регулирования скорости и генератора в составе ДГА

Качество электроэнергии на судне в статических и динамических режимах работы генераторных агрегатов регламентируется международными конвенциями и стандартами, правилами классификационных обществ [72,118].

Основной наклон регуляторной характеристики – РХ (статизм) 3 %. Диапазон изменения статизма плавным регулированием наклона РХ 2...5 % (не менее) – для обеспечения параллельной работы ДГ с ДГ другого типа с фиксированным наклоном РХ.

Нестабильность частоты вращения (не более) при относительной нагрузке менее 25 и 25... 100 % соответственно 1,5 и 1,0 %.

При мгновенном набросе активной нагрузки ДГ необходимо нагружать ступенями согласно ISO 8528/5 в зависимости от степени форсирования дизеля по среднему эффективному давлению. Например, для ДГ, в составе которого четырехтактный дизель имеет $p_{me} = 11,0$ бар при набросе 70 % активной нагрузки, как и при последующем набросе оставшихся 30 %, мгновенное изменение частоты вращения дизеля не должно превышать 8 % от номинальной частоты вращения, а установившаяся частота вращения по истечении 5 с после наброса нагрузки не должна отличаться от частоты вращения предшествующего режима более чем на 5 % от номинальной частоты вращения [36].

Для ДГ, в составе которого четырехтактный дизель имеет $p_{me} = 14,0$ бар, при мгновенном набросе 50 % активной нагрузки, так же как и при

дальнейшем набросе оставшихся 50 %, мгновенное изменение частоты вращения дизеля не должно быть более 10% от номинальной частоты вращения, а установившаяся частота вращения через 5 с после наброса нагрузки в этом случае не должна отличаться от частоты вращения предшествовавшего режима более чем на 5 % от номинальной частоты вращения.

При мгновенном сбросе 100 % нагрузки мгновенное изменение частоты вращения не должна превышать 10% от номинальной частоты вращения, а установившаяся частота вращения по истечении 5 с после сброса нагрузки не будет отличаться от частоты вращения предыдущего режима более чем на 5 % от номинальной частоты вращения.

Параметры при автоматическом распределении активной нагрузки во время параллельной работы агрегатов и распределении активной нагрузки по РХ ДГ с наклоном 3 % и совмещением РХ параллельно работающих агрегатов на одном режиме следующие:

- степень рассогласования нагрузки при соотношении номинальных мощностей дизелей (в составе ДГ) от 3 : 1 до 1 : 3 в диапазоне относительных нагрузок 20... 100 % не должна превышать + 10% от номинальной активной мощности наиболее мощного параллельно работающего ДГ.

- темп изменения настройки скорости в диапазоне 95...105 % номинальной частоты вращения при дистанционном управлении равен $(0,7 \pm 0,2)$ % от номинальной частоты вращения в секунду.

- дистанционное управление частотой вращения обеспечивается в пределах 95...105 % от номинальной.

Синхронный генератор переменного тока для установки на судах неограниченного района плавания (в составе ДГ), предназначенный для работы в качестве источника электроэнергии трехфазного переменного тока, обеспечивает надежную работу при:

- температуре окружающей среды -10...+45 °С; в случае ее повышения до 50 °С мощность генератора должна быть снижена на 5 %;

– относительной влажности воздуха (75 ± 3) и (95 ± 3)% при температуре соответственно ($45 + 2$) и (25 ± 2) °C (верхнее значение 98 % при 35 °C);

– длительном крене до 22,5 % и дифференте до 10°, а также при одновременном крене и дифференте;

– бортовой качке до 22,5° с периодом 7...9 с и килевой качке до 10° от вертикали;

– вибрации с частотой 5...80 Гц с амплитудой 1 мм - для частот 5... 13,2 Гц, с ускорением 7 м/с^2 (0,7g) при частотах 13,2...80 Гц;

– ударах с ускорением 30 м/с^2 (3g) при частоте 40...80 ударов/мин;

– эпизодических кратковременных сотрясениях с интенсивностью, эквивалентной статической нагрузке до 15g в вертикальном направлении и до 5g в горизонтальном.

Коэффициент мощности генератора ($\cos\varphi$) равен 0,8, соединение фаз - звезда с выведенной нулевой точкой.

Генератор, работающий в установившемся номинальном режиме, должен допускать следующие перегрузки по току статора, %:

– 10 в течение 1 ч при $\cos\varphi = 0,8$;

– 25 в течение 10 мин при $\cos\varphi = 0,7$;

– 50 в течение 2 мин при $\cos\varphi = 0,6$.

При этом точность поддержания напряжения ± 10 % от номинального напряжения. Суммарное время работы в режимах перегрузки не более 10 % от ресурса.

Режим работы генератора продолжительный. Он должен допускать длительную работу при несимметричной нагрузке фаз, если токи в фазах не превышают номинального и разность токов (небаланс) в фазах не более ± 20 %. При этом коэффициент небаланса напряжений не должен превосходить 5 %.

Генератор (в составе ДГ) в режиме холостого хода должен обеспечивать пуск прямым включением асинхронного короткозамкнутого

двигателя (мощность до 40 % от номинальной мощности генератора) с присоединенным маховым моментом инерции GD^2 включаемого двигателя.

Генератор должен допускать включение на параллельную работу методом самосинхронизации. При этом методе синхронизации проводится подгонка частоты и напряжения подключаемого ДГ с работающим ДГ к общим шинам, гасится поле возбуждения подключаемого генератора. Одновременно с подключением ДГ к шинам ГРЩ (главного распределительного щита) судовой электростанции снимается гашение поля возбуждения. Частота вращения подключаемого ДГ должна быть надсинхронной, чтобы избежать недопустимой величины обратной мощности подключаемого генератора, что приведет к срабатыванию защиты генератора и его отключению от общих шин (развалу параллельной работы) [36].

Метод синхронизации при включении ДГ на параллельную работу очень удобен (при автоматизации операций) тем, что можно до синхронизации вывести ДГ на требуемые обороты холостого хода по заданной РХ (путем фиксации этой частоты вращения конечным выключателем регулятора скорости или посредством пуска ДГ при уже фиксированной настройке верхней опоры пружины измерителя скорости регулятора дизеля). Это автоматически обеспечивает распределение активной нагрузки между параллельно работающими ДГ.

Наиболее распространенный метод точной синхронизации при включении ДГ на параллельную работу (равенство частот вращения и напряжения, согласованность фаз, нулевая огибающая напряжения) приводит к тому, что после подключения ДГ к общим шинам его активная мощность будет близка к нулевой величине и, чтобы распределить равномерно нагрузку между работающими ДГ в параллель, необходимы специальные автоматические устройства, воздействующие на серводвигатель регулятора скорости ДГ, подключенного к общим шинам (или распределение активной нагрузки между ДГ вручную или дистанционными кнопками “больше” —

“меньше”).

Генератор должен допускать длительную работу на тиристорную нагрузку до 50 % от мощности генератора.

Коэффициент искажения синусоидальной кривой линейного напряжения при холостом ходе и номинальном напряжении генератора не более 5 %.

Генератор, включая систему регулирования напряжения, выдерживает без каких-либо повреждений трехфазное короткое замыкание в режиме любой нагрузки в течение 5 с, одно- и двухфазное короткое замыкание в течение 2 с. Соотношение ударного тока короткого замыкания генератора к номинальному не превышает 15. Значение установившегося тока короткого замыкания генератора не менее трехкратного номинального тока.

После прекращения короткого замыкания номинальное напряжение с установившимся отклонением напряжения $\pm 2,5$ % восстанавливается за время не более 0,8 с. При этом величина всплеска напряжения не превышает 20 % от номинального.

Генератор имеет бесщеточную систему возбуждения с устройством управления и регулирования.

Начальное самовозбуждение генератора происходит без применения постороннего источника при частоте вращения 90 % от номинальной.

Система автоматического регулирования напряжения (АРН) обеспечивает:

- установившееся отклонение напряжения не более 2 % при неизменном положении органов уставки, плавном изменении нагрузки от 0 до 100 % от номинальной, коэффициенте мощности ($\cos\varphi$) 0,6...0,9 с учетом изменения теплового состояния от холодного до установившегося прогретого и изменении частоты вращения от 95 до 105 % номинальной;

- мгновенное отклонение напряжения генератора при набросе и сбросе 60 % нагрузки по току с $\cos\varphi = 0,4$ и менее (при номинальной частоте вращения) не более -15 и + 20 % соответственно; время восстановления

напряжения генератора с отклонением $\pm 3 \%$ от номинального значения - не более 1,5 с;

- изменение уставки автоматически регулируемого напряжения не менее $\pm 5 \%$ от номинального с отклонением 1 % при любой нагрузке;

- плавное изменение статической характеристики регулирования напряжения в диапазоне 0...5 % (для обеспечения точности распределения реактивных нагрузок между параллельно работающими ДГ, в том числе разных типов);

- неравномерность распределения реактивной нагрузки при работе со статизмом не более +10 % от номинальной реактивной мощности большего из параллельно работающих ДГ (соотношение их мощностей от 1 : 3 до 3 : 1, используемые в составе одной судовой электростанции генераторы имеют аналогичные системы возбуждения по точности регулирования и быстродействию, одинаковый статизм напряжения по реактивной мощности).

Генератор без повреждений и остаточных деформаций выдерживает повышение частоты вращения на 20 % сверх номинальной в течение 2 мин.

Снижение частоты вращения ниже 85 % от номинальной не вызывает выхода из строя элементов системы возбуждения и АРН.

Допускаемый уровень промышленных радиопомех, создаваемый генератором, не должен превышать уровень напряжения помех, допустимых для устройств, расположенных выше главной палубы судна.

Все вышеприведенные показатели являются минимальными и, поэтому, фактические показатели качества электроэнергии, вырабатываемой на судне, могут быть улучшены, если есть на то основания и необходимость.

Существуют также требования по времени затухания переходного процесса, статической ошибке, надежность действия системы, простоте и удобству обслуживания, массе и габаритам. Такое большое количество требований и критериев, которые часто противоречат друг другу,

существенно осложняют решение задачи регулирования частоты и напряжения судовой сети.

1.1.3. Автоматические регуляторы частоты вращения

Автоматические регуляторы частоты вращения принято классифицировать следующим образом [4,94,130]:

- по осуществляемому закону регулирования, т.е. основной зависимости перемещения топливной рейки от изменения частоты вращения двигателя – пропорциональные, интегральные, пропорционально – интегральные, пропорционально – дифференциальные, пропорционально – интегрально – дифференциальные;
- по назначению и режимности работы – однорежимные, двухрежимные, всережимные, предельные;
- по виду регуляторной характеристики – статические, астатические;
- по типу измерительной части регулятора – механические, гидравлические, электрические;
- по источнику энергии для выходного сигнала, перемещающего топливную рейку – прямого, непрямого действия (гидравлическими, пневматическими, электрическими, комбинированными);
- по типу обратных связей – с жесткими и гибкими обратными связями;
- по количеству подаваемых входных сигналов – одноимпульсные и двухимпульсные.

Для регулирования частоты вращения дизелей на судах широко применяются двухимпульсные регуляторы (Р-23(Б), УРЧН, ПРЧ1-М). Во всех них используется метод ведущего генератора для поддержания частоты напряжения судовой сети.

В двухимпульсных регуляторах частоты вращения Р-23Б используется гидравлический регулятор Вудварта с жёсткой отрицательной обратной связью по частоте вращения дизеля. С течением времени изнашивается

пружина центробежного датчика скорости, в результате релаксации металла жёсткость её уменьшается на 20%. Качество работы регулятора сильно зависит от качества масла и состояния трущихся поверхностей в гидроцилиндрах. Вследствие этого изменяются характеристики самого регулятора так, что возникают автоколебания частоты вращения дизеля в переходных процессах [6,40].

САР частоты на базе Р-23 работает при неизменных линейных напряжениях. При отключении обратной связи, а также при малых значениях коэффициента обратной связи, система работает неустойчиво. "При асимметрии нагрузки по фазам статическая погрешность по частоте достигает 0,3%. Зависимость хода рейки топливного насоса от нагрузки нелинейная и это вызывает статическую погрешность 0,7%. Суммарная статическая погрешность по регулированию частоты может достигать 1%" [24,40].

В двухимпульсных регуляторах частоты с устройством измерения нагрузки в виде фильтра тока прямой последовательности, форма выходного сигнала, который подаётся на обмотку электромагнита гидравлического сервопривода рейки топливного насоса, и его среднее значение зависят от нагрузки. Однако, пульсации магнитного потока из-за искажения формы сигнала могут вызывать дребезг якоря электромагнита сервопривода. Это приводит к колебаниям частоты вращения генератора, особенно при резком изменении нагрузки. САР частоты напряжения статическая. Ошибка регулирования частоты вращения дизеля в статическом режиме не нулевая [24,40]. Наличие магнитного усилителя в двухимпульсных электрических регуляторах частоты является причиной возникновения автоколебаний.

Прибор автоматической стабилизации частоты типа ПРЧ-1М представляет собой статический импульсный регулятор частоты вращения дизеля. В нем имеется трансформаторный формирователь сигнала биений. Фильтр, выделяющий из сигнала биений огибающую, смещает по фазе огибающую и не даёт ей опуститься до нуля. Из-за этого возникает

значительная статическая ошибка регулирования частоты напряжения, в особенности при работе в параллель разнотипных генераторов. Д-звено в составе ПРЧ-1М чувствительно к помехам.

В регуляторе РЧМ-50, используемого для управления ведущим генератором, содержится И-звено по частоте. Переходный процесс при регулировании частоты вращения зависит от значения электрической нагрузки, типа и параметров СГ. Для увеличения быстродействия регулятора в него введено ПД-звено, чтобы компенсировать инерционность приводного двигателя. САР частоты может удовлетворительно работать только для дизелей без турбонаддува.

1.1.4. Системы автоматического регулирования напряжения

По принципу действия все системы автоматического регулирования напряжения делят на следующие типы [4,43,48,54,66,124,132]:

- системы, действующие по возмущению – току нагрузки генератора I_{Γ} : системы токового компаундирования, у которых ток $I_{\text{в}}$ определяется U_{Γ} , I_{Γ} , т.е. $I_{\text{н}} = f(U_{\Gamma}, I_{\Gamma})$; системы фазового компаундирования, у которых ток $I_{\text{в}}$ определяется $U_{\Gamma}, I_{\Gamma}, \cos \varphi$, т.е. $I_{\text{в}} = f(U_{\Gamma}, I_{\Gamma}, \cos \varphi)$.

- системы, действующие по отклонению регулируемой величины (U_{Γ}), у которых ток $I_{\text{в}} = f(U_{\Gamma}, \Delta U)$ где $\Delta U = U_{\Gamma} - U_{\Gamma.н.}$

- комбинированные системы, действующие одновременно по возмущению и отклонению.

По способу воздействия на обмотку возбуждения генератора все системы делят на: системы прямого регулирования и системы косвенного регулирования.

В системах регулирования напряжения и реактивной нагрузки УБК-М, для генераторов серии МСС, регуляторов электромеханического завода им. М. И. Калинина, генераторов серии МСК завода "Электросила" им. С.М. Кирова, генераторов типа ГМС, применяются трансформаторы фазового компаундирования и магнитные усилители. Они вносят существенные

нелинейности и запаздывания в работу САУ напряжением [24,40,43,48], что приводит к возникновению автоколебаний в судовой сети. В УБК-М наличие возбудителя уменьшает быстродействие регулирования и надёжность САУ в целом. Система статическая, что приводит к статической ошибке по регулированию напряжения генератора. Зависимость выходного тока трансформатора компаундирования от напряжения генератора нелинейная.

Регуляторы возбуждения генераторов серии МСС статические. Статическая погрешность по напряжению 2,5% [24,40].

В системе самовозбуждения и автоматического регулирования напряжения генераторов электромеханического завода им. М.И. Калинина, в качестве элемента сравнения фактического напряжения генератора с заданным, применяется стабилитрон. Вольт-амперная характеристика стабилитрона сильно зависит от температуры, что обуславливает статическую ошибку регулирования напряжения более 1%.

Системы возбуждения и автоматического регулирования напряжения TUR/A у генераторов серии ГМС статические по регулированию напряжения и реактивной мощности. "Кроме того, в TUR/A не вырабатываются импульсы регулирования по току, поэтому, при КЗ ток возбуждения уменьшается ещё до срабатывания защиты, что усложняет его настройку. Опыт эксплуатации показывает, что при изготовлении регулятора неправильно выбран тепловой режим элементов" [24,40].

Система возбуждения и автоматического регулирования напряжения бесщёточных генераторов серии 2СН статическая по регулированию тока и напряжения генератора.

Система возбуждения и автоматического регулирования напряжения бесщёточных генераторов серии СБГ 1600 статическая по регулированию реактивного тока генератора. В блоке регуляторов установлен магнитный усилитель, который вносит нелинейные искажения и вызывает автоколебания при регулировании напряжения.

1.2. Параллельная работа генераторных агрегатов

1.2.1. Преимущества и недостатки параллельной работы

Основным режимом работы для генераторных агрегатов является их параллельная работа на общие шины главного распределительного щита. Для включения синхронных генераторов на параллельную работу необходимо выполнение следующих условий:

1. Формы кривых мгновенных напряжений генераторов должны быть одинаковыми.
2. Действительные значения напряжений должны быть равны,
3. Напряжения должны совпадать по фазе.
4. Частоты должны быть одинаковыми.
5. Порядок чередования фаз у генераторов должен быть один и тот же.

Параллельная работа генераторных агрегатов дает следующие преимущества: рациональное использование вырабатываемой электроэнергии, обеспечение надежности электростанции, работы агрегатов с наивысшими коэффициентами полезного действия и возможности ремонта отдельных агрегатов, экономию топлива и ресурса агрегатов.

Основными недостатками параллельной работы генераторных агрегатов является увеличение токов короткого замыкания и соответствующее повышение требований к разрывной способности коммутационной и защитной аппаратуры размещенной на ГРЩ, однако важнее всего становится необходимость решения задач, связанных с обеспечением соответствующего распределения нагрузки между генераторами и устойчивости их работы.

Обеспечение качественной параллельной работы генераторных агрегатов переменного тока представляет собой достаточно сложную задачу, прежде всего из-за необходимости распределения между ними активной и реактивной мощностей [1,2,7,20,113]. Точность распределения активной и реактивной мощностей при параллельной работе судовых дизель-генераторных агрегатов необходима в первую очередь для устойчивой

работы электростанции [36,44,52,63,104,137,138]. Каждый дизель-генераторный агрегат имеет в своем составе регулятор частоты вращения дизеля и регулятор напряжения генератора, воздействуя на которые вручную, либо с помощью систем автоматического управления добиваются равномерного распределения мощностей. Однако, не смотря на множество систем автоматики, качество электроэнергии, вырабатываемой судовыми электростанциями, а значит, точность и стабильность распределения мощностей при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов не всегда можно считать даже удовлетворительными, особенно в случае многогенераторных электростанций. В результате даже на судах с классом автоматизации А1 при некоторых переходных режимах имеют место случаи полного обесточивания, а на судах с меньшим классом автоматизации наблюдаются проблемы и в установившихся режимах работы судовой электростанции.

1.2.2. Распределение активной нагрузки

После подключения генератора на параллельную работу его нагрузка равна нулю. Распределение активной нагрузки между параллельно работающими синхронными генераторами производится регулированием вращающего момента на валу генератора. При изменении вращающего момента ротор генератора смещается относительно статора, что определяет величину активной мощности генератора. Изменение вращающего момента производится регулированием подачи топлива в приводной двигатель с помощью серводвигателя регулятора скорости вращения.

Равномерность распределения зависит от наклона (статизма) характеристик [4, 96] (рис. 1.3).

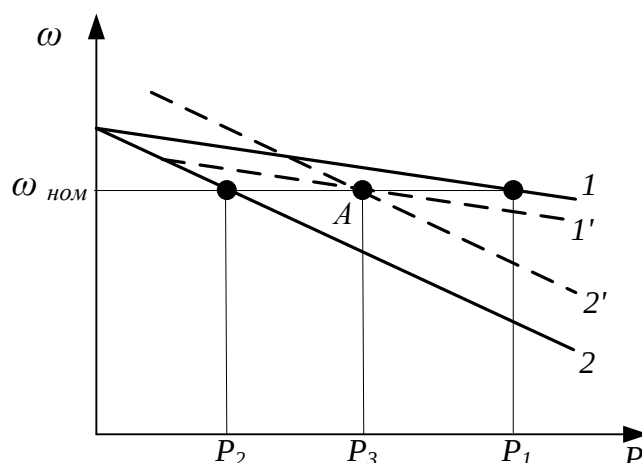


Рис. 1.3. Регуляторные характеристики приводных двигателей СГ при распределении активных нагрузок

Пусть для двух приводных двигателей по отдельности были сняты регуляторные характеристики 1 и 2. После включения генераторов на параллельную работу их угловые скорости должны быть одинаковы и равны номинальной угловой скорости $\omega_{ном}$. Как следует из рис. 1.3, одинаковой угловой скорости $\omega_{ном}$ соответствуют разные значения активной мощности генераторов P_1 и P_2 , характеристике с меньшим наклоном соответствует большая активная нагрузка генератора.

Таким образом, при одинаковой (номинальной) частоте вращения $\omega_{ном}$ активная нагрузка первого генератора составляет P_1 , а второго - P_2 , причем $P_1 > P_2$.

Для распределения активной нагрузки и одновременного поддержания частоты генераторов необходимо увеличить подачу топлива на ГА, имеющий меньшую нагрузку, и одновременно уменьшить подачу топлива на ГА большей нагрузкой. Тогда регуляторные характеристики переместятся параллельно самим себе: характеристика 2 второго ГА вверх, а характеристика 1 первого ГА вниз. Изменение подачи топлива следует прекратить в момент пересечения характеристик в точке А. Каждый генератор будет нагружен одинаковой мощностью: $P_3 = (P_1 + P_2) / 2$.

Важной особенностью систем автоматического распределения активной нагрузки является выделение так называемого базового генератора, у которого исключают воздействие серводвигателя на топливную рейку дизеля. По этой причине положение регуляторной характеристики базового генератора не изменяется.

Выделение базового генератора связано с тем, что без него частота системы из нескольких параллельно работающих СГ становится неопределенной и произвольно изменяется в обе стороны от номинальной. Переходный процесс становится колебательным, а работа системы распределения нагрузки - неустойчивой.

По отношению к базовому остальные генераторы являются ведомыми.

При автоматическом распределении активной нагрузки (рис. 1.4а) используют датчики активного тока $B1$ и $B2$, подключаемые к генераторам через трансформаторы напряжения $TV1$ и $TV2$ и трансформаторы тока $TA1$ и $TA2$. Выходы этих датчиков соединены последовательно, а напряжения на выходах направлены встречно. Такой способ соединения выходов называют дифференциальной схемой.

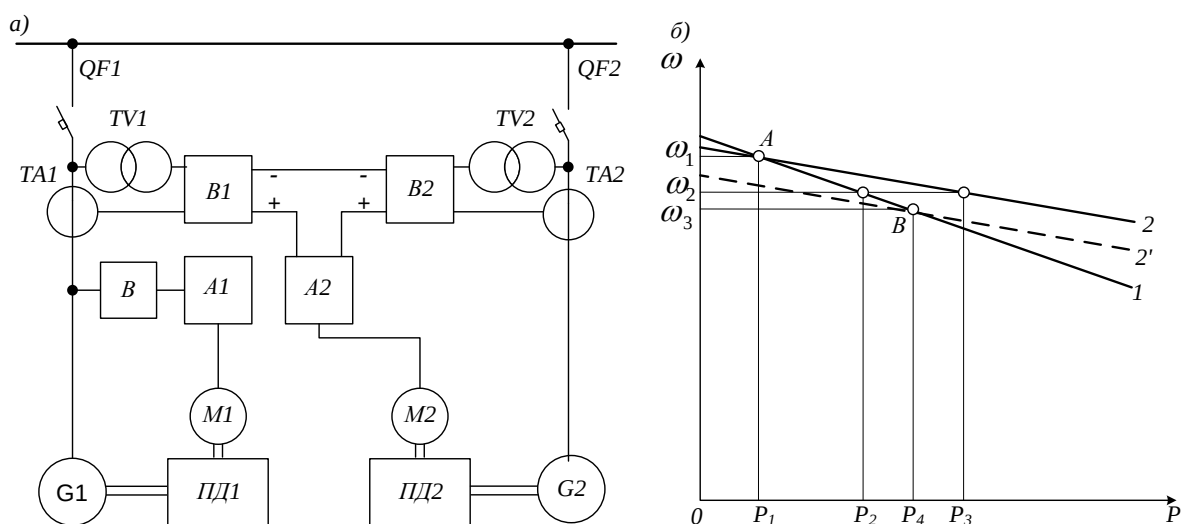


Рис. 1.4. Система автоматического распределения активных нагрузок СГ:

а – структурная схема; б – регуляторные характеристики приводных двигателей СГ

Результирующий сигнал в виде напряжения определенного значения и полярности поступает на вход усилителя $A2$, на выход которого подключен серводвигатель $M2$ приводного двигателя подстраиваемого генератора $G2$.

Серводвигатель $M1$ приводного двигателя базового генератора $G1$ не связан с усилителем $A2$, что исключает воздействие на него со стороны системы автоматического распределения активных нагрузок.

В исходном состоянии базовый $G1$ и подстраиваемый $G2$ генераторы нагружены каждый мощностью P_1 , т. е. общая нагрузка составляет $2P_1$. Этому состоянию соответствует точка A (рис. 1.4б). При увеличении общей нагрузки до значения $(P_2 + P_3)$ угловая скорость обоих генераторов уменьшится до ω_2 и нагрузка базового генератора составит P_2 , подстраиваемого - P_3 . Равновесие между напряжениями на выходах датчиков $B1$ и $B2$ нарушится, поэтому серводвигатель $M2$ начнет уменьшать подачу топлива дизеля $ПД2$. Регуляторная характеристика 2 подстраиваемого генератора переместится вниз и займет положение характеристики 2'. Новое состояние равновесия наступит в точке B пересечения характеристик 1 и 2'. При этом положение регуляторной характеристики базового генератора не изменилось. Каждый генератор нагружен одинаковой мощностью: $P_4 = (P_2 + P_3) / 2$.

Угловая скорость обоих генераторов также одинакова и составляет ω_3 .

Наличие люфтов регуляторов частоты вращения ПД генераторов приводит к тому, что нагрузки параллельно работающих генераторов распределяются с некоторой погрешностью ΔP , значение которой не должно превышать $\pm 10\%$ номинальной активной мощности наибольшего генератора.

Недостатком рассмотренной схемы автоматического распределения активной нагрузки является изменение частоты вращения СГ при изменении нагрузки.

При параллельной работе генераторных агрегатов идеальное распределение активной нагрузки можно создать только в случае совпадения их регуляторных характеристик, однако добиться этого, не смотря на многообразие регуляторов частоты вращения, практически невозможно. Это связано с тем, что жесткости пружин однопольных регуляторов различны, отличаются характеристики топливной аппаратуры и, самое главное, каждый регулятор имеет зазор, в пределах которого частота может произвольным образом отклоняться от заданной, нелинейными оказываются и характеристики других элементов системы автоматического регулирования частоты вращения, в том числе из-за люфтов, механического износа соприкасающихся частей и технологической разницы параметров [94].

1.2.3. Распределение реактивной нагрузки

Распределение реактивной нагрузки при параллельной работе СГ проводится путем изменения тока возбуждения генераторов [96]: у перегруженного генератора ток возбуждения уменьшают, а у недогруженного - увеличивают. От тока возбуждения зависит величина ЭДС в обмотке статора и, следовательно, величина реактивной нагрузки.

При ручном перераспределении реактивных нагрузок (если нет АРН или он не работает) токи возбуждения изменяют при помощи ручных регуляторов возбуждения. При наличии АРН распределение реактивных нагрузок осуществляется автоматически, при помощи компенсаторов реактивной нагрузки.

Равномерность распределения зависит от наклона внешних характеристик СГ [4,96], причем меньшему наклону характеристики соответствует больший ток нагрузки, что следует из сравнения внешних характеристик 1 и 2 (рис. 1.5).

Пусть для каждого из генераторов по отдельности были сняты внешние характеристики 1 и 2. После включения генераторов на параллельную работу

их угловые скорости должны быть одинаковы и равны номинальной угловой скорости $\omega_{\text{ном}}$

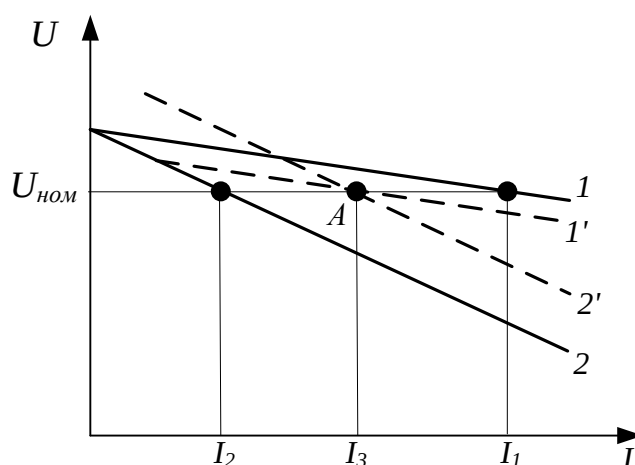


Рис. 1.5. Внешние характеристики СГ при распределении реактивных нагрузок

Одинаковой угловой скорости $\omega_{\text{ном}}$ соответствуют разные значения тока генераторов, а именно: для генератора с внешней характеристикой 1 это значение равно I_1 , а для генератора с характеристикой 2 – I_2 .

При этом меньшему наклону (меньшему статизму) характеристики соответствует больший ток нагрузки генератора, что следует из сравнения внешних характеристик 1 и 2.

При одинаковом номинальном напряжении $U_{\text{ном}}$ ток нагрузки первого генератора составляет I_1 , а второго – I_2 , причем $I_1 > I_2$.

Для распределения реактивной нагрузки и одновременного поддержания напряжения СГ неизменным необходимо увеличить ток возбуждения генератора с меньшим током нагрузки и одновременно уменьшить у генератора с большим током нагрузки.

При этом внешние характеристики СГ переместятся параллельно самим себе: характеристика 2 вверх, а характеристика 1 вниз. Изменение

токов возбуждения необходимо остановить в точке A с равной реактивной нагрузкой.

Для обеспечения равномерного распределения реактивной нагрузки необходимо полное соответствие внешних характеристик генераторов, но оно не всегда осуществимо. Практическое распространение для распределения реактивных токов имеют уравнительные соединения в роторных цепях синхронных генераторов и дополнительные устройства, воздействующие на корректоры напряжения.

Для однотипных генераторов с одинаковым номинальным напряжением возбуждения уравнительную связь устанавливают между обмотками возбуждения, т. е. на стороне постоянного тока. При замыкании контактов обмотки возбуждения соединяются параллельно, поэтому любое изменение напряжения на одной из них автоматически приводит к такому же изменению напряжения на другой.

Уравнительные соединения применяют также на стороне переменного тока. Для СГ одинаковой мощности могут быть установлены уравнительные соединения между выходными обмотками компаундирующих трансформаторов. При замыкании контактов эти обмотки соединяются параллельно, поэтому изменение напряжения на одной из них вызовет такое же изменение напряжения на другой.

1.2.4. Современные системы управления параллельной работой СГ

Датская фирма Selco является мировым лидером в области проектирования и изготовления современных систем автоматического управления судовыми электростанциями. Рассмотрим одну из последних ее разработок в данной области модуль С6200 серии Flexgen.

Модуль С6200 (рис. 1.6) представляет собой комбинированный синхронизатор и распределитель нагрузки для параллельно работающих генераторов. Данный модуль можно применять везде, где требуется

обеспечить работу генераторов в параллель друг с другом или с энергосистемой.

Для упрощения ввода в эксплуатацию на фронтальной панели модуля расположен синхроскоп. С6200 также обеспечивает защиту генератора от обратной мощности и потери возбуждения.

В наличии имеются 8 комплектов вспомогательных программируемых входов и выходов. Они могут использоваться для таких вспомогательных функций, как внешняя команда на начало синхронизации или плавное изменение нагрузки.

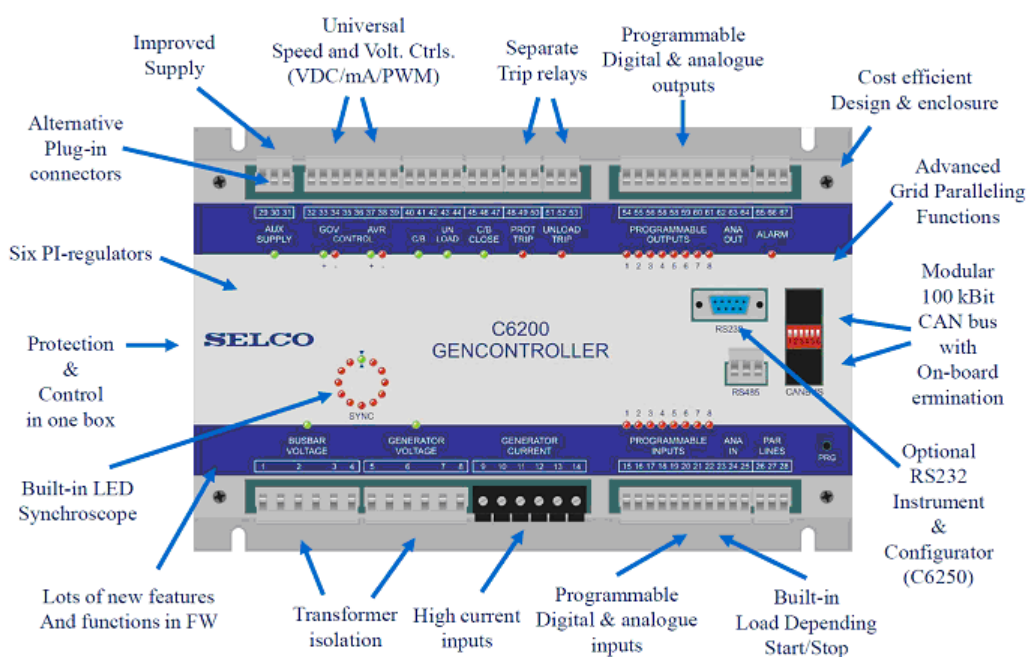


Рис. 1.6. Модуль Selco C6200

Интерфейс RS485 Modbus позволяет считывать состояние модуля или осуществлять внешнее управление модулем, например при помощи программируемого логического контроллера (PLC). Аналоговый выход можно использовать для индикации текущих измеряемых величин, таких как нагрузка или частота генератора.

Пользовательский интерфейс модуля С6200 можно подключить через шину CAN.

Легко доступные модульные соединители расположены на передней панели модуля.

Основные характеристики блока:

- комбинированный синхронизатор и распределитель нагрузки;
- синхроскоп на передней панели;
- защита от обратной мощности;
- защита от потери возбуждения;
- восемь вспомогательных программируемых входов и выходов;
- интерфейс MODBUS RS485;
- шина CAN для вспомогательного интерфейса пользователя;
- прямое управление электронным регулятором скорости вращения;
- импульсные выходные сигналы “увеличить/уменьшить” для управления

скоростью вращения и напряжением.

Кратко охарактеризуем организацию работы блока в интересующих нас режимах работы.

1. Управление скоростью вращения.

В модуле С6200 два комплекта выходов управления скоростью вращения, через которые осуществляется управление синхронизацией и распределением активной нагрузки (кВт): Если двигатель снабжен электронным регулятором скорости, для управления скоростью используется аналоговый выход. Выходным сигналом может быть сигнал тока, напряжения или ШИМ-сигнал.

Можно запрограммировать тип и уровень выходных сигналов, так что они будут адаптированы к практически любым типам регуляторов, предлагаемым на рынке, таким как GAC или Woodward.

В другом случае, когда желательно управлять скоростью через приводной потенциометр или сервомотор традиционного регулятора скорости, можно использовать комплект выходов с открытым коллектором.

2. Управление напряжением.

В модуле С6200 два комплекта выходов управления напряжением, через которые осуществляется управление напряжением и распределением реактивной нагрузки (кВАр): Автоматический регулятор напряжения (АРН) или синхронный генератор переменного тока могут управляться посредством аналогового сигнала (сигнал напряжения, тока или ШИМ-сигнал).

Можно запрограммировать тип и уровень выходных сигналов, так что они будут адаптированы к практически любым типам регуляторов напряжения, предлагаемым на рынке.

В случае, когда для управления АРН используется приводной потенциометр, следует использовать комплект выходов с открытым коллектором. Выходы с открытым коллектором тогда будут управлять реле, которые управляют приводным потенциометром.

3. Синхронизация.

В случае, когда для управления скоростью используются контакты “увеличить/уменьшить” синхронизация осуществляется в соответствии с принципами динамической синхронизации. Это значит, что частота подключаемого будет несколько выше частоты шины, к которой он подключается.

Такое подключение обеспечивает немедленную нагрузку на подключаемый генератор без появления обратной мощности.

Если используются аналоговые выходы, синхронизация осуществляется в соответствии с принципами статической синхронизации.

Частота и фазовый угол подстраиваются таким образом, чтобы параметры подключаемого генератора соответствовали параметрам шины (частота подключаемого генератора равна частоте шины). Это возможно, поскольку при использовании аналогового выхода регулировка осуществляется намного быстрее. Распределитель нагрузки нагружает генератор сразу после подключения, что позволяет избежать появления обратной мощности.

Во время синхронизации С6200 подстраивает напряжение генератора под напряжение шины.

4. Распределение активной нагрузки.

Функция распределения нагрузки обеспечивает пропорциональное распределение активной нагрузки между всеми генераторами. Нагрузка распределяется пропорционально номинальной мощности генератора.

Можно подстраивать нагрузку, если коэффициент нагрузки генератора должен отличаться от коэффициента нагрузки других генераторов.

5. Распределение реактивной нагрузки.

Функция распределения нагрузки обеспечивает пропорциональное распределение реактивной нагрузки между всеми генераторами, работающими в параллель. Нагрузка распределяется пропорционально номинальной мощности генератора.

Также можно настраивать отклонение от пропорциональной нагрузки.

6. Защита от обратной мощности.

Модуль С6200 снабжен функцией защиты от обратной мощности с фиксированными временными характеристиками.

Можно задать уровень отключения в процентах (%) от номинальной мощности и задержку отключения в секундах (с).

Модуль снабжен двумя размыкающими реле, одно для защитного отключения, другое для операционного отключения (разгрузка). Функция защиты от обратной мощности активирует реле защитного типа.

7. Защита от потери возбуждения.

Если генераторы работают параллельно, их выходные напряжения равны. Если один из генераторов теряет возбуждение, появляется обратный индуктивный ток. При этом создается реактивная нагрузка на остальные генераторы, что ведет к снижению напряжения в шине. Это может привести к отключению всех подключенных генераторов из-за низкого напряжения и вызвать “блэкаут” (полное обесточивание).

Для предотвращения этого С6200 измеряет уровень и направление реактивного тока. Если реактивный ток течет в обратном направлении дольше определенного времени, размыкается выключатель неисправного генератора. Все остальные генераторы продолжают работать, что позволяет избежать “блэкаута”.

Задаваемые параметры – уровень отключения в процентах (%) от номинальной мощности в обратном направлении и задержка отключения в секундах. Если время, в течение которого превышает уровень отключения дольше, чем заданное время задержки, срабатывает выходное защитное реле.

8. Вспомогательные программируемые входы/выходы.

С6200 оборудован 8 программируемыми входами и 8 программируемыми выходами, которые можно использовать для таких функций, как индикация или защитное отключение внешние команды на начало синхронизации или распределение нагрузки и ручное управление скоростью и напряжением.

Таким образом, модуль С6200 фирмы SELCO обеспечивает интегрированную стабилизацию частоты, напряжения, проверку/автоматическую синхронизацию, распределение активной/реактивной нагрузки, интегрированную защиту, основные и программируемые входы/выходы и сбор данных. Наконец, модуль С6200 работает, как интерфейс для дополнительного модуля пользовательского интерфейса S6500.

Контроллер генератора С6200 также снабжен программируемыми входами/выходами. В модуле С6200 сделан акцент на настройке под требования заказчика, что позволяет успешно применять продукцию SELCO в самых различных конфигурациях электрооборудования и в условиях, когда распределительные щиты становятся все более интегрированными. Модуль С6200 может работать в полностью автоматическом режиме или в полуавтоматическом, что позволяет осуществлять внешнее управление всеми функциями.

Итак, подробно рассмотрев модуль С6200 мы не находим в нем функции контроля и уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности при параллельной работе генераторных агрегатов. Их отсутствие в этой и других разработках подтвердила директор восточного направления фирмы SELCO Анна Рассмусен.

1.3. Обменные колебания мощности

В требованиях классификационных обществ, морских конвенций, международного стандарта ISO 8528 отсутствуют требования по обеспечению показателей качества параллельной работы дизель-электрических агрегатов переменного тока. Однако, как показывает опыт эксплуатации современных морских судов, кроме общего требования о том, что параллельно работающие агрегаты не должны выпадать из синхронизма, необходимы критерии или нормы качества работы в параллель. Это связано с тем, что проблема обеспечения устойчивой параллельной работы имеет высокую степень сложности из-за существования обменных колебаний мощности (“перетекание мощности”) между параллельно работающими дизель-генераторными агрегатами переменного тока.

Обменные колебания мощности - это явление своеобразного перехода мощности от одного ДГ к другому с частотой, измеряемой несколькими герцами. Осциллограмма изменения активной мощности каждого из двух параллельно работающих ДГ представляет собой примерно синусоидальные кривые этого изменения с зеркальным характером, т.е. максимуму мощности одного ДГ в данный момент времени соответствует минимум мощности другого ДГ (и наоборот) [6,36].

Внешне эти колебания сопровождаются колебаниями силы тока и напряжения генераторов, что можно увидеть и по приборам; звеньев регуляторов скорости дизелей; реек топливных насосов (с большой амплитудой – вплоть до колебаний от упора до упора), которые резко

отрицательно влияют на работоспособность агрегатов. В некоторых случаях это является препятствием к нормальному функционированию судовой электростанции (величина перетекаемой мощности составляет 100 % и более с частотой 2...4 Гц и выше) [36].

Проблема существования обменных колебаний мощности между синхронными генераторами была обнаружена давно, но она не решена и до сегодняшнего дня. Можно отметить исследования этой проблемы у Болотина Б.И. и Вайнера В.Л. [6,105,106,107]. Однако наиболее полная и систематизированная информация, касающаяся современного состояния вопроса обменных колебаний мощности, собрана профессорами Лашко В.А. и Конксом Г.А. [36], которые являются ведущими специалистами в области эксплуатации судовых энергетических установок.

Эти ученые обобщили информацию по современным судовым дизель-генераторным агрегатам и представили результаты своих исследований. Остановимся на их основных моментах, без которых, безусловно, анализ параллельной работы судовых синхронных генераторов с точки зрения существования обменных колебаний мощности будет неполным.

Примером является одна из снятых ими осциллограмм (рис. 1.7) параллельной работы ДГ переменного тока мощностью 150 кВт, работающего параллельно с другим ДГ на суммарной нагрузке 25 % от номинальной.

На осциллограмме записаны изменения активной мощности P одного ДГ, колебания h рейки топливного насоса и частоты вращения коленчатого вала дизеля n .

Амплитуда обменных колебаний мощности достигает 150...180 кВт, а частота обменных колебаний составляет 4,0 Гц (т.е. ДГ несколько раз в секунду переходят в двигательный режим работы) с величиной обратной мощности 100 % от номинальной мощности ДГ. Колебания рейки топливного насоса составляют около 100 % от хода рейки от нулевой подачи топлива до подачи на нагрузке 110 %.

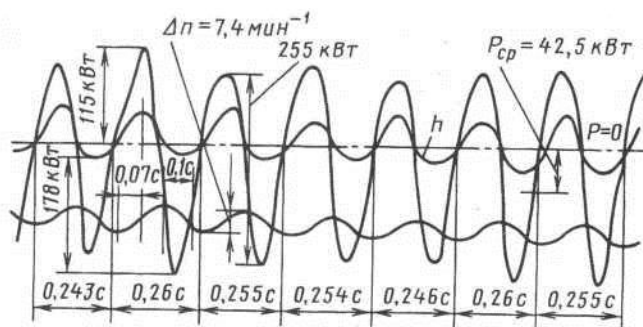


Рис. 1.7. Осциллограмма параллельной работы ДГ:

P_{cp} – средняя нагрузка генератора; $P = 0$ – переход генератора в двигательный режим работы; Δn – изменение частоты вращения дизеля;
 h – ход рейки топливного насоса дизеля

Становится очевидным невозможность нормальной параллельной работы генераторных агрегатов и надежной работы двигателей при такой амплитуде обменных колебаний. Задача уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности может быть решена проектантами ведущих мировых фирм в области конструирования судовых дизель-генераторных агрегатов и электростанций только после глубокого и всестороннего исследования природы и причин их возникновения и решаться эта задача должна, безусловно, еще на стадии проектирования и разработки, а никак не после спуска судов на воду и сдачи их в эксплуатацию. Также необходимо определиться с допустимыми критериями обменных колебаний, так как необходимо знать до какого уровня их нужно снижать.

Для формулировки критериев устойчивости нужно проанализировать причины появления и существования обменных колебаний мощности между ДГ, работающими в параллель, и разработать методы их снижения до допустимой величины, поскольку полностью избавиться от обменных колебаний мощности невозможно.

В настоящее время ученые, которые проводят исследования в данном направлении, и специалисты, эксплуатирующие судовые энергетические установки и электростанции выделяют следующие задачи, имеющие

непосредственное отношение к природе обменных колебаний [36]:

1) анализ вынужденных колебаний вследствие возмущающих моментов дизеля классических гармоник, а также возмущений, вызванных работой топливной аппаратуры двигателя, и собственных колебаний системы параллельно работающих ДГ, чтобы оценить околорезонансный характер обменных колебаний и найти технические решения для ухода от совпадения частот вынужденных и собственных колебаний системы ДГ, работающих в параллель;

2) влияние системы регулирования скорости на величину обменных колебаний (например, при совпадении частот колебаний измерителя скорости регулятора и колебаний системы ДГ, что может привести к автоколебаниям элементов регулятора, реек топливных насосов и т.д.);

3) влияние элементов синхронного генератора (система регулирования напряжения, демпфирование и др.) на развитие или подавление обменных колебаний активной мощности;

4) общий анализ устойчивости системы параллельно работающих ДГ на основе оценки амплитудно-фазовых характеристик (АФХ) динамических звеньев системы (например, на основе частотного критерия Найквиста);

5) выбор конструктивных элементов сложной структурной схемы параллельной работы ДГ с оптимизацией величины обменных колебаний активной мощности между ДГ за счет эффективных технических решений.

Первая из перечисленных задач сводится прежде всего к выявлению спектра возмущающих сил дизеля и частоты собственных колебаний системы ДГ, работающих в параллель.

Поскольку частота собственных колебаний системы параллельно работающих дизель-электрических агрегатов (с учетом влияния синхронной связи между ними, величин моментов инерции маховых масс ДГ) у современных ДГ (со степенью неравномерности вращения $1/200 \dots 1/300$) находится в пределах $2 \dots 6$ Гц, то наибольший интерес для четырехтактных дизелей вызывают $1/2$ классическая гармоника вынужденных колебаний

коленчатого вала дизеля ($n/120$ Гц, где n - частота вращения, мин^{-1}), связанная с проявлением неустойчивости работы по цилиндрам двигателя (например, выпадение одного цилиндра) и существование возмущающих сил со спектром ниже частоты $1/2$ гармоника, что может быть обусловлено эффектом работы конкретной топливной аппаратуры дизелей [36].

Исследования показывают, что особое значение для формирования спектра возмущающих сил низкого порядка в дизеле ($n/240$, $n/360$, $n/480$) имеют характер изменения остаточного давления топлива в трубопроводе высокого давления между ТНВД и форсункой и отсечка подачи топлива во всасывающую полость высокого давления, зависящие от конструктивных и гидродинамических параметров топливной аппаратуры, ее частотных характеристик [36]. Неустойчивость впрыска топлива от цикла к циклу и ее влияние на характер и частоту обменных колебаний мощности между ДГ проиллюстрированы на рис. 1.8.

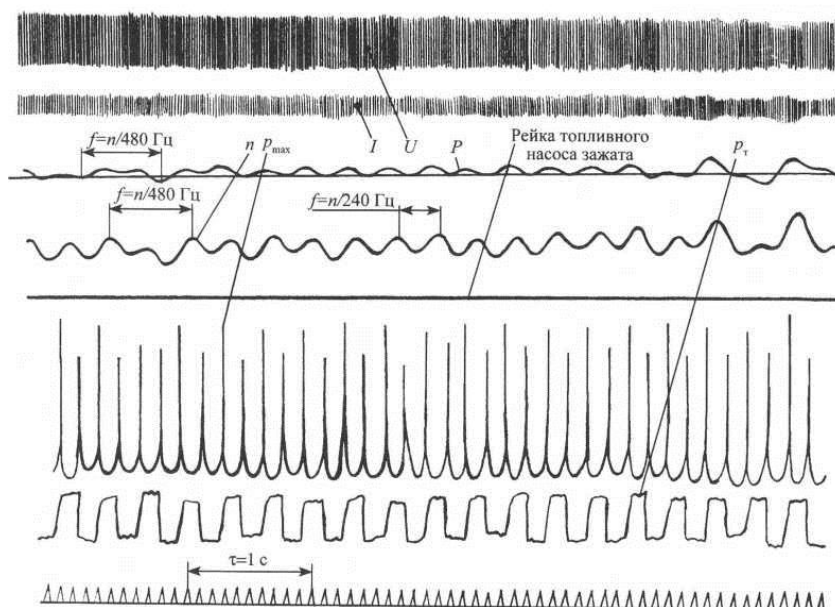


Рис. 1.8. Осциллограмма параллельной работы двух ДГ мощностью по 150 кВт (при выключенной системе регулирования скорости): I , U — ток и напряжение генератора; n — частота вращения; P — активная мощность; p_m — остаточное давление топлива в трубопроводе высокого давления; $P_{\max}$ — максимальное давление сгорания; f — частота колебаний

Здесь записаны изменения активной мощности P одного из ДГ, остаточное давление в трубопроводе высокого давления p_m , давление в цилиндре p_{max} , ток и напряжение генератора, изменение частоты вращения коленчатого вала при работе ДГ в параллель без нагрузки с зажатой рейкой топливного насоса (для исключения влияния регулятора скорости) [36].

Колебания частоты вращения, обменные колебания по частоте четко следуют за колебаниями остаточного давления топлива и максимального давления сгорания с частотой $n/240$ Гц (классическая 1/2 гармоника возмущений в четырехтактном дизеле имеет частоту $n/120$ Гц). При отпущенной рейке топливного насоса на работе ДГ сказывается влияние системы регулирования скорости дизеля, амплитуда обменных колебаний резко увеличивается (рис. 1.9) [36].

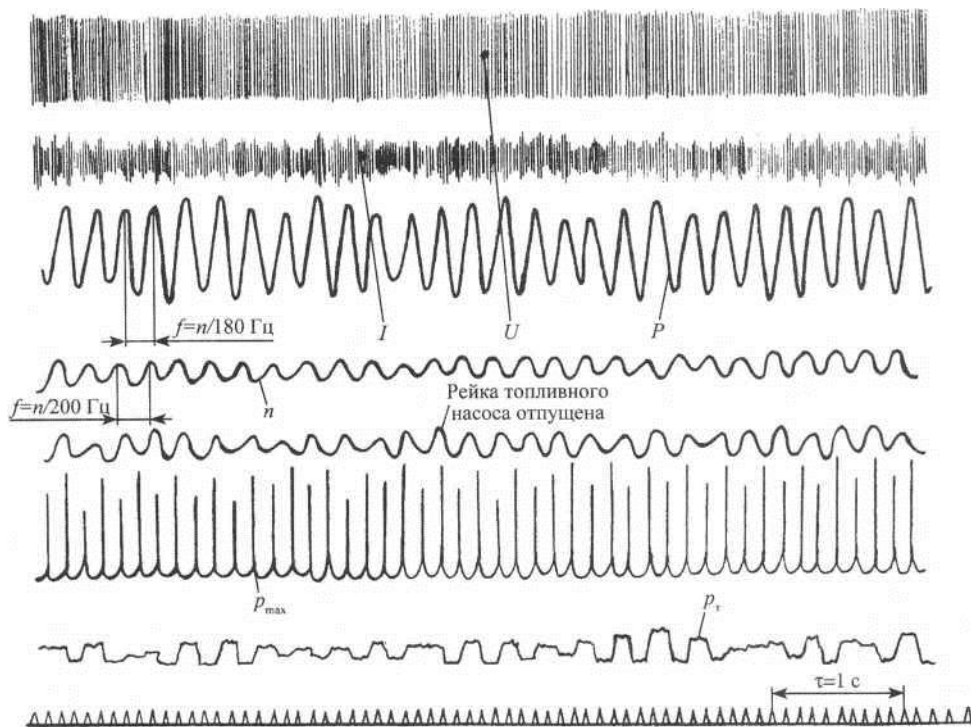


Рис. 1.9. Осциллограмма параллельной работы двух ДГ мощностью по 150 кВт (с включенной системой регулирования скорости):

I, U – ток и напряжение генератора; P – активная мощность; n – частота вращения; p_m – остаточное давление топлива в трубопроводе высокого давления; p_{max} – давление в цилиндре дизеля

Исследования показали, что параллельно работающий агрегат можно вывести на резонансную зону работы при изменении только частоты собственных колебаний системы ДГ (при изменении, например, величины податливости электрической синхронной связи) и получить развитые обменные колебания с частотами, соответствующими спектру возмущающих сил низкого порядка (ниже классической частоты $1/2$ гармоники). Это проиллюстрировано осциллограммой на рис. 1.10, где записана величина резонансных колебаний активной мощности ДГ типа NVD26A фирмы SKL $\pm 160\%$ от номинальной с развалом параллельной работы (выпадением ДГ из синхронизма) [36].

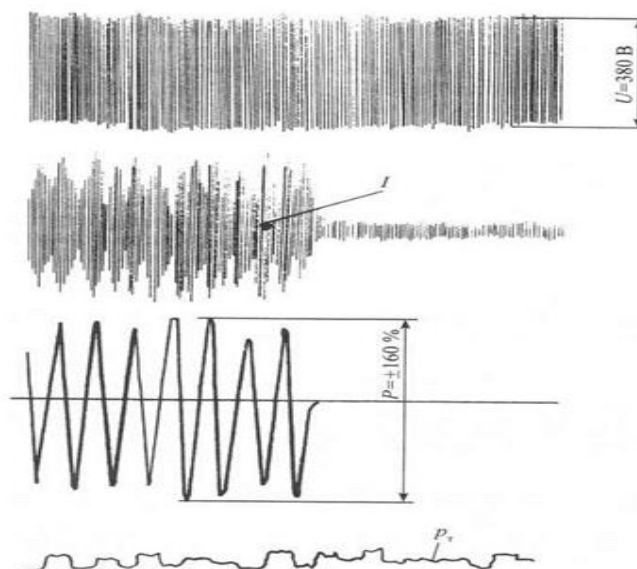


Рис. 1.10. Осциллограмма параллельной работы ДГ фирмы SKL (экспериментальный вывод ДГ на резонансные колебания с выпадением ДГ из синхронизма): P – активная мощность ДГ; U, I – напряжение и ток генератора; P_m – остаточное давление в топливном трубопроводе

На рис. 1.11 показана характерная зависимость величины обменных колебаний мощности ДГ от частоты колебаний и $\cos \varphi$, т.е. для различных режимов насыщения генераторов мощностью 160 кВт на режиме 25%-ной нагрузки. Задавалась амплитуда колебаний рейки топливного насоса дизеля величиной $\pm 12\%$ от хода рейки. При увеличении насыщения генератора

частота собственных колебаний системы ДГ возросла с 2,6 (что

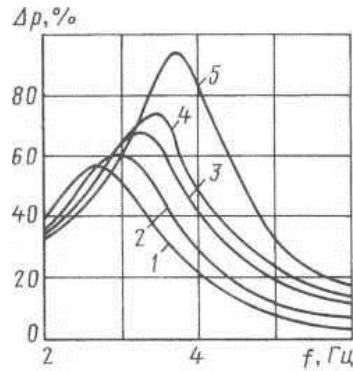


Рис. 1.11. Частотные характеристики генератора при параллельной работе:

$$1 - \cos \varphi_{\text{емк}} = 0,8; 2 - \cos \varphi_{\text{емк}} = 0,4; 3 - \cos \varphi = 1; 4 - \cos \varphi_{\text{инд}} \sim 0,8; \\ 5 - \cos \varphi_{\text{инд}} = 0,4$$

соответствует емкостному $\cos \varphi_{\text{емк}} = 0,4$) до 3,6 Гц (что отвечает индуктивному $\cos \varphi_{\text{инд}} = 0,4$). При таком изменении коэффициента мощности демпфирование генератора уменьшается в 1,5 раза [36].

На рис. 1.12 представлены частотные характеристики генератора при

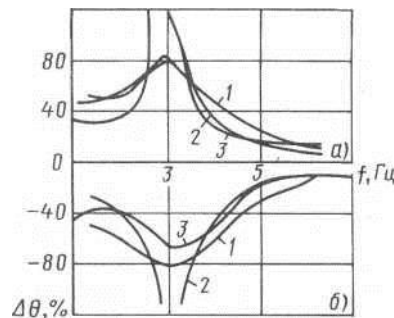


Рис. 1.12. Частотные характеристики генератора при различных нагрузках:

а – режим холостого хода; *б* – режим 25 %-ной нагрузки; 1-3 – генераторы соответственно с независимым возбуждением, с разомкнутой демпферной клеткой и с самовозбуждением

различных режимах работы (генератор переменного тока имеет бесщеточную

систему возбуждения с устройством управления и регулирования, обеспечивается самовозбуждение генератора без применения постороннего источника, генератор имеет продольно-поперечную демпферную клетку) [36].

Сравнение характера зависимости изменения угла нагрузки $\Delta\Theta$ (Θ – угол между магнитным полем статора и ротора) от частоты колебаний при нормально функционирующей штатной системе возбуждения и корректора напряжения (элемент системы АРН генератора) и при независимом возбуждении генератора, показывает, что в первом случае изменения угла нагрузки $\Delta\Theta$ и, следовательно, обменные колебания мощности на всех режимах меньше, чем во втором [36].

Штатная система регулирования напряжения при колебаниях создает дополнительный демпфирующий момент. При увеличении насыщения генератора до некоторого предела система регулирования напряжения обуславливает возрастание только синхронизирующего момента, так как приращение к демпфирующему моменту равно нулю. При малом демпфирующем моменте генератора могут возникать самопроизвольно значительные обменные колебания мощности (кривые 2 на рис. 1.13). В данной системе этого не наблюдается, так как генератор имеет демпферную клетку; система регулирования тока возбуждения может изменить коэффициент демпфирования на небольшую величину. Значение демпферной клетки можно установить анализом частотных характеристик при параллельной работе ДГ [36].

На рис. 1.13 приведены экспериментальные частотные характеристики генератора со штатной (замкнутой) продольно-поперечной демпферной клеткой (кривая 4) и с разомкнутой поперечной клеткой (кривая 2), а также теоретические частотные характеристики для тех же случаев (соответственно кривые 5 и 1) и, кроме того, с демпферной клеткой, увеличенной в 3 раза (кривая 5). Рис. 1.13 показывает, что при отсутствии демпфирования со стороны генератора наблюдаются обменные колебания мощности

величиной +100 %, что исключает параллельную работу ДГ. В то же время увеличение демпферной клетки в 3 раза по сравнению со штатной приводит лишь к возрастанию амплитуды обменных колебаний с некоторым сдвигом резонансной точки частотной характеристики в сторону больших частот. Это подтверждает, что выбор коэффициента демпфирования должен быть обусловлен и что использование штатной демпферной клетки генератора является эффективным средством подавления обменных колебаний реального спектра частот [36].

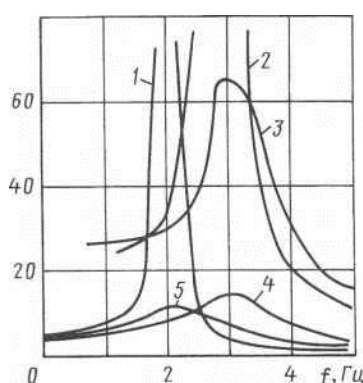


Рис. 1.13. Частотные характеристики генератора при параллельной работе:

ΔP – величина обменных колебаний мощности;

f – частота колебаний задающего звена с амплитудой $\pm 15\%$ от хода рейки топливного насоса; 1 и 2 – соответственно теоретическая и экспериментальная частотные характеристики генератора с разомкнутой поперечной клеткой; 3 – частотная характеристика генератора (теоретическая) с демпферной клеткой, увеличенной в 3 раза; 4 и 5 – экспериментальная и теоретическая частотные характеристики генератора со штатной (замкнутой) продольно-поперечной демпферной клеткой соответственно

Таким образом, синхронный генератор является динамическим звеном

системы параллельно работающих ДГ, от свойств которого в значительной степени зависят качество параллельной работы ДГ, амплитуда и характер проявления обменных колебаний мощности.

Для определения факта устойчивости работы системы и условий такой работы применяются алгебраические и частотные критерии устойчивости.

Частотный критерий Найквиста наиболее хорошо подходит для определения устойчивости и исследования параллельно работающих ДГА в составе автономных электроэнергетических систем. Этот критерий особенно удобен при анализе результатов проведенных натурных экспериментальных исследований на действующих электроэнергетических системах или адекватных компьютерных моделях таких систем.

На рис. 1.14 построена АФХ ДГ при параллельной работе (показаны

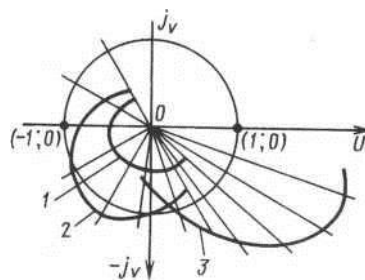


Рис. 1.14. АФХ ДГ при параллельной работе на нагрузке 25 % с $\cos \varphi = 1$; 1 -3 – коэффициенты усиления соответственно регулятора, агрегата и ротора

коэффициенты усиления динамических звеньев: регулятора, агрегата, ротора генератора) с $\cos \varphi = 1$ [36].

Применение критерия Найквиста для оценки устойчивости заключается в выяснении взаимного расположения АФХ и точки с координатами $(-1, j0)$. Так если АФХ не охватывают точку с координатами $(-1, j0)$, то звенья и система в целом находятся в динамическом равновесии. Если АФХ охватывают точку $(-1, j0)$, то система является неустойчивой,

частота собственных колебаний измерителя скорости регулятора близка к частоте собственных колебаний системы параллельно работающих ДГ. Такая система склонна к автоколебаниям в контуре регулирования скорости при работе ДГ в параллель, что сопровождается большими обменными колебаниями мощности [36].

Важно, чтобы коэффициент усиления системы $K_{\text{общ}}$ по АФХ не охватывал точку $(-1,0)$. Именно это имеет место при параллельной работе ДГ с $\cos \varphi = 0,4$ (см. рис. 1.11), когда величина обменных колебаний достигает предельного значения [36].

Приведенные результаты исследований дают представление о природе обменных колебаний мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов переменного тока и доказывают необходимость определения критерия устойчивости параллельной работы ДГ по величине обменных колебаний активной мощности. Такой критерий определит цели и задачи для проектантов судовых ДГ и судовых электростанций, которые будут определять их действия по разработке необходимых методов и средств для снижения обменных колебаний до допустимой величины.

Это могут быть:

- изменение частоты собственных колебаний системы ДГ, работающих в параллель (например, установка маховика дизеля с большим GD^2 , изменение величины синхронизирующего момента);
- исключение возмущающих сил в дизеле низкого порядка (в частности, нестабильности впрыска топлива от цикла к циклу путем оптимизации конструкции топливных насосов дизелей) для предотвращения околорезонансных крутильных колебаний системы ДГ;
- изменение частоты собственных колебаний измерителя скорости регулятора (например, массы центробежных грузов и жесткости главной пружины);
- введение или усиление демпфирования синхронного генератора.

Следует отметить, что в случае тщательной отработки всех элементов

системы параллельно работающих ДГ и исключения возмущающих сил в дизеле с частотой меньше $1/2$ гармоники, между ДГ всегда будут проходить обменные колебания мощности с основной частотой $1/2$ гармоники, их величина будет определяться, главным образом, жесткостью работы дизелей; приближением частоты собственных колебаний системы ДГ, работающих в параллель, к частоте $1/2$ гармоники возмущающих сил дизеля; демпфированием со стороны генератора [36].

На основании международного опыта проектирования и эксплуатации ДГ переменного тока в качестве критерия устойчивости параллельной работы современных судовых дизель-электрических агрегатов можно было бы принять величину обменных колебаний активной мощности $\pm(10...12,5) \%$ от номинальной мощности большего из параллельно работающих ДГ. Этот критерий может и должен быть введен в международный стандарт ISO 8528 через соответствующий технический комитет [36].

Очевидно, что решение проблемы обеспечения устойчивой и надежной параллельной работы судовых дизель-генераторных агрегатов на основе синхронных генераторов путем устранения или уменьшения до минимума амплитуды обменных колебаний мощности актуальна уже много десятилетий. Изучив накопленную информацию, технический опыт и результаты научных исследований по обменным колебаниям мощности, мы видим, что рекомендации по их уменьшению направлены на некоторые конструктивные изменения дизель-генераторных агрегатов (в основном дизелей), что естественно для специалистов механиков. Однако, не смотря на обширный собранный материал и казалось бы глубокое изучение природы и причин обменных колебаний мощности, мы не находим информации об успешном внедрении новаций и устранении обменных колебаний. Не видим мы и конкретных методов, которые бы дали реальный эффект. Напротив электромеханическая служба даже суперсовременных судов с классом автоматизации A1 сталкивается с их существованием и отрицательными последствиями. Обменные колебания мощности между параллельно

работающими агрегатами приводят к повышенному износу регуляторов частоты вращения, ограничивают использование мощности генераторных агрегатов, вызывают пульсацию напряжения судовой сети, уменьшают коэффициент полезного действия механизмов, а также отрицательно сказываются на психофизическом состоянии экипажа, снижают эффективность и надежность работы систем автоматизации, могут привести даже к выпадению синхронного генератора из синхронизма, вплоть до обесточивания судов, что является аварийной ситуацией, а значит, несет угрозу жизни людей, находящихся на борту судна, сохранности груза и самого судна [92,93] .

Проведя классификацию систем автоматического регулирования частоты и напряжения, можно отметить, что физические процессы изучены достаточно глубоко [49,50,114,115], разработано большое количество систем [37,39,53,61], но имеют место значительные трудности в решении поставленных задач. Это связано с непрерывно возрастающей энергонасыщенностью судовых электростанций и повышением требований к ним, а следовательно те решения, которые были актуальны для 2-3 параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов, оказываются неприменимы для судов на которых необходима параллельная работа 4 - 5 и более таких агрегатов, т. е. для многогенераторных судовых электростанций. Существующие системы распределения активной и реактивной мощностей [68] не исключают наличия обменных колебаний мощности при параллельной работе даже двух дизель-генераторных агрегатов, а если применять их в многогенераторной судовой электроэнергетической системе, то влияние обменных колебаний мощности может принять непредсказуемый и неконтролируемый характер.

Поэтому, принимая во внимание вышесказанное, можно сделать вывод о том, что необходимо перейти на качественно новый уровень в решении рассматриваемых задач, требуется создание единой координирующей системы автоматического управления, которая будет управлять регуляторами

частоты и напряжения всех дизель-генераторных агрегатов с целью минимизации уровня обменных колебаний мощности во всех режимах работы [94]. Такая система будет построена на микропроцессорной базе, что позволит компенсировать недостатки механической и электрической частей, которые неизбежно сохранятся [25,61,94,121,123]. Конечно, в идеале было бы хорошо исключить наличие обменных колебаний мощности, но на практике существует ряд причин, вследствие которых сделать это не удастся и поэтому необходимо уменьшить их амплитуду до регламентируемых норм, а если возможно, то и ниже.

1.4. Выводы к главе 1

1. Эффективность процесса производства и распределения электрической энергии на современном судне определяется количеством дизель-генераторных агрегатов, основным режимом работы которых является параллельная работа.

2. На сегодняшний день разработаны и используются большое количество систем автоматики и режимных мер, направленных на оптимизацию работы судовой электростанции, но они не являются достаточно действенными в условиях повышения требований к эффективности оперативного управления режимами.

3. Существующие средства и методы автоматического управления судовым электротехническим комплексом не устраняют один из основных недостатков параллельной работы генераторных агрегатов - обменные колебания мощности.

4. Учитывая характерные особенности судового электротехнического комплекса как объекта управления, а также необходимость реализации управления технологическими процессами в условиях неполноты и достоверности информации о состоянии объекта и внешних воздействиях, считается необходимым переход к частичной централизации управления

генераторными агрегатами с использованием адаптивных систем автоматического управления.

5. Целесообразно проведение дополнительных исследований параллельной работы генераторных агрегатов в составе судового электротехнического комплекса для разработки устройства обменных колебаний мощности и метода определения их допустимого уровня.

ГЛАВА 2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПАРОМА “ЕЙСК”

2.1. Изучение объекта исследования

2.1.1. Единая электроэнергетическая установка парома “Ейск”

Для проведения экспериментальных исследований было выбрано судно-паром “Ейск” (рис. 2.1) государственной судоходной компании “Керченская паромная переправа”, осуществляющее регулярные грузопассажирские перевозки между порт “Крым” (Керчь) и порт “Кавказ” (Россия) [91,92].



Рис. 2.1. Паром Ейск

Назначение судна – перевозка пассажиров, автомашин и другой колесной и гусеничной техники. Район плавания – ограниченный III, с удалением от места убежища до 20 миль. Тип судна – однопалубный двухвинтовой автомобильно-пассажирский паром с четырьмя ярусами рубок, с дизель-электрической энергетической установкой и подруливающим устройством.

Для парома проекта 10380 принята единая электроэнергетическая система с гребной электрической установкой (ГЭУ) переменного тока и отбором мощности на питание судовых потребителей от шин главных генераторов. Примененная электрическая установка защищена авторским свидетельством на изобретение № 1046836.

Такая система позволяет уменьшить количество генераторов на судне, более полно и экономично использовать установленную мощность электроэнергетической установки, уменьшить количество применяемой аппаратуры и улучшить условия эксплуатации парома.

Схема СЭЭС представляет собой 4-генераторную энергетическую установку (рис. 2.2). От трех главных дизель-генераторов переменного тока Г1-Г3 питаются два ГЭД постоянного тока, работающих на ВФШ, с обслуживающими механизмами и оборудованием осуществляется, а так же осуществляется отбор электроэнергии для питания судовых потребителей. Вспомогательный дизель-генератор Г4 используется для питания судовых электроприемников в стояночном режиме.

В качестве источников электроэнергии в схеме ГЭУ парома приняты три главных дизель-генератора 6VD26/20-AL-2 с генераторами S450MG 800кВА, 390В, 50Гц, $\cos \varphi = 0.8$, 1184А и один вспомогательный дизель-генератор S350SB 200кВА, 390В, 50Гц, $\cos \varphi = 0.8$.

Регуляторы скорости РН-30 предназначены для автоматического поддержания заданной частоты вращения коленчатого вала дизелей при изменении нагрузки путем изменения количества топлива, подаваемого в цилиндры топливными насосами.

С целью обеспечения необходимого качества электроэнергии, отбираемой на питание судовых потребителей, потребовались специальные меры для уменьшения искажений формы синусоидальной кривой напряжения генераторов, возникающих при коммутации силовых тиристоров статических преобразователей ГЭУ. Для компенсации указанных искажений применены специально разработанные сдвоенные реакторы, одна из обмоток которых включена в цепь главного тока, а другая – в цепь отбора мощности.

Сдвоенные реакторы за счет взаимоиндукции компенсируют коммутационные провалы напряжения и тем самым улучшают качество электроэнергии, отбираемой на собственные нужды, до приемлемой величины ($K_{\text{искаж}} \leq 10\%$).

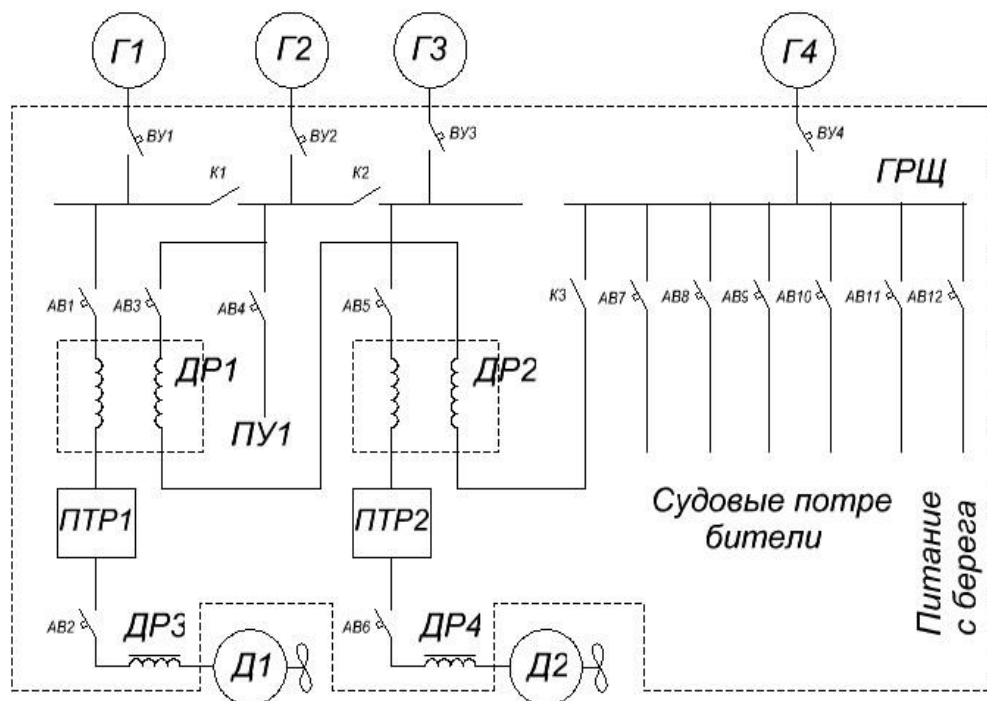


Рис. 2.2. Структурная схема СЭЭС парома "Ейск"

Схемой СЭЭС предусмотрены следующие режимы работы:

– работают 3 главных генератора (Г1, Г2, Г3) – обеспечивается ледовый режим работы полной мощности при 2 включенных ГЭД;

– работают 2 главных генератора (Г1, Г2 или Г2, Г3 или Г1, Г3) – обеспечивается эксплуатационный режим работы в чистой воде при 2 включенных ГЭД;

– работает 1 главный генератор (Г1 или Г2 или Г3) – обеспечивается аварийный режим работы при 2 включенных ГЭД, не являющийся эксплуатационным.

Переход с одного режима работы ГЭУ на другой осуществляется путем изменения количества включенных в схему генераторов и может выполняться без перерыва в работе ГЭД. При включении или отключении генераторов на шины на ходу судна, особенно, при работе ГЭД на токах, близких к токам ограничения в режиме, рекомендуется кратковременно сбросить ход до малого и производить переключения в схеме в установившемся режиме работы ГЭУ во избежание излишних бросков тока в схеме. Соответствие мощности ГЭУ режиму работы обеспечивается автоматически соответствующими изменениями в схеме регулирования ГЭУ при отключении или включении АВ генератора. Включение генераторов на параллельную работу возможно методом автоматической точной синхронизации с помощью устройства УСГ или вручную, контролируя необходимые параметры по приборам ГРЩ.

Включение генераторов на шины ГЭУ ГРЩ производится с помощью автоматических выключателей (АВ) типа ВА 74, которые так же осуществляют защиту генераторов от коротких замыканий, перегрузок, осуществляет минимальную защиту и защиту от обратной мощности.

Вся коммутационная и защитная аппаратура и измерительные приборы, относящиеся к главным генераторам, расположены в генераторных секциях ГРЩ.

Каждый ПТР подключен к шинам ГЭУ ГРЩ через АВ типа ВА 74 и сдвоенный реактор. Силовые АВ переменного тока напряжением 380В ПТР расположены в генераторных секциях Г1 и Г3, реакторы расположены в

выгородке ЦПУ, там же в секции сдвоенных реакторов ГРЩ установлены сдвоенные реакторы на стороне переменного тока.

Защита на стороне постоянного тока осуществляется АВ типа ВА 74, расположенными в секции автоматов защиты ГЭД ГРЩ.

На стороне постоянного тока на выходе силовых преобразователей установлен герконовый датчик тока, который настраивается на уставку срабатывания $2.65 I_{дн}$ на заводе изготовителе ПТР (обеспечивает выдачу сигнала). Кроме того, для защиты тиристоров предусмотрены быстродействующие предохранители.

В дальнейшем исследовании в соответствии с поставленной в работе задачей рассматривается только та часть схемы СЭЭС, где используется режим параллельной работы генераторных агрегатов.

2.1.2. Гребная электрическая установка парома “Ейск”

Гребная электрическая установка парома “Ейск” двухвальная, каждый вал приводится во вращение ГЭД постоянного тока типа МП2-М-630-152-8МЗ, 710 кВт, 440 В, 370/500 об./мин.

ГЭД имеет принудительную вентиляцию от вентилятора типа “Наездник”, воздухоохладитель, электростатический фильтр и центробежное реле скорости.

Каждый ГЭД получает питание от своего тиристорного преобразователя ПТР1 / ПТР2 – типа КТЭ 1600/460 ЕВО, номинальный выпрямленный ток 1600 А, с плавным регулированием напряжения 460-0-460 В.

Изменение частоты вращения ГЭД производится регулированием подводимого к ГЭД напряжения, а реверс – изменением полярности на входе ПТР при постоянном потоке возбуждения ГЭД.

Функциональные блоки ТП расположены в ГРЩ. Вентиляция блоков естественная. Питание ТП осуществляется от шин ГРЩ через сдвоенные

реакторы, ограничивающие нелинейные искажения напряжения от коммутации силовых тириستоров.

Для уменьшения пульсаций в главной цепи постоянного тока установлены сглаживающие реакторы типа ФРОС-3-800.

ГЭД имеют обмотки независимого возбуждения, которые получают питание от выпрямительных агрегатов типа ВКС-10-230 (2 основных и два резервных).

Характеристики выпрямительных агрегатов:

- выпрямленный номинальный ток – 43А
- выпрямленное номинальное напряжение – 220В

Выпрямительные агрегаты возбуждения ГЭД размещены в ЦПУ и получают питание от шин ГРЩ 380В.

2.1.3. Судовые генераторы парама “Ейск”

Для обеспечения судна электроэнергией установлены три главных бесщеточных генератора [21,28,42,69] ряда S типа S450 MG и один вспомогательный синхронный генератор S350SB .

На рис. 2.3 показан разрез генератора в исполнении IM 2001 (для

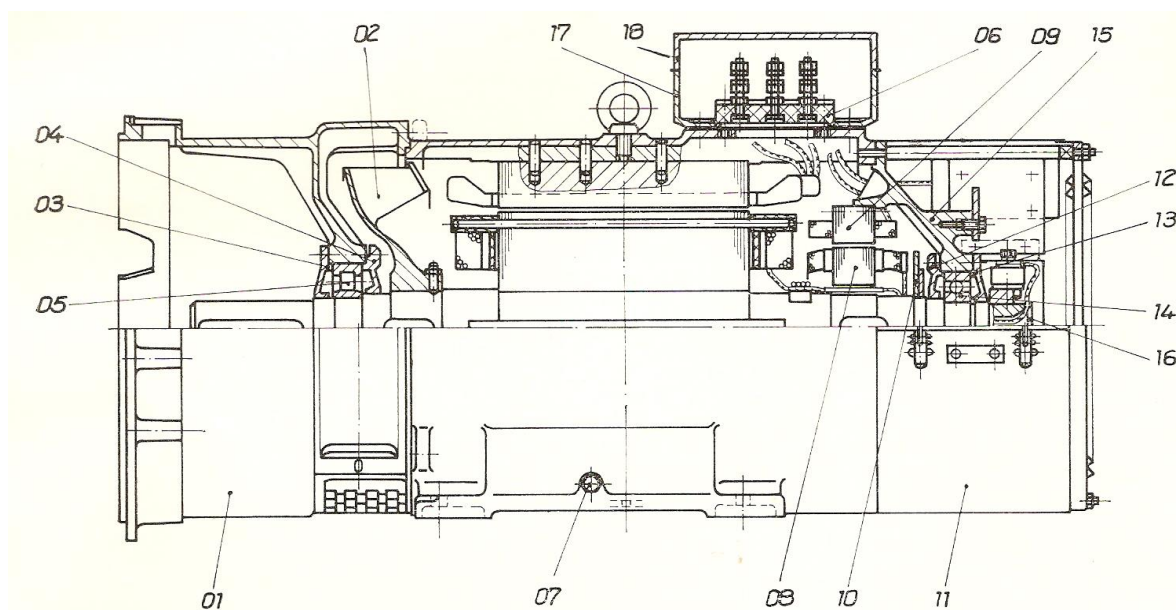


Рис. 2.3. Разрез генератора в исполнении IM 2001

исполнения установленного на судне будут отсутствовать позиции, обусловленные наличием подшипника со стороны привода).

Позициям указанным на рисунке соответствуют следующие элементы:

- 01 Фланцевый подшипниковый щит, сторона привода;
- 02 Вентилятор;
- 03 Крышка подшипника, сторона привода, снаружи;
- 04 Крышка подшипника, сторона привода, внутри;
- 05 Подшипник качения, сторона привода;
- 06 Цоколь с зажимом;
- 07 Зажим для заземления;
- 08 Ротор возбуждителя;
- 09 Статор возбуждителя;
- 10 Балансировочный диск;
- 11 Покрытие, сторона противоположная приводу;
- 12 Крышка подшипника, сторона, противоположная приводу, внутри;
- 13 Крышка подшипника, сторона, противоположная приводу, снаружи;
- 14 Подшипник качения, сторона, противоположная приводу;
- 15 Подшипниковый щит, сторона, противоположная приводу;
- 16 Упорная шайба;
- 17 Клемная коробка, нижняя часть;
- 18 Крышка клемной коробки;

Генераторы состоят из следующих основных узлов:

- трехфазный генератор с внутренними полюсами;
- трехфазный возбуждатель с внешними полюсами;
- вращающаяся выпрямительная группа;
- устройство возбуждения с электронным регулятором

напряжения.

При бесщеточном исполнении напряжение возбуждения подводится индуктивной передачей к обмотке возбуждения постоянного тока на роторе

генератора, что исключает контактные элементы, подлежащие износу и техническому уходу [116,122,126,128]. Обмотка трехфазного тока (ротор) возбuditеля расположена на валу генератора и соединена с обмоткой возбуждения генератора непосредственно проводами через вращающуюся выпрямительную группу. Статор возбuditеля имеет обмотку возбуждения постоянного тока, которая питается генератором через устройство возбуждения с электронным регулятором напряжения. В начальный момент обмотка статора возбuditеля получает питание за счет остаточного магнетизма, делая возможным работу генератора.

Генератор вместе с возбuditелем и всеми узлами, необходимыми для возбуждения и регулирования, является компактной конструкцией. Он поставляется со степенью защиты IP 23, в исполнение IM 1305 (одноподшипниковая машина) и относительно климатических условий имеет класс исполнения M II.

Для статорного корпуса выбрана прочная литая конструкция. На расположенных внутри продольных ребрах стоит пакет сердечника.

Коробка выводов расположена на стороне, противоположной приводу, прикрывает зажимную планку, на которой имеются присоединения для обмотки статора и дополнительных устройств. Для кабелей предусмотрены водонепроницаемые кабельные вводы. В коробке выводов и на лапе корпуса находится по одной точке присоединения защитного провода.

Статорная обмотка с изоляционными материалами класса теплостойкости F может быть выполнена в качестве двухслойных обмоток из шаблонных катушек или в качестве всыпной обмотки. При помощи опорных колец и крепления лобовой части обмотки и также благодаря неоднократной вакуумной пропитке специальным лаком, достигается высокая прочность обмотки.

Ротор генератора выполнен в виде неявнополюсного [21,28,42,69]. На валу ротора есть опорные ребра для установки пакета сердечника, который крепится нажимными кольцами и поперечными клиньями. Кроме обмотки

возбуждения с изоляционными материалами класса теплостойкости F в сердечнике каждого полюсного шага расположена демпферная обмотка.

Для восприятия центробежных усилий лобовые части обмотки имеют бандаж. Весь ротор подвергается многократной вакуумной пропитке в специальном лаке. Ротор динамически сбалансирован.

Генератор имеет продувную вентиляцию, причем вход воздуха осуществляется в осевом направлении на стороне, противоположной приводу. Охлаждающий воздух выводится с помощью радиального вентилятора на стороне привода.

2.1.4. Возбудительное устройство генераторов

Самовозбуждение генератора основывается на остаточном магнетизме. Выработанное при номинальной частоте вращения в статорной обмотке генератора остаточное напряжение (рис. 2.4) обуславливает протекание небольшого тока через присоединенный к фазам А, В, С дроссель (6) и выпрямительную группу (8) в статорной обмотке возбудителя и вызывает процесс самовозбуждения. Дроссель (6) предотвращает превышение определенного значения тока возбуждения возбудителя. Это значение зависит от воздушного зазора между сердечником дросселя и ярмом дросселя и выбирается по величине таким образом, чтобы генератор при отсоединенном от зажимов электронном регуляторе напряжения возбуждался до напряжения, превышающего номинальное напряжение генератора (при номинальной частоте вращения приводного агрегата). С помощью трансформатора тока (7), через первичную обмотку которого течет ток потребителей, при нагрузке генератора подключается добавочный ток возбуждения, необходимый из-за реакции якоря. Этот ток геометрически суммируется с током дросселя и является также больше составляющей, зависящей от нагрузки, которая необходима для поддержания номинального напряжения. Переменный ток возбуждения после выпрямления в стационарной выпрямительной группе (8), шестиимпульсной мостовой

схеме, поступает к статорной обмотке возбuditеля. Для защиты от пиков напряжения, которые могут привести к повреждению диодов, стационарная выпрямительная группа (8) и вращающаяся выпрямительная группа (5) оборудуются подходящими ограничителями перенапряжения (варисторы или селеновые ограничители перенапряжения). Электронный регулятор напряжения (9) при превышении номинального напряжения генератора периодически включает отключающее сопротивление r_{31} , расположенное параллельно стационарной выпрямительной группе (8). Тем самым эффективный ток, протекающий через статорную обмотку (4) возбuditеля, ограничивается определенным значением, которое требуется для того, чтобы напряжение на зажимах генератора поддерживалось равным значению, заданному задатчиком r_{30} .

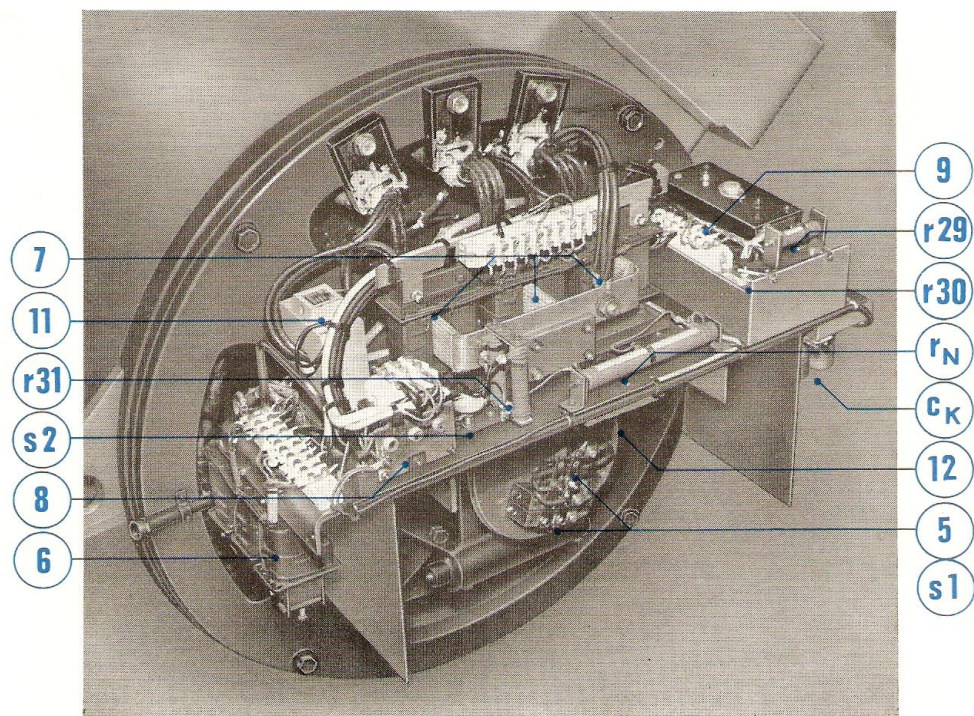


Рис. 2.4. Возбудительное устройство

- 5. Вращающиеся группа выпрямителей;
- 6. Дроссель;
- 7. Трансформатор тока резистор;

- 8. Стационарная группа выпрямителей;
- 9. Регулятор напряжения R6;
- 11. Статические трансформаторы тока;
- 12. Ограничитель напряжения EB1;
- r_n . Резистор для аварийного режима;
- r_{29} . Статический регулируемый резистор;
- r_{30} . Потенциометр для установки заданного значения;
- r_{31} . Разгрузочный резистор;
- C_k . Сглаживающий конденсатор;
- s1, s2. Схема защиты.

2.1.5. Параллельная работа дизель-генераторных агрегатов S450 M6

Бесщеточные генераторы типоряда „S" производства НП Электромоторенверк Дессау рассчитаны на параллельную работу и в этом случае оснащены демпферной обмоткой, возможностью подключения уравнительного провода и статическим устройством.

Возможна реализация следующих вариантов параллельной работы:

- параллельная работа генераторов одного и того же типа с уравнительным проводом;
- параллельная работа генераторов одного и того же типа или различных типов типоряда „S" без уравнительного провода;
- параллельная работа на сеть.

Распределение реактивной мощности и колебания тока или мощности при параллельной работе нескольких генераторов в диапазоне от 20 до 100 % полной номинальной нагрузки соответствуют соответствующим инструкциям на изготовление. Предпосылкой для параллельной работы являются соответствующая конструкция приводных двигателей, особенно их

регуляторов частоты вращения, одинаковая зона пропорционального регулирования (уменьшение частоты вращения между холостым ходом и полной нагрузкой) или же обеспечение пропорционального распределения активной мощности другими мерами.

Параллельное включение генераторов может производиться с помощью точной синхронизации, быстродействующей синхронизации или грубой синхронизации.

В соответствии с практикой условиями для этого являются:

- почти одинаковые эффективные значения напряжения на зажимах генератора и сети,
- одинаковое чередование фаз обеих систем напряжения (имеет место у имеющейся установки),
- отличающаяся от нуля положительная разность частот $f_{\text{ген}} > f_{\text{сети}}$,
- замыкание контактов выключателя при так называемом угле погрешности (α) $\leq 15^\circ$, в расчете на прохождение через нуль биения разности напряжений обеих систем напряжения.

Важным является то, чтобы при задании момента времени подключения учитывалось собственное время выключателя и исключались подключения при больших углах погрешности. О последствиях включения при возможных в целом значениях угла погрешности их диапазоны дают следующую информацию:

Диапазон А с $-15^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$

В этом диапазоне замыкание контактов выключателя возможно без каких-либо ограничений.

Диапазоны В с $15^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ и $150^\circ \leq \alpha < 175^\circ$

Значение $\alpha=30^\circ$ соответствует внезапному короткому замыканию и представляет уже аварийный случай с соответственно высокими механическими нагрузками генератора. Хотя генераторы по ТГЛ 20675/02 являются выдерживающими короткое замыкание, подключение в диапазонах В следует рассматривать только как допустимое исключение.

Диапазоны C с $30^\circ < \alpha < 150^\circ$

Подключения в этом диапазоне являются явными неправильными включениями и поэтому являются недопустимыми. При $\alpha = 90^\circ$ в самых неблагоприятных условиях может наблюдаться 4-кратный момент при внезапном коротком замыкании. В диапазоне C следует считаться с механическими повреждениями на генераторе и на приводе. С целью абсолютного предотвращения неправильных подключений уже при проектировании необходимо учитывать соотношения в установке и её надлежащее обслуживание.

Генераторы с одинаковым напряжением возбуждения должны преимущественно работать параллельно с уравнительным проводом. Статическое устройство может быть выведено из эксплуатации.

Параллельное включение обмоток возбуждения всех возбuditелей обеспечивает, независимо от состояния нагрузки, одинаковое напряжение возбуждения. Распределение активной мощности пропорционально номинальным мощностям ведет в обязательном порядке к соответствующему распределению реактивной мощности. При уменьшении активной мощности генератора он примет на себя более большую часть реактивной мощности, так что токи генераторов уже больше не являются пропорциональными активной мощности.

2.2. Результаты экспериментального исследования работы электротехнического комплекса парома “Ейск”

Основными задачами экспериментального исследования заявлено исследование поведения электроэнергетической системы судна и качества вырабатываемой ею электроэнергии в различных режимах ее работы, а также выяснение вопроса о наличии обменных колебаний мощности при параллельной работе судовых дизель-генераторных агрегатов. Основной

частью исследования является получение осциллограмм токов параллельно работающих генераторов в различных режимах работы судовой электроэнергетической системы.

В связи с тем, что автопаром "Ейск" находится в режиме непрерывной эксплуатации с повышенными требованиями по безопасности к пассажирскому судну, то эксперимент носил пассивный характер.

Необходимо отметить, что исследования проводились практически сразу после очередного ежегодного освидетельствования судна и на класс Регистра и все системы автоматики были должным образом настроены и отлажены.

Для исследования применялся цифровой контрольно-измерительный комплекс предоставленный для проведения исследований Керченским участком ООО "Югрематоматика". Комплекс состоит из цифрового запоминающего двухканального осциллографа "Owon" и соединенного с ним персонального компьютера типа "Notebook", которые были размещены в Центральном посту управления (ЦПУ) судном и подключены к соответствующим датчикам и приборам главного распределительного щита (ГРЩ) для снятия информации. Во время проведения экспериментальных исследований использовалось только сертифицированное оборудование, прошедшее поверку, и лицензионное программное обеспечение. Также осуществлялось наблюдение и фиксация показаний штатных приборов генераторных и нагрузочных секций ГРЩ – вольтметров, амперметров, ваттметров.

При проведении первого этапа эксперимента (рис. 2.5 – 2.6, А.1-А.4) развертка по оси времени выставлена 2,5 и 5 мсек, при этом в кадр помещается не более 2-3 периодов изменения напряжения и тока и при частоте дискретизации осциллографа 100 МГц отчетливо видны искажения синусоидальных кривых [91]. Данные искажения (рис. 2.5 – 2.6, А.1-А.4) появляются после включения в работу тиристорных преобразователей для обеспечения электрической энергией гребных двигателей постоянного тока.

Амплитуда выбросов в отдельных режимах работы достигает 80% вместо заявленных заводом – изготовителем судна максимальных 5%. Подобные искажения имеют место на судах морского флота, в том числе современных.

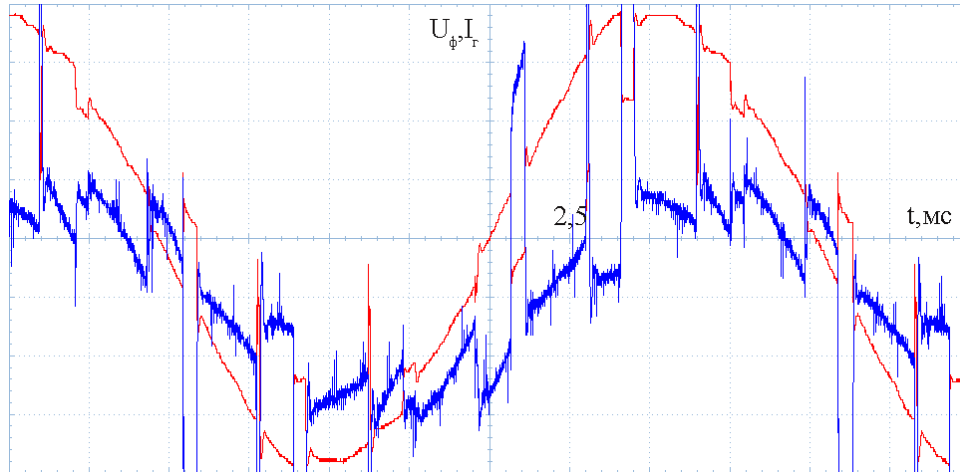


Рис. 2.5. Параллельная работа ДГ 1 и ДГ 2 на гребные двигатели, рабочий режим гребных установок, ток 600 А, 300 об/мин, по 350 кВт, частота 49 Гц, 980 об / мин., фазное напряжение и ток ДГ 2

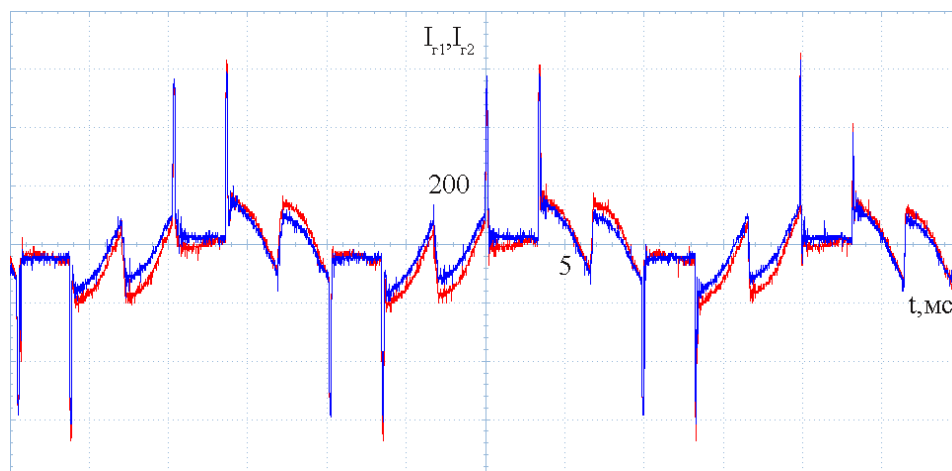


Рис. 2.6. Токи ДГ 1 и ДГ 2 при параллельной работе , 550 А и 500 А, работа гребных двигателей

Так на судах оснащенных винторулевыми колонками типа Azipod применяются гребные двигатели переменного тока, которые изначально

также получали питание через тиристорные преобразователи частоты – циклоконвертеры. При этом синусоиды напряжения и тока очень сильно искажены (рис. 2.7 – 2.8).

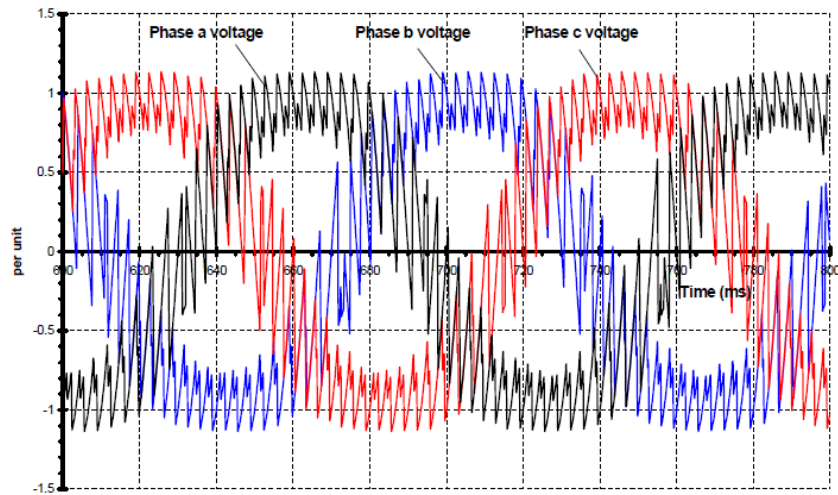


Рис. 2.7. Форма напряжений после циклоконвертора

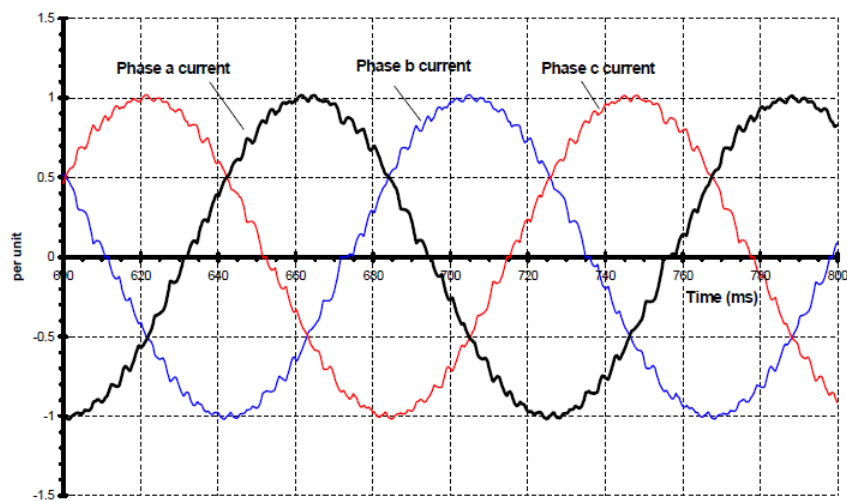


Рис. 2.8. Форма токов после циклоконвертора

Основной причиной низкого качества электроэнергии в таких системах является работа тиристорных преобразователей. В настоящее время конструктора и проектанты судов с винторулевыми колонками отказались от применения циклоконвертеров и стали устанавливать цифровые преобразователи частоты, так как все другие применяемые меры [139]

должного результата не дали. Очевидно, что на пароме “Ейск” искажения формы кривой вызваны работой тиристорных преобразователей и для устранения этого недостатка необходимо воспользоваться мировой практикой, для чего пойти по пути замены установленных полупроводниковых преобразователей частоты на цифровые. В настоящее время цифровые преобразователи частоты обладают высокой надежностью, эффективностью и невысокой стоимостью, поэтому их замена будет намного выгоднее различного рода мер, направленных на ограничение искажений синусоидальной формы кривых напряжения и токов.

Стало понятно, что при проведении всех последующих этапов эксперимента необходимо устанавливать большие величины разверток по оси времени осциллографа. Методом наблюдения было выяснено, что наиболее интересную и полезную информацию можно фиксировать при развертке 250 мсек и 500 мсек.

Осциллограммы токов, полученные в установившемся режиме работы, т.е. без изменения нагрузки судовой электростанции (рис. 2.9-2.10, А.5-А.6)

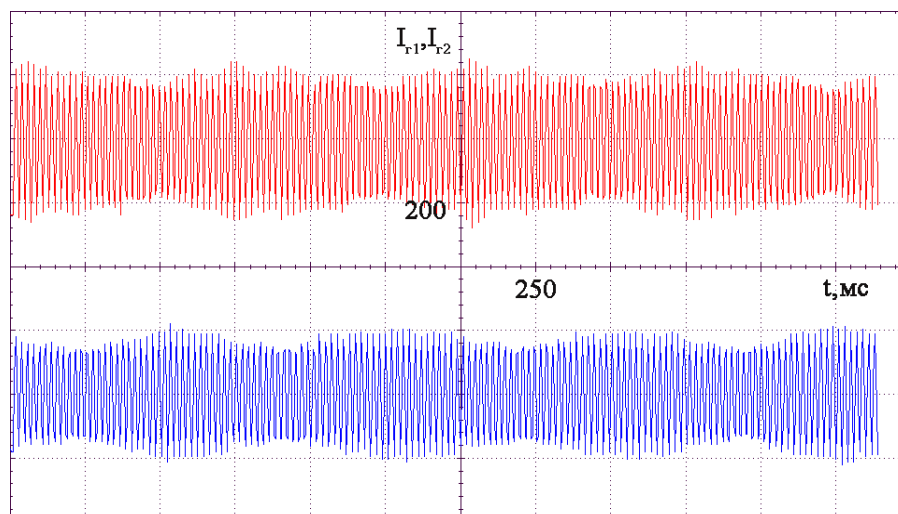


Рис. 2.9. Токи параллельно работающих генераторов в установившемся режиме 1

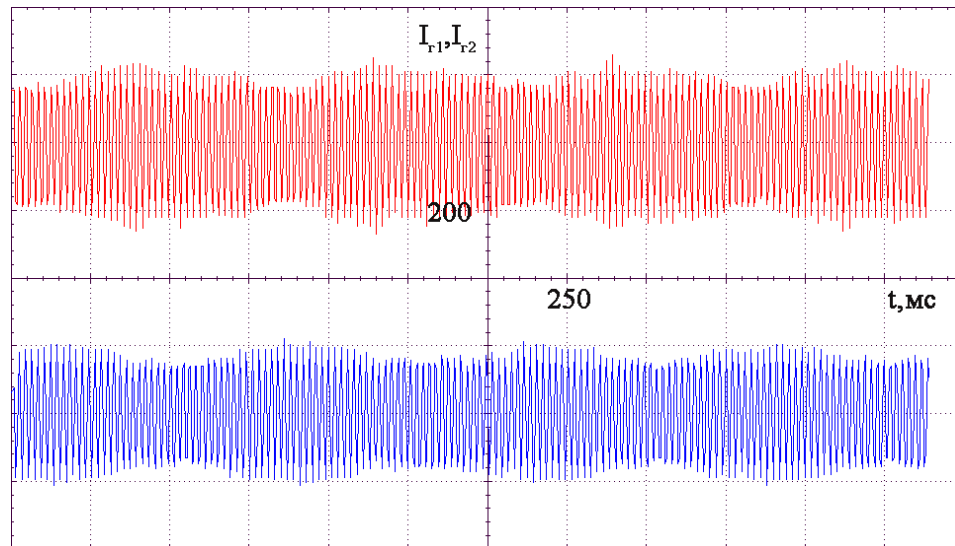


Рис. 2.10. Токи параллельно работающих генераторов в установившемся режиме 2

имеют ярковыраженные обменные колебания, в то время как один из параллельно работающих генераторов сбрасывает нагрузку, другой ее увеличивает [78,86,88,93]. Амплитуда обменных колебаний достигает 20%, а их период составляет 600 – 800 мс. Во время снятия этих осциллограмм включена судовая нагрузка за исключением гребных двигателей и не производится пусков и остановов каких либо мощных потребителей.

Подруливающее устройство с асинхронным двигателем с фазным ротором мощностью 135 кВт – это наиболее мощный потребитель, работающий напрямую от сети переменного тока (в отличие от гребных двигателей, которые работают от тиристорных преобразователей). Поэтому получение осциллограмм токов и напряжений генераторов при пуске (рис. 2.11 – 2.13) и останове (рис. 2.14, А.7) подруливающего устройства имеет особую значимость [88].

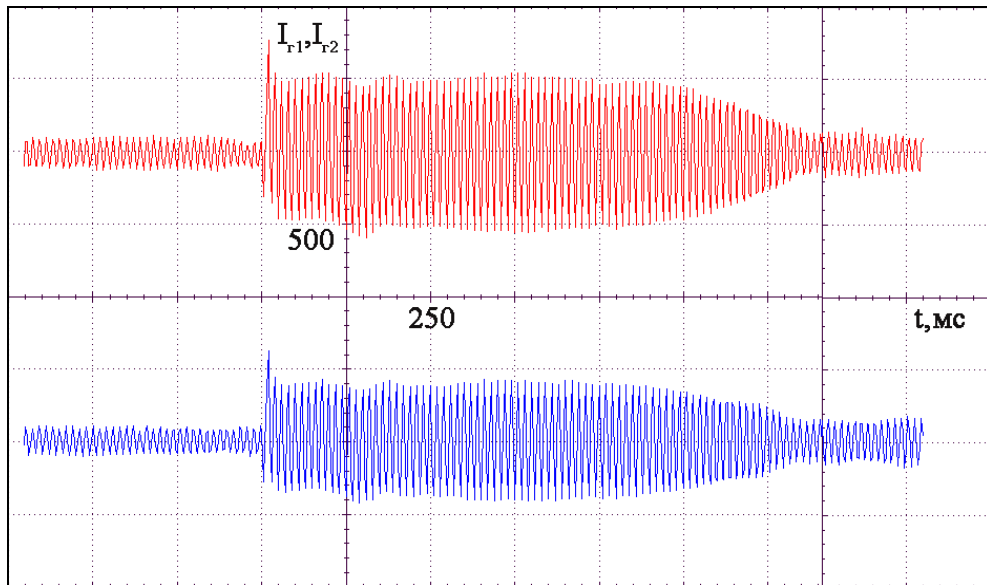


Рис. 2.11. Токи параллельно работающих генераторов при пуске подруливающего устройства

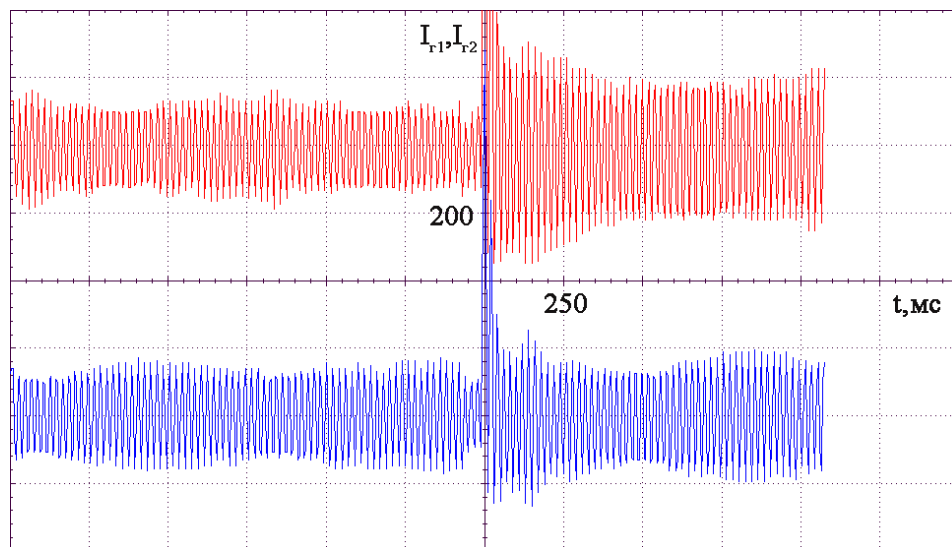


Рис. 2.12. Токи двух параллельно работающих дизель – генераторов при пуске подруливающего устройства (переключение со звезды на треугольник)

Во-первых, эти осциллограммы подтверждают наличие обменных колебаний. Их амплитуда в пусковом режиме достигает 25 %, а период 800 – 1000 мс. Во-вторых, процессы пуска и останова являются наиболее

сложными и характерными режимами работы мощного потребителя судовой электростанции. На осциллограммах зафиксированы процессы пуска

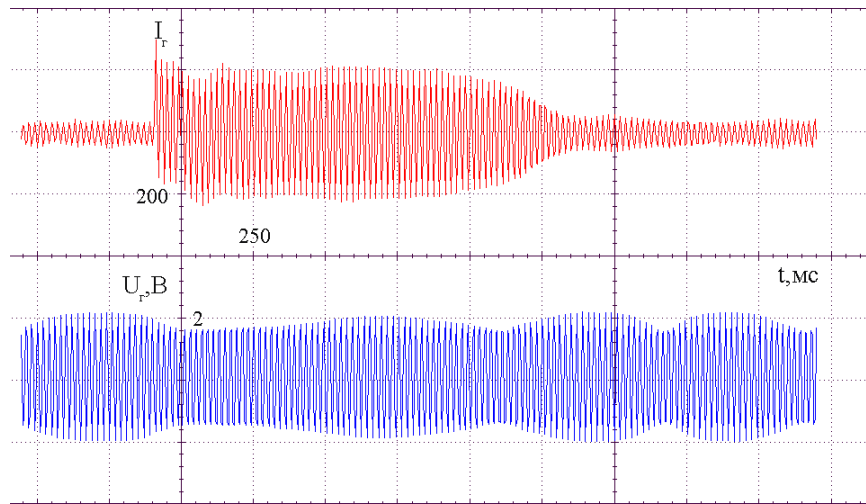


Рис. 2.13. Ток и напряжение одного из параллельно работающих генераторов при пуске подруливающего устройства

подруливающего устройства при разном уровне исходной нагрузки судовой электростанции. Из них видно, что сам процесс пуска длится 1,5 с, затем еще 1,5 с двигатель работает в установившемся режиме, а затем происходит переключение обмоток со звезды на треугольник. На осциллограммах видно, что обменные колебания существуют в переходных режимах пуска мощных судовых потребителей. Кривая напряжения показывает, что регулятор напряжения обеспечивает пуск мощной нагрузки с незначительным до 5 % по амплитуде и продолжительности до 250 мс провалом напряжения, который соответствует требованиям Регистра. На осциллограмме видны пульсации напряжения генератора до 20 %, что является характерным недостатком качества электроэнергии, возникающем при существовании обменных колебаний мощности.

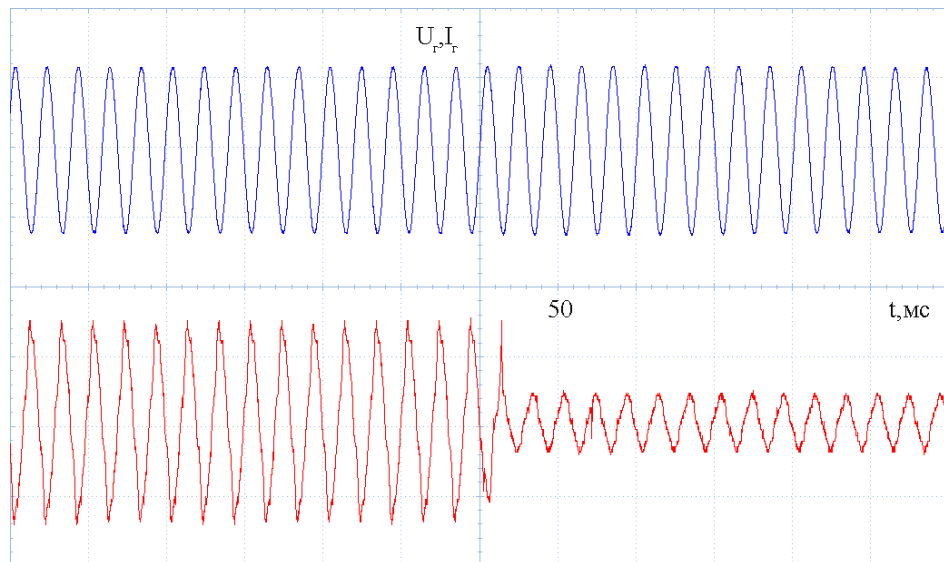


Рис. 2.14. Ток и напряжение одного из параллельно работающих генераторов при останове подруливающего устройства

Два вентилятора машинного отделения мощностью по 40 кВт также являются мощной нагрузкой судовой электростанции. Осциллограммы токов параллельно работающих генераторов, зафиксированные при одновременном пуске этих двух вентиляторов (рис. 2.15) являются еще одним доказательством существования обменных колебаний.

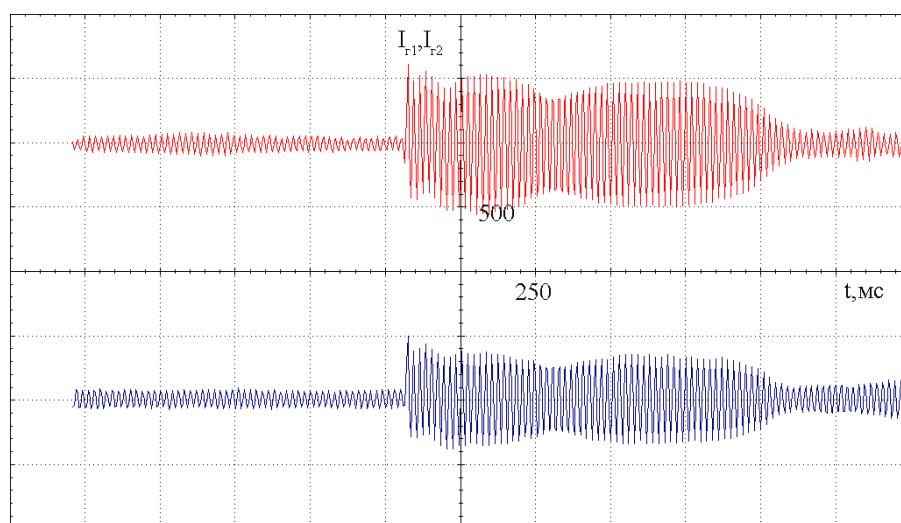


Рис. 2.15. Токи параллельно работающих генераторов при пуске вентиляторов

На рис. 2.16 – 2.17, А.8 –А.9 представлены осциллограммы напряжения и тока одного из двух параллельно работающих генераторов при пусках и остановке судовых потребителей. Приведенные осциллограммы также подтверждают удовлетворительную работу регуляторов напряжения генераторов. В моменты наброса и сброса нагрузки амплитуда синусоиды напряжения имеет незначительные изменения до 5 % и практически мгновенно восстанавливается, в течение 200-250 мс.

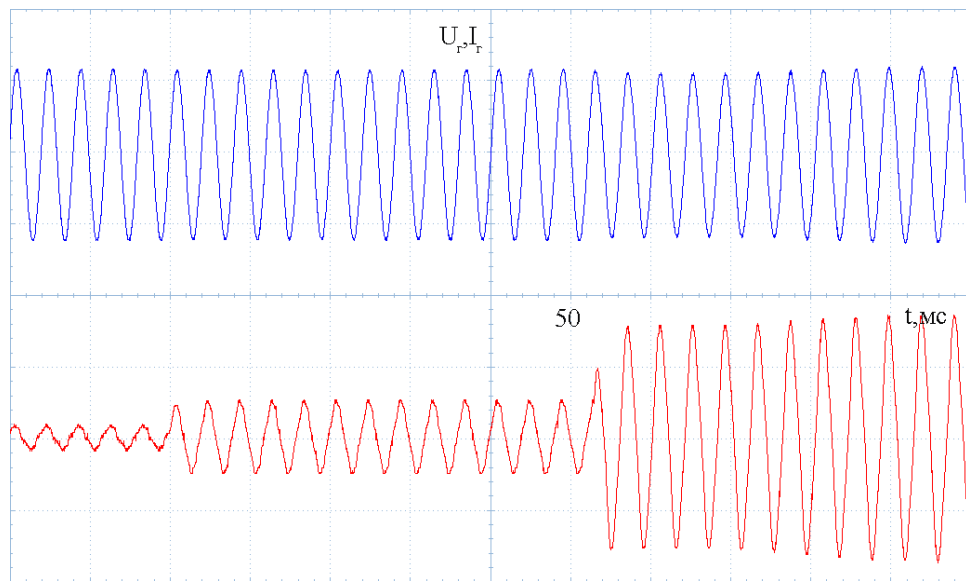


Рис. 2.16. Напряжение и ток одного из параллельно работающих генераторов при пусках потребителей (режим 1)

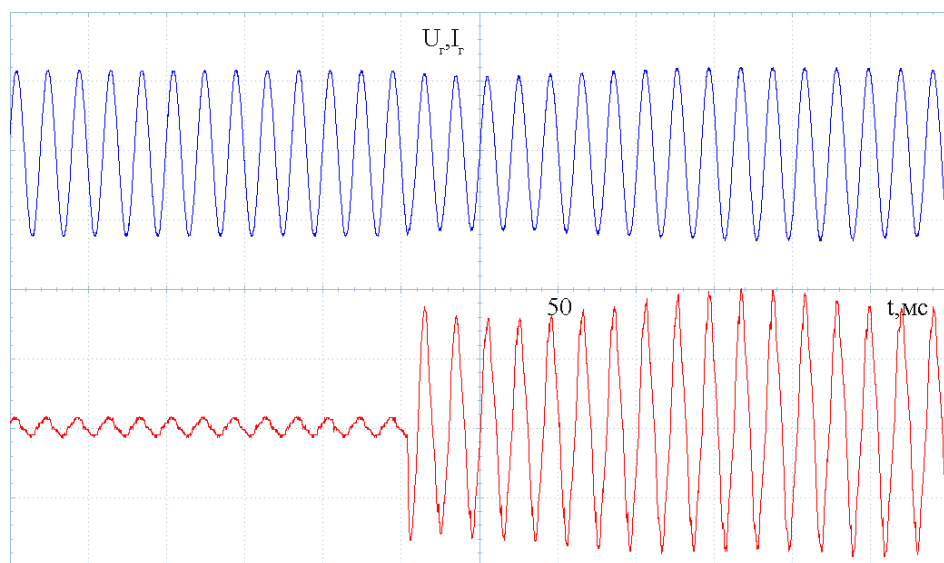


Рис. 2.17. Напряжение и ток одного из параллельно работающих генераторов при пусках потребителей (режим 2)

На осциллограммах токов при работающем подруливающем устройстве (рис. 2.18 – 2.19, А.10 – А.13) также видны колебания токов, но здесь их природа в большей степени обусловлена повторно-переменной нагрузкой, возникающей на лопастях винта регулируемого шага, которые накладываются на обменные колебания мощности [88]. В маневренном режиме работы паромы при проведении швартовых операций разворот лопастей винта регулируемого шага постоянно меняется, что приводит к изменению тока нагрузки приводного двигателя. Однако, даже в столь переменном режиме работы электротехнического комплекса, видны колебательные составляющие, кривые токов имеют пульсирующий характер и неплавную форму в течение каждого периода изменения нагрузки. На осциллограммах видно непропорциональное распределение нагрузки между параллельно работающими генераторами при работе подруливающего устройства с изменением разворота лопастей его винта.

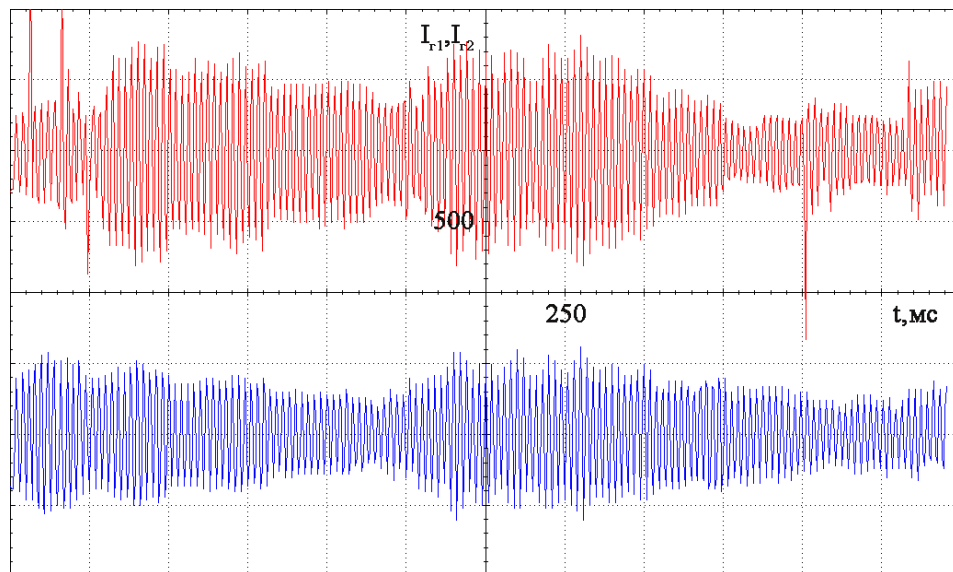


Рис. 2.18. Токи параллельно работающих генераторов при работающем подруливающем устройстве (режим 1)

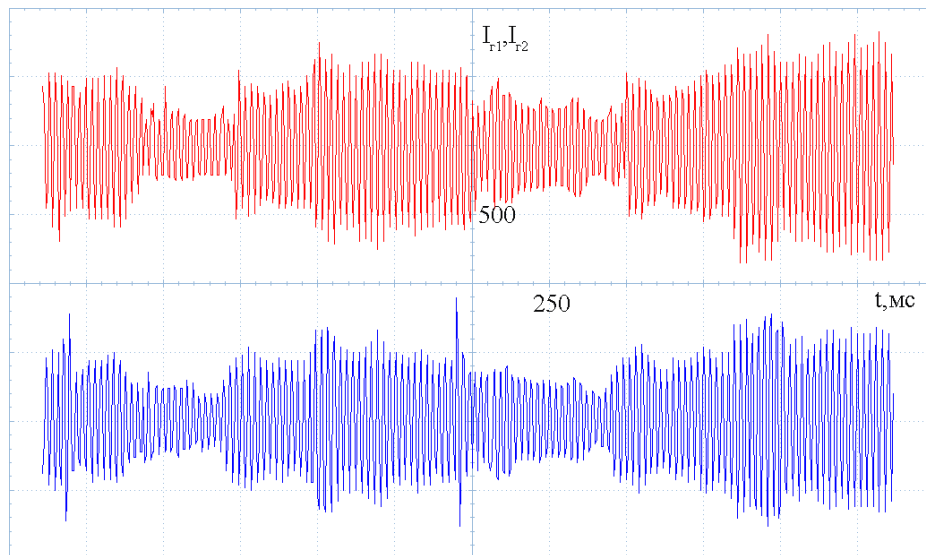


Рис. 2.19. Токи параллельно работающих генераторов при работающем подруливающем устройстве (режим 2)

На осциллограммах токов при работающих гребных двигателях получающих питание через тиристорные преобразователи (рис. 2.20 – 2.22, А.14 – А.18), наблюдаются автоколебательные процессы, представляющие из себя синфазные колебания с разными амплитудами и периодами. Форма этих колебаний также имеет разный характер. Амплитуда колебаний достигает 100 %, а период 150-800 мс [93].

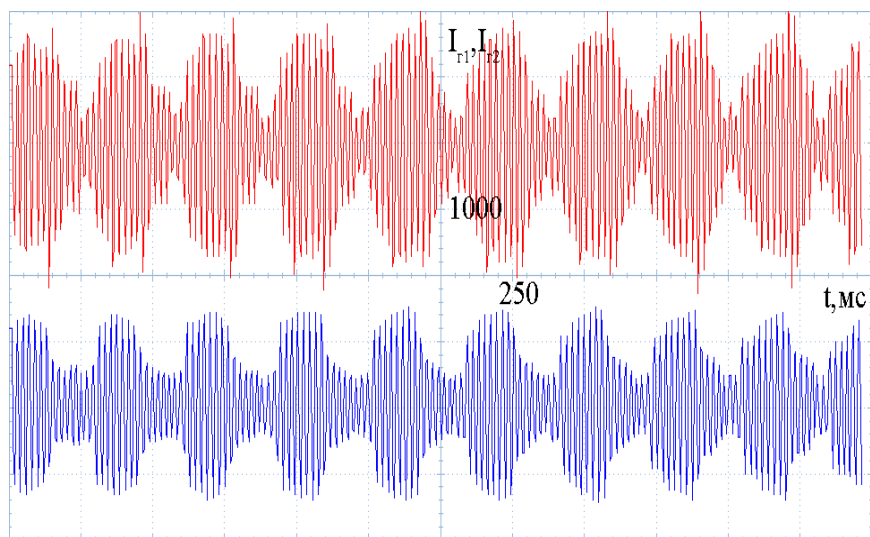


Рис. 2.20. Токи параллельно работающих генераторов при работающих гребных двигателях (режим 1)

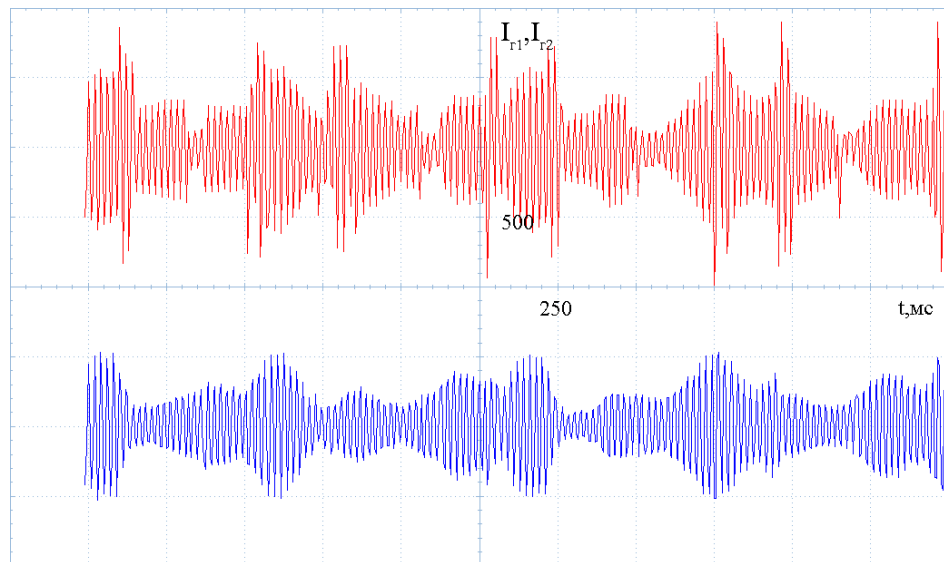


Рис. 2.21. Токи параллельно работающих генераторов при работающих гребных двигателях (режим 2)

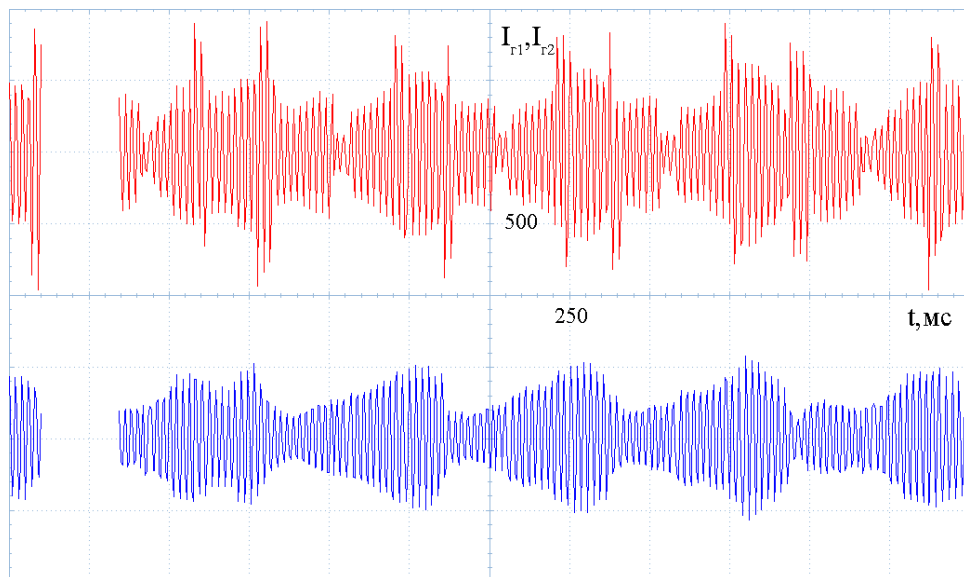


Рис. 2.22. Токи параллельно работающих генераторов при работающих гребных двигателях (режим 3)

Осциллограммы тока и активной мощности (рис. 2.23 – 2.24, А.19 – А.22) одного из параллельно работающих генераторов зафиксированные при пуске подруливающего устройства, при его работе, при работе гребных двигателей изображенные в одной системе координат, показывают, что эти

величины изменяются синфазно [88]. На линии активной мощности присутствуют колебания с частотой 50 Гц вследствие собственных колебаний дизеля из-за неравномерности работы его цилиндров. Дизель имеет частоту вращения 1000 об/мин и состоит из 6 цилиндров.

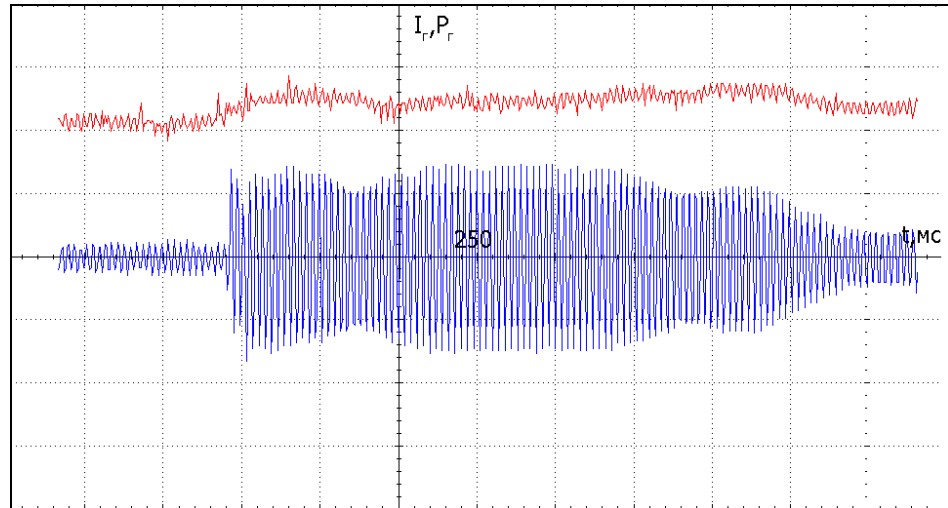


Рис. 2.23. Ток и активная мощность одного из параллельно работающих генераторов при пуске подруливающего устройства

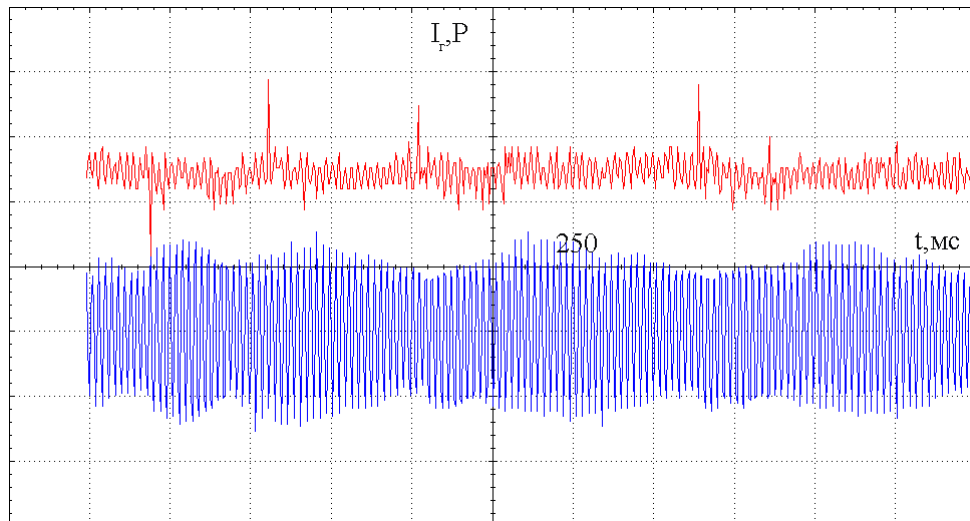


Рис. 2.24. Ток и активная мощность одного из параллельно работающих генераторов в установившемся режиме работы

Этот факт дает право говорить о существовании обменных колебаний мощности на основании существования обменных колебаний токов. Таким образом, осциллограммы токов двух параллельно работающих генераторов во всех режимах работы судна подтверждают существование обменных колебаний мощности.

Еще один этап экспериментального исследования был проведен после очередного ремонта судна на класс Регистра с обязательной настройкой регуляторов и систем автоматики. Основной целью этого этапа было изучение работы судового электротехнического комплекса после самого крупного ремонта и настройки, а также в случае параллельной работы трех дизель-генераторных агрегатов. На полученных осциллограммах (рис. 2.25 – 2.30, А.23 – А.30) видно, что ремонт и настройка механизмов и систем автоматики не устранили выявленных недостатков при параллельной работе, что говорит о необходимости применения другого подхода в решении этой задачи.

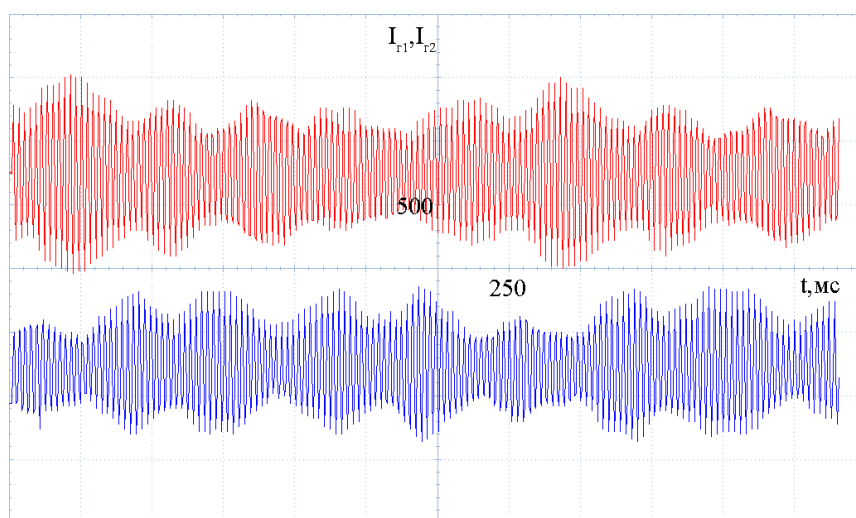


Рис. 2.25. Токи параллельно работающих генераторов, работают два генератора

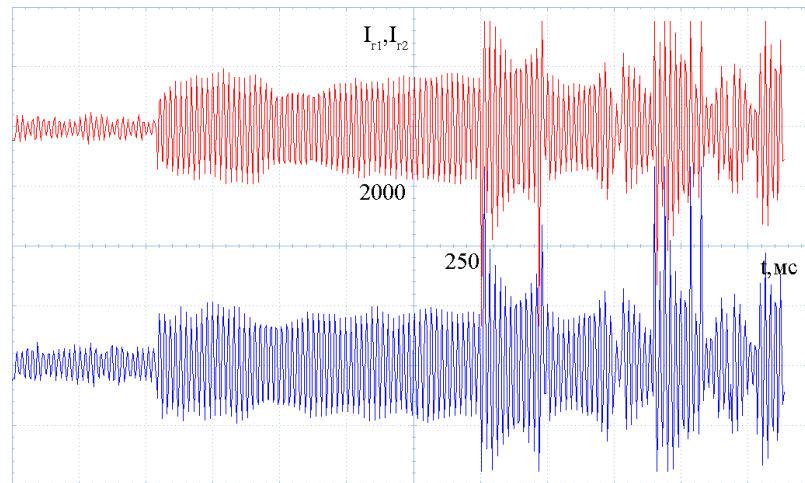


Рис. 2.26. Токи параллельно работающих генераторов, работают два генератора, нагрузка по 110 кВт

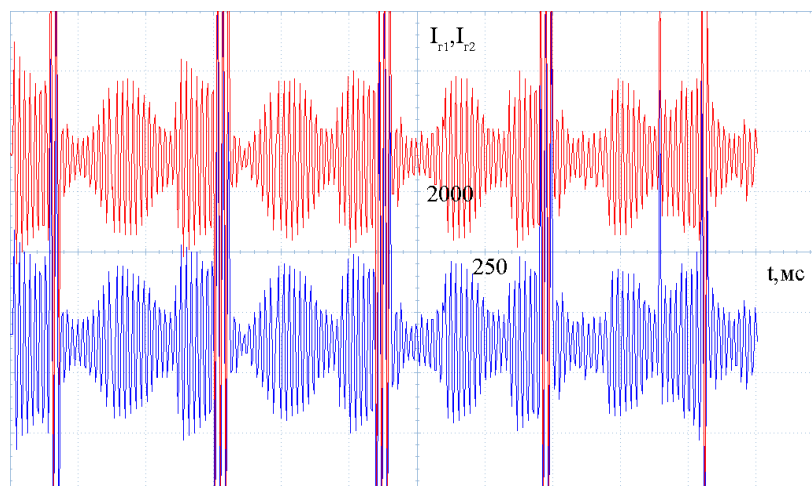


Рис. 2.27. Токи параллельно работающих генераторов, работают два генератора, нагрузка по 300 кВт

При параллельной работе двух генераторных агрегатов электротехнического комплекса на осциллограммах токов этих генераторов видны обменные колебания мощности в установившихся и переходных режимах, а также синфазные колебания при работе гребных двигателей.

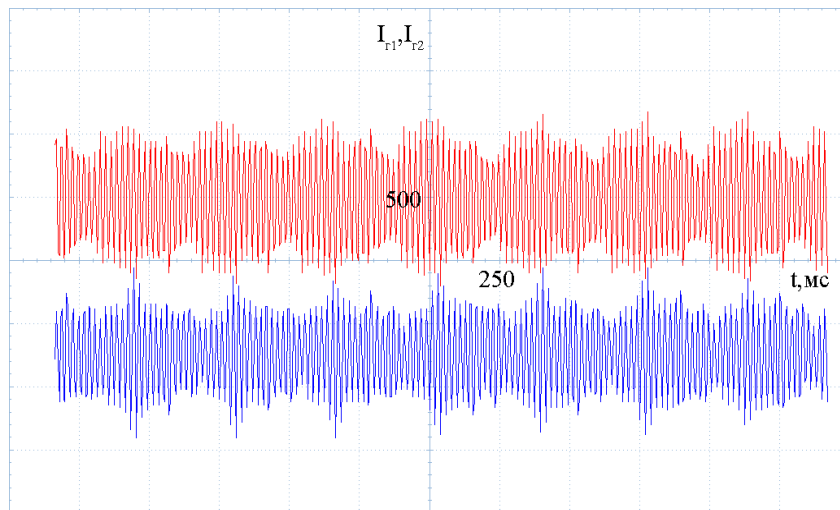


Рис. 2.28. Токи параллельно работающих генераторов, работают три генератора, нагрузка по 200 кВт (режим 1)

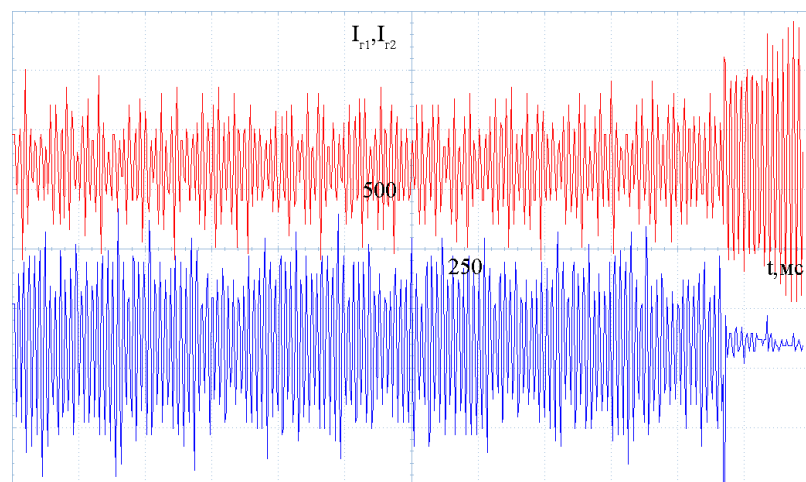


Рис. 2.29. Токи параллельно работающих генераторов, работают три генератора, нагрузка по 200 кВт (режим 2)

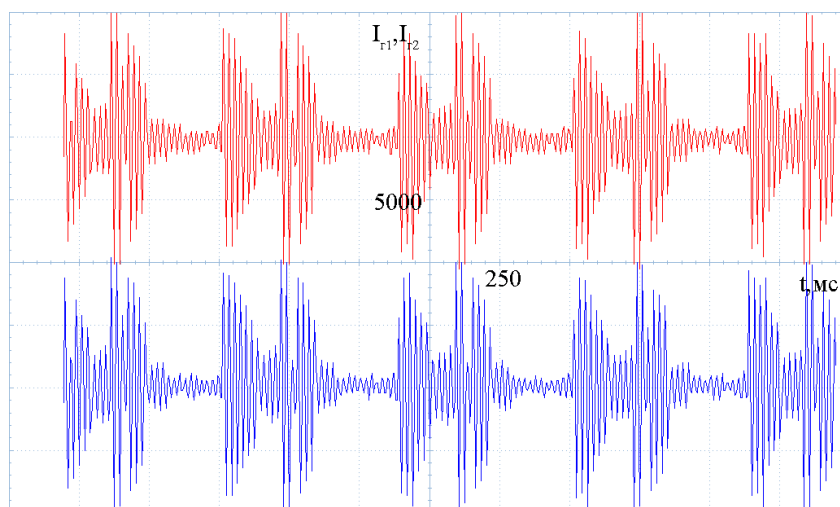


Рис. 2.30. Токи параллельно работающих генераторов, работают три генератора, нагрузка по 600 кВт

Исследования проведенные при параллельной работе трех дизель-генераторных агрегатов показали, что ситуация аналогична параллельной работе двух генераторных агрегатов паромы. При параллельной работе трех генераторных агрегатов также имеют место обменные и синфазные колебания мощности. Амплитуда этих колебаний несколько снизилась, по сравнению с такой же нагрузкой при двух параллельно работающих генераторах, вследствие более равномерного распределения нагрузки. Фиксация обменных и синфазных колебаний мощности при параллельной работе трех генераторных агрегатов исключает версию о дефиците электрической мощности в судовом электротехническом комплексе паромы, как о причине их существования. При проведении экспериментальных исследований наблюдались низкочастотные колебания стрелок амперметров и ваттметров параллельно работающих генераторных агрегатов диапазоном до 100 % в зависимости от режима работы судового электротехнического комплекса. Такие колебания подтверждают существование обменных колебаний мощности и необходимость проведения дополнительных исследований, имеющих целью уменьшить амплитуду таких колебаний. Таким образом, проведенный ремонт и освидетельствование на класс Регистра не устранили причин существования обменных и синфазных колебаний мощности.

2.3. Выводы к главе 2

1. Установлено, что судовой электротехнический комплекс паромы “Ейск” состоит из современного силового оборудования и систем автоматики, обеспечивающих все основные режимы работы морского судна.

2. Экспериментально выявлено, что синусоидальная форма напряжений и токов генераторов судового электротехнического комплекса искажается при использовании тиристорных преобразователей для питания гребных электродвигателей. Искажения достигают 80% при заявленных

производителем допустимых 5%. В соответствии с мировой практикой даны рекомендации по замене тиристорных преобразователей частоты на цифровые преобразователи.

3. Экспериментальными исследованиями доказано, что обменные колебания мощности возникают при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов в различных режимах работы судового электротехнического комплекса.

4. Экспериментальными исследованиями установлено существование синфазных колебаний токов параллельно работающих генераторов амплитудой до 100 %, которые накладываются на обменные колебания мощности. Амплитуда, период и форма колебаний меняется в зависимости от режима работы и нагрузки судовой электростанции.

5. Сравнением экспериментальных данных при двух и трех параллельно работающих генераторах установлено сходство искажений синусоидальной формы напряжений и токов, обменных и синфазных колебаний мощности в судовом электротехническом комплексе паромы.

6. Путем проведения экспериментальных исследований в несколько разнесенных во времени этапов установлено, что ремонт и настройка механизмов и систем автоматики не устраняет существующие обменные и синфазные колебания мощности при параллельной работе генераторных агрегатов. Подтверждена необходимость проведения теоретических исследований, разработки и реализации новых методов, направленных на решение данной задачи.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУДОВОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Для проведения дальнейшего изучения параллельной работы судовых дизель-генераторных агрегатов на базе синхронных генераторов, анализа причин существующих проблем и поиска методов их устранения необходимо описать уравнениями все элементы судового электротехнического комплекса и составить его математическую модель.

Имеется большое количество работ [3,9,10,11,12,13,29,31,32,33,34,45,51,55,60,65,70,71,96,97,98,101,103,109, 110,112,120,125,129], в которых описывается вывод дифференциальных уравнений синхронных машин, первичных двигателей генераторов, регуляторов скорости и напряжения. Однако есть факторы, которые усложняют использование этих материалов. Основными из них можно считать следующие [103]: отсутствие единой формы записи и взаимосвязи уравнений всех звеньев электротехнического комплекса (машин, их регуляторов и устройств автоматики); большое разнообразие в выборе масштаба времени, систем положительных направлений переменных, базовых величин, обозначений, а также отсутствие системы точных формул для расчета численных величин коэффициентов уравнений, тестовых формул для расчета характеристик машин и проверки правильности математических моделей.

В работе использованы наиболее систематизированные и удобные для практического применения материалы [98,103] по изучению судового электротехнического комплекса.

Математическая модель судового электротехнического комплекса включает уравнения для следующих элементов: синхронных генераторов,

дизелей как теплоэнергетических приводов дизель-генераторных агрегатов, систем стабилизации частоты вращения вспомогательных двигателей, регуляторов возбуждения и напряжения генераторов, активной и реактивной электрической нагрузки генераторов, устройств коммутации и распределения нагрузки.

Математическое описание перечисленных элементов и модель судового электротехнического комплекса приведены ниже.

3.1. Уравнения синхронных генераторов переменного тока

Существует несколько способов составления уравнений, описывающих синхронные генераторы.

3.1.1. Уравнения в неподвижных осях

Для составления уравнений электрической части СГ рассмотрим его конструкцию с размещенными в нем обмотками статора и ротора (рис.3.1).

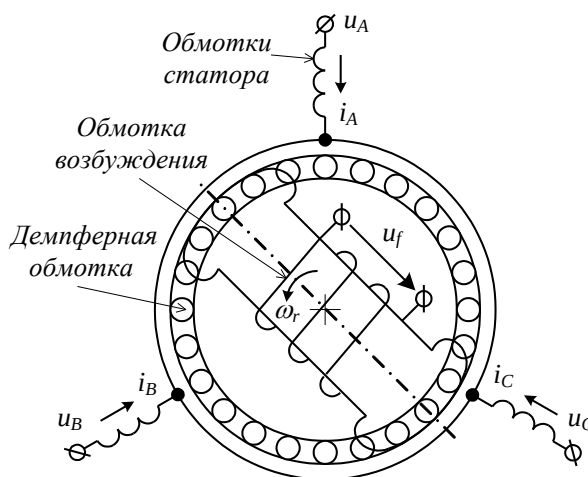


Рис. 3.1. Конструкция синхронного генератора

К обмотке возбуждения подведено постоянное напряжение u_f возбуждения. Демпферная обмотка конструктивно представляет собой "беличье колесо". Ротор приводится во вращение дизелем. Частота вращения ротора равна $\omega_r = \omega_c / p_c$, где ω_c — частота напряжения сети, p_c — число пар

полюсов обмотки статора. Вращающимся магнитным полем обмотки возбуждения в обмотках статора наводится э.д.с., а на выводах обмоток создается трехфазное переменное напряжение

$$u_A = U_m \sin \omega t; \quad u_B = U_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right); \quad u_C = U_m \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (3.1)$$

При подключении к статорным обмоткам электрической нагрузки по обмоткам протекают токи i_A , i_B и i_C , которые создают вращающееся магнитное поле статора. Частота вращения ω_s поля статора совпадает в установившемся режиме с частотой вращения ротора ω_r . Взаимодействие магнитных полей статора и ротора создает электромагнитную силу, которая направлена против силы, приложенной к ротору со стороны дизеля.

Электрическая схема СГ представляет собой схему индуктивностей (рис.3.2).

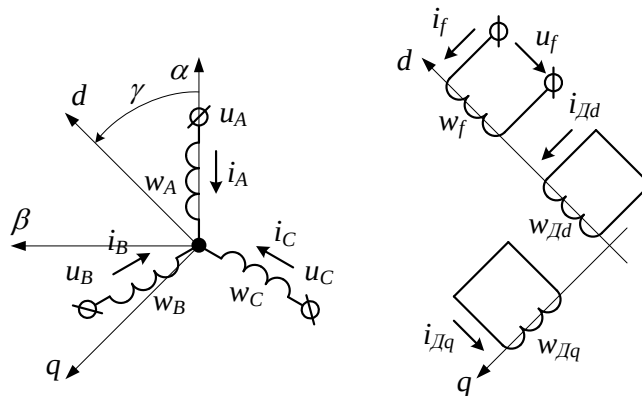


Рис.3.2. Схема обмоток синхронного генератора

Для обмоток статора вводится неподвижная относительно них система осей α - β , причем ось α совпадает с осью обмотки фазы A , а ось β опережает ось α на 90° .

Для ротора вводятся оси d - q , причем ось d совпадает с осью обмотки возбуждения, а ось q опережает ось d на угол 90° . Следовательно, оси d - q вращаются в месте с ротором и обмотки ротора неподвижны относительно этих осей.

Физическая демпферная обмотка заменена на две взаимно-перпендикулярные обмотки, ориентированные по осям d и q , с числом витков $w_{\mathcal{D}d}$ и $w_{\mathcal{D}q}$.

За счет вращения ротора между осями d и α образуется угол γ изменяющийся по закону $\gamma = \gamma_0 + \omega_r t$

Величина скольжения для СГ определяется выражением

$$s = \frac{\omega_r - \omega_s}{\omega_s}, \quad \text{откуда} \quad \omega_r = (1 + s)\omega_s$$

Запишем уравнения по закону Кирхгофа для всех контуров и уравнения связи потокосцеплений всех обмоток с токами в фазах статора, обмотках возбуждения и демпферной (индексы A, B, C относятся к фазам статора, индекс f – к обмотке возбуждения, $\mathcal{D}$ – к демпферной обмотке):

$$\begin{aligned} u_A &= r i_A + \frac{d\psi_A}{dt}; \\ u_B &= r i_B + \frac{d\psi_B}{dt}; \\ u_C &= r i_C + \frac{d\psi_C}{dt}; \\ u_f &= r i_f + \frac{d\psi_f}{dt}; \\ 0 &= r_{\mathcal{D}d} i_{\mathcal{D}d} + \frac{d\psi_{\mathcal{D}d}}{dt}; \\ 0 &= r_{\mathcal{D}q} i_{\mathcal{D}q} + \frac{d\psi_{\mathcal{D}q}}{dt}, \end{aligned} \tag{3.2}$$

(здесь r – активное сопротивление фазы статора).

$$\begin{aligned} \psi_A &= L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Af} i_f + M_{A\mathcal{D}d} i_{\mathcal{D}d} + M_{A\mathcal{D}q} i_{\mathcal{D}q}; \\ \psi_B &= M_{BA} i_A + L_B i_B + M_{BC} i_C + M_{Bf} i_f + M_{B\mathcal{D}d} i_{\mathcal{D}d} + M_{B\mathcal{D}q} i_{\mathcal{D}q}; \\ \psi_C &= M_{CA} i_A + M_{CB} i_B + L_C i_C + M_{Cf} i_f + M_{C\mathcal{D}d} i_{\mathcal{D}d} + M_{C\mathcal{D}q} i_{\mathcal{D}q}; \\ \psi_f &= L_f i_f + M_{fA} i_A + M_{fB} i_B + M_{fC} i_C + M_{f\mathcal{D}d} i_{\mathcal{D}d}; \\ \psi_{\mathcal{D}d} &= L_{\mathcal{D}d} i_{\mathcal{D}d} + M_{\mathcal{D}dA} i_A + M_{\mathcal{D}dB} i_B + M_{\mathcal{D}dC} i_C + M_{\mathcal{D}df} i_f; \\ \psi_{\mathcal{D}q} &= L_{\mathcal{D}q} i_{\mathcal{D}q} + M_{\mathcal{D}qA} i_A + M_{\mathcal{D}qB} i_B + M_{\mathcal{D}qC} i_C. \end{aligned} \tag{3.3}$$

Собственные индуктивности обмоток машины L_A , L_B , L_C , L_f , L_D при вращении ротора изменяются с периодом 180 эл. град, относительно некоторого среднего значения и имеют следующие зависимости от угла поворота ротора γ относительно оси фазы статора:

$$\begin{aligned} L_A &= L_0 + L_m \cos 2\gamma; \\ L_B &= L_0 + L_m \cos(2\gamma + 120^\circ); \\ L_C &= L_0 + L_m \cos(2\gamma - 120^\circ). \end{aligned} \quad (3.4)$$

Взаимные индуктивности между фазами статора:

$$\begin{aligned} M_{AB} &= M_0 + M_m \cos(2\gamma - 120^\circ); \\ M_{BC} &= M_0 + M_m \cos 2\gamma; \\ M_{AC} &= M_0 + M_m \cos(2\gamma + 120^\circ). \end{aligned} \quad (3.5)$$

Обычно максимальные значения величин L_m и M_m близки друг другу.

Взаимные индуктивности между обмотками статора и ротора:

$$\begin{aligned} M_{Af} &= M_f \cos \gamma; \\ M_{Bf} &= M_f \cos(\gamma - 120^\circ); \\ M_{Cf} &= M_f \cos(\gamma + 120^\circ); \\ M_{ADd} &= m_{ADd} \cos \gamma; \\ M_{BDd} &= m_{ADd} \cos(\gamma - 120^\circ); \\ M_{CDd} &= m_{ADd} \cos(\gamma + 120^\circ); \\ M_{ADq} &= -m_{ADq} \cos \gamma; \\ M_{BDq} &= -m_{ADq} \cos(\gamma - 120^\circ); \\ M_{CDq} &= -m_{ADq} \cos(\gamma + 120^\circ), \end{aligned} \quad (3.6)$$

где m_{ADd} и m_{ADq} – взаимные индуктивности фазной обмотки статора с продольным и поперечным контурами при совпадении их магнитных осей.

3.1.2. Уравнения во вращающихся осях

Используя приведенную выше систему дифференциальных и алгебраических уравнений, можно моделировать все основные процессы синхронных генераторов. Однако решать уравнения с переменными коэффициентами весьма сложно. Полученные выражения для напряжения, тока и потокосцепления в виде синусоидальных величин в трех фазах не всегда удобно использовать для анализа переходных процессов. Решение системы уравнений затруднительно, так как выражения для самоиндуктивности и взаимной индуктивности содержат периодические функции углового положения ротора, система уравнений нелинейная. Поэтому при анализе симметричных режимов синхронного генератора намного удобнее работать с уравнениями приведенными к осям, жестко связанным с вращающимся ротором. Для этого начало координат трехфазной системы неподвижных векторов совмещаются с началом вращающейся двухфазной системы, оси которой d и q совмещаются с продольной и поперечной осями ротора.

В системе координат осей d и q (рис.3.3) обмотки статора и ротора

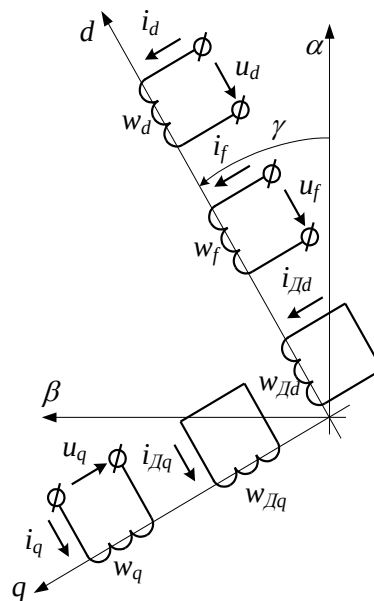


Рис. 3.3. Схема обмоток СГ в осях d и q ротора

синхронного генератора оказываются неподвижными друг относительно друга а, значит, коэффициенты взаимоиндукции и индуктивности всех обмоток становятся постоянными величинами. В этом состоит основное преимущество такого представления синхронного генератора, так как дифференциальные уравнения (3.2) становятся линейными.

Для синхронного генератора, имеющего на роторе обмотку возбуждения и по одному короткозамкнутому контуру в продольной и поперечной осях, уравнения равновесия напряжений запишем в координатной системе d и q [98]:

$$\begin{cases} -u_d = i_d r + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_s(1+s)\Psi_q \\ -u_q = i_q r + \frac{d\Psi_q}{dt} - \omega_s(1+s)\Psi_d \\ u_f = i_f r_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \\ 0 = i_{\Delta d} r_{\Delta d} + \frac{d\Psi_{\Delta d}}{dt} \\ 0 = i_{\Delta q} r_{\Delta q} + \frac{d\Psi_{\Delta q}}{dt} \end{cases} \quad (3.7)$$

Выражения для потокосцеплений статорных и роторных контуров в виде [98]:

$$\begin{aligned} \Psi_d &= L_d i_d + M_{Ad} (i_f + i_{\Delta d}); \\ \Psi_q &= L_q i_q + M_{Aq} i_{\Delta q}; \\ \Psi_f &= L_f i_f + M_{Ad} i_{\Delta d} + \left(\frac{3}{2}\right) M_{Ad} i_d; \\ \Psi_{\Delta d} &= L_{\Delta d} i_{\Delta d} + M_{Ad} i_f + \left(\frac{3}{2}\right) M_{Ad} i_d; \\ \Psi_{\Delta q} &= L_{\Delta q} i_{\Delta q} + \left(\frac{3}{2}\right) M_{Aq} i_q \end{aligned} \quad (3.8)$$

где L_d, L_q – индуктивности обмоток статора в продольной и поперечной осях;
 $L_f, L_{\Delta d}, L_{\Delta q}$ – индуктивности обмоток возбуждения и демпферных обмоток по продольной и поперечной осям;

M_{Ad} , M_{Aq} – взаимные индуктивности любой пары контуров в продольной и поперечной осях машины.

При математическом моделировании синхронного генератора перейдем к относительным единицам. За базисные величины принимаем следующие $U_{\sigma} = U_{\phi m}$ – базисное напряжение, равное амплитуде номинального фазного напряжения статора; $I_{\sigma} = I_{\phi m}$ – базисный ток статора, равный амплитуде номинального фазного тока статора; $\omega_{\sigma} = \omega_s$ – базисная угловая частота, равная синхронной; $t_{\sigma} = \frac{1}{\omega_{\sigma}}$ – базисная единица времени.

Для остальных статорных переменных базисные величины определяются соотношениями: $Z_{\sigma} = \frac{U_{\sigma}}{I_{\sigma}}$ – сопротивление; $L_{\sigma} = \frac{Z_{\sigma}}{\omega_{\sigma}}$ – индуктивность; $\Psi_{\sigma} = \frac{U_{\sigma}}{\omega_{\sigma}} = \frac{Z_{\sigma} I_{\sigma}}{\omega_{\sigma}}$ – потокосцепление; $M_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{\omega_{\sigma}}$ – момент;

$S_{\sigma} = 3U_{\phi} I_{\phi} = \frac{3}{2} U_{\phi m} I_{\phi m} = \frac{3}{2} U_{\sigma} I_{\sigma}$ – мощность.

Базисные токи роторных контуров находим, предполагая, что они создают в воздушном зазоре такую же первую гармоническую поля, как и продольная реакция статора при базисном токе. Базисные величины всех других переменных приравниваем базисным величинам для статорных контуров.

Преимущество дифференциальных уравнений в относительных единицах в том, что упрощается выбор численного метода решения системы дифференциальных уравнений СГ, а также возможно сравнение между собой процессов в генераторах разных мощностей. С формальной точки зрения переход от физической системы уравнений к уравнениям в относительных единицах представляет собой замену одних переменных другими.

Реальная обмотка возбуждения с током i_f и приведенная обмотка с током i'_f должны создавать одинаковое поле основной гармоники в воздушном зазоре [98]. Исходя из этого условия

$$\frac{\mu_0}{k_\delta k_{\mu d} \delta} \cdot \frac{w_B}{2p} i_f k_f = \frac{\mu_0}{k_\delta k_{\mu d} \delta} \cdot \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{wk_{o\delta}}{p} \cdot \frac{i'_f}{\sqrt{2}} k_{Ad}, \quad (3.9)$$

где k_δ – коэффициент воздушного зазора;

$k_{\mu d}$ – коэффициент насыщения магнитной цепи по оси полюсов;

δ – величина воздушного зазора;

w_f – число витков обмотки возбуждения;

k_f – коэффициент формы кривой поля возбуждения;

m – число фаз обмотки статора; w – число витков фазы статора;

$k_{o\delta}$ – обмоточный коэффициент;

k_{Ad} – коэффициент формы поля статора по продольной оси.

$$i'_f = \frac{i_f}{k_{if}}, \quad (3.10)$$

где $k_{if} = \left(\frac{2m}{\pi} \right) \left(\frac{wk_{o\delta}k_d}{w_f} \right)$ – коэффициент приведения тока возбуждения, причем

$$k_d = \frac{k_{Ad}}{k_f}.$$

Коэффициент приведения напряжения обмотки возбуждения находится из условия равенства мощностей реальной и приведенной обмоток возбуждения [98]:

$$u_f i_f = m \left(\frac{u'_f}{\sqrt{2}} \right) \left(\frac{i'_f}{\sqrt{2}} \right),$$

откуда

$$u'_f = \left(\frac{2}{m} \right) \left(\frac{i_f}{i'_f} \right) u_f = \left(\frac{2}{m} \right) k_{if} u_f = k_{uf} u_f,$$

где $k_{uf} = \left(\frac{2}{m} \right) k_{if} = \left(\frac{4}{\pi} \right) \left(\frac{wk_{o\delta}}{\omega_f} \right) k_d$ – коэффициент приведения напряжения возбуждения.

Коэффициент приведения сопротивлений и индуктивностей

$$k_{zf} = k_{if} k_{uf} = \frac{2}{m} k_{if}^2 = \left(\frac{8m}{\pi^2} \right) \left(\frac{w^2 k_{o\delta}^2}{\omega_f^2} \right) k_d^2$$

дает возможность найти приведённые сопротивления и индуктивности:

$$r'_f = k_{zb} r_f ; \quad L'_f = k_{zf} L_f$$

Аналогично коэффициенты приведения токов эквивалентной демпферной обмотки по продольной и поперечной осям [98]:

$$k_{id} = \frac{2m}{\pi} \cdot \frac{wk_{ob}}{w_{\Delta d}} \cdot \frac{k_{Ad}}{k_{\Delta d}} ; \quad k_{iq} = \frac{2m}{\pi} \cdot \frac{wk_{ob}}{w_{\Delta q}} \cdot \frac{k_{Aq}}{k_{\Delta q}} \quad (3.11)$$

где $w_{\Delta d}$, $w_{\Delta q}$ – число витков эквивалентных демпферных обмоток;

$k_{\Delta d}$, $k_{\Delta q}$ – коэффициенты формы для эквивалентных демпферных обмоток по осям d и q;

k_{Ad} , k_{Aq} – коэффициенты формы поля статора по осям d и q.

Коэффициенты приведения напряжений:

$$\begin{cases} k_{ud} = \frac{2}{m} k_{id} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{wk_{ob}}{w_{\Delta d}} \cdot \frac{k_{Ad}}{k_{\Delta d}} ; \\ k_{uq} = \frac{2}{m} k_{iq} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{wk_{ob}}{w_{\Delta q}} \cdot \frac{k_{Aq}}{k_{\Delta q}} . \end{cases} \quad (3.12)$$

Коэффициенты приведения сопротивлений:

$$\begin{cases} k_{zd} = k_{id} k_{ud} = \frac{8m^2}{\pi^2} \cdot \frac{w^2 k_{ob}^2}{w_{\Delta d}^2} \cdot \left(\frac{k_{Ad}}{k_{\Delta d}} \right)^2 ; \\ k_{zq} = k_{iq} k_{uq} = \frac{8m^2}{\pi^2} \cdot \frac{w^2 k_{ob}^2}{w_{\Delta q}^2} \cdot \left(\frac{k_{Aq}}{k_{\Delta q}} \right)^2 . \end{cases} \quad (3.13)$$

В уравнениях (3.8) взаимные индуктивности между обмотками статора и ротора являются необратимыми. Использование выражений (3.12), (3.13) для коэффициентов приведения роторных величин к статорным позволяет получить уравнения синхронной машины, в которых взаимные индуктивности становятся обратимыми и в преобразованной системе координат. Для этого необходимо в уравнениях (3.7) и (3.8) вместо токов роторных обмоток подставить их приведённые значения, а уравнения равновесия напряжений роторных цепей дополнительно умножить соответственно на k_{uf} , k_{ud} , k_{uq} . Тогда уравнения равновесия роторных

контуров (3.7) с учётом уравнений для потокосцеплений (3.8) принимают следующий вид [98]:

$$\begin{cases} k_{uf}u_f = k_{uf}k_{if}\left(r_f + L_f \frac{d}{dt}\right)i'_f + k_{uf} \frac{d}{dt}\left(\frac{3}{2}M_{Ad}i_d\right) + k_{uf}k_{id} \frac{d}{dt}(M_{Ad}i'_{\Delta d}), \\ 0 = k_{ud}k_{id}\left(r_{\Delta d} + L_{\Delta d} \frac{d}{dt}\right)i'_{\Delta d} + k_{ud} \frac{d}{dt}\left(\frac{3}{2}M_{Ad}i_d\right) + k_{ud}k_{if} \frac{d}{dt}(M_{Ad}i'_f), \\ 0 = k_{uq}k_{iq}\left(r_{\Delta q} + L_{\Delta q} \frac{d}{dt}\right)i'_{\Delta q} + k_{uq} \frac{d}{dt}\left(\frac{3}{2}M_{Aq}i_q\right). \end{cases} \quad (3.14)$$

Или

$$\begin{cases} u'_f = r'_f i'_f + \frac{d\Psi'_f}{dt}; \\ 0 = r'_{\Delta d} i'_{\Delta d} + \frac{d\Psi'_{\Delta d}}{dt}; \\ 0 = r'_{\Delta q} i'_{\Delta q} + \frac{d\Psi'_{\Delta q}}{dt}. \end{cases} \quad (3.15)$$

где величины со штрихом являются приведёнными:

$$\begin{cases} \Psi'_f = L'_f i'_f + M'_{Ad}(i_d + i'_{\Delta d}); \\ \Psi'_{\Delta d} = L'_{\Delta d} i'_{\Delta d} + M'_{Ad}(i_d + i'_f); \\ \Psi'_{\Delta q} = L'_{\Delta q} i'_{\Delta q} + M'_{Ad}i_q. \end{cases} \quad (3.16)$$

Здесь введены обозначения:

$$\begin{cases} M'_{Ad} = k_{if}M_{Ad} = \left(\frac{3}{2}\right)k_{uf}M_{Ad}; \\ M'_{Ad} = k_{id}M_{Ad} = \left(\frac{3}{2}\right)k_{ud}M_{Ad}; \\ M'_{Aq} = k_{iq}M_{Aq} = \left(\frac{3}{2}\right)k_{uq}M_{Aq}; \\ L'_f = k_{if}k_{uf}L_f; \quad r'_f = k_{if}k_{uf}r_f; \\ L'_{\Delta d} = k_{id}k_{ud}L_{\Delta d}; \quad r'_{\Delta d} = k_{id}k_{ud}r_{\Delta d}; \\ L'_{\Delta q} = k_{iq}k_{uq}L_{\Delta q}; \quad r'_{\Delta q} = k_{iq}k_{uq}r_{\Delta q}; \\ M'_{Ad} = M_{Ad}k_{id}k_{uf} = M_{Ad}k_{if}k_{ud} \end{cases} \quad (3.17)$$

Запишем уравнения потокосцеплений обмоток статора при приведённых обмотках ротора:

$$\Psi_d = L_d i_d + M'_{Ad} (i'_f + i'_{\Delta d}), \quad \Psi_q = L_q i_q + M'_{Aq} i'_{\Delta q}. \quad (3.18)$$

Разделим в системе (3.7) уравнения равновесия напряжений контуров на Ψ_δ , а уравнение равновесия моментов на m_δ . Учитывая равенство в относительных единицах соответствующих индуктивных сопротивлений индуктивностям и взаимным индуктивностям и осуществляя дифференцирование по $\tau = \omega_s t$, получим систему уравнений Парка-Горева следующего вида [98]:

$$\begin{cases} p\Psi_d = -u_d + (1+s)\Psi_q - r i_d; \\ p\Psi_q = -u_q - (1+s)\Psi_d - r i_q; \\ p\Psi_f = u_f - r_f i_f; \\ p\Psi_{\Delta d} = -r_{\Delta d} i_{\Delta d}; \\ p\Psi_{\Delta q} = -r_{\Delta q} i_{\Delta q} \end{cases} \quad (3.19)$$

p – символ дифференцирования, $\Psi_d, \Psi_q, \Psi_f, \Psi_{\Delta d}, \Psi_{\Delta q}$ – потокосцепления обмоток модельного СГ, которые определяются выражениями

$$\begin{cases} \Psi_d = x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_{\Delta d}; \\ \Psi_q = x_q i_q + x_{aq} i_{\Delta q}; \\ \Psi_f = x_{ad} i_d + x_f i_f + x_{ad} i_{\Delta d}; \\ \Psi_{\Delta d} = x_{ad} i_d + x_{ad} i_f + x_{\Delta d} i_{\Delta d}; \\ \Psi_{\Delta q} = x_{aq} i_q + x_{\Delta q} i_{\Delta q} \end{cases} \quad (3.20)$$

В выражениях системы (3.20) индуктивные сопротивления определяются из рис. 3.4.

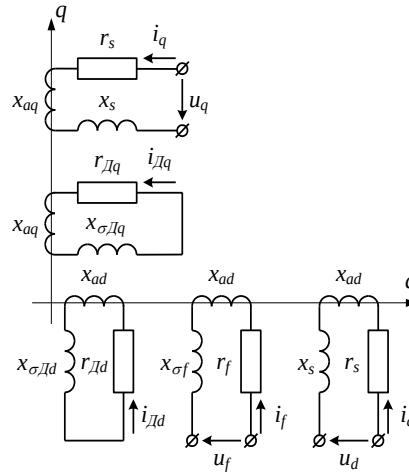


Рис. 3.4. Развернутая схема обмоток СГ в осях d и q ротора

На рис. 3.4 обозначены сопротивления:

x_{ad} – сопротивление взаимной индукции обмоток СГ по продольной оси d ;

x_{aq} – сопротивление взаимной индукции обмоток СГ по поперечной оси q ;

x_s – индуктивное сопротивление рассеяния обмоток статора;

$x_{\sigma f}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения;

$x_{\sigma dd}$, $x_{\sigma dq}$ – индуктивные сопротивления рассеяния демпферных обмоток по осям d и q ;

r , r_f , r_{dd} , r_{dq} – активные сопротивления обмоток СГ.

Полные индуктивные сопротивления обмоток равны сумме индуктивных сопротивлений взаимной индукции и индуктивного сопротивления рассеяния:

$$\begin{aligned} x_d &= x_{ad} + x_s; & x_q &= x_{aq} + x_s; & x_f &= x_{ad} + x_{\sigma f}; \\ x_{dd} &= x_{ad} + x_{\sigma dd}; & x_{dq} &= x_{aq} + x_{\sigma dq}. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Время t в УПГ измеряется в электрических секундах, (1 секунда физическая равна 314 секундам электрическим, $314 = 2 \cdot \pi \cdot f_c = 2 \cdot \pi \cdot 50$).

Если в результате решения получены токи i_d и i_q , то ток i_A фазы A физического генератора определится выражением

$$i_A = i_d \cos(\gamma_0 + \omega_c t) - i_q \sin(\gamma_0 + \omega_c t),$$

где ω_c – круговая частота тока в сети;

t – физическое время;

γ_0 – начальный угол (при $t=0$) между осями d и a .

Токи обмоток выражаются через потокосцепления по формулам

$$\begin{cases} i_d = \frac{x_f x_{\mathcal{L}d} - x_{ad}^2}{D_d} \Psi_d - \frac{x_{ad} x_{\sigma \mathcal{L}d}}{D_d} \Psi_f - \frac{x_{ad} x_{\sigma f}}{D_d} \Psi_{\mathcal{L}d}; \\ i_q = \frac{x_{\mathcal{L}q}}{D_q} \Psi_q - \frac{x_{aq}}{D_q} \Psi_{\mathcal{L}q}; \\ i_f = \frac{x_d x_{\mathcal{L}d} - x_{ad}^2}{D_d} \Psi_f - \frac{x_{ad} x_{\sigma \mathcal{L}d}}{D_d} \Psi_d - \frac{x_{ad} x_s}{D_d} \Psi_{\mathcal{L}d}; \\ i_{\mathcal{L}d} = \frac{x_f x_d - x_{ad}^2}{D_d} \Psi_{\mathcal{L}d} - \frac{x_{ad} x_{\sigma}}{D_d} \Psi_d - \frac{x_{ad} x_s}{D_d} \Psi_f; \\ i_{\mathcal{L}q} = \frac{x_q}{D_q} \Psi_{\mathcal{L}q} - \frac{x_{aq}}{D_q} \Psi_q, \end{cases} \quad (3.22)$$

где $D_d = x_d x_f x_{\mathcal{L}d} + 2x_{ad}^3 - x_{ad}^2(x_d + x_f + x_{\mathcal{L}d})$; $D_q = x_q x_{\mathcal{L}q} - x_{aq}^2$.

3.1.3. Определение численных значений коэффициентов уравнений синхронного генератора

Для проведения расчетов из технических условий на синхронный генератор необходимо использовать каталожные данные. Часть из них предоставлена в относительных единицах $x_s, x_d, x_q, x'_d, x''_d, x_2$, а часть — в абсолютных единицах $r, r_f, T'_{d0}, T'_d, T''_d, T_a$, которые перед использованием в вычислениях необходимо перевести в относительные единицы [98, 103].

1) базисные величины:

$$U_{\text{баз}} = U_H \sqrt{\frac{2}{3}}; \quad I_{\text{баз}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{P_H}{\sqrt{3} U_H \cos \varphi_H}; \quad z_{\text{баз}} = \frac{U_{\text{баз}}}{I_{\text{баз}}};$$

2) сопротивления взаимной индукции по осям d и q:

$$x_{ad} = x_d - x_s; \quad x_{aq} = x_q - x_s;$$

3) индуктивные сопротивления демпферной обмотки по оси d:

$$x_{\sigma \mathcal{L}d} = \frac{1}{\frac{1}{x''_d - x_s} - \frac{1}{x'_d - x_s}}; \quad x_{\mathcal{L}d} = x_{\sigma \mathcal{L}d} + x_{ad};$$

4) индуктивные сопротивлений обмотки возбуждения:

$$x_f = \frac{x_{ad}^2}{x_d - x'_d}; \quad x_{\sigma f} = x_f - x_{ad};$$

5) индуктивные сопротивления демферной обмотки по оси q :

$$x_{\sigma dq} = \frac{x_{aq}(x_q'' - x_s)}{x_q - x_q''}; \quad x_{dq} = x_{\sigma dq} + x_{aq};$$

6) активные сопротивления обмоток ротора

$$r_{dd} = \left[x_{\sigma dd} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma f}} + \frac{1}{x_s}} \right] \cdot \frac{1}{\omega_c T_d''}, \quad \text{где} \quad \omega_c = 314;$$

$$r_f = \frac{x_f x_d'}{\omega_c T_d' x_d}; \quad r_{dq} = 0,75 \cdot r_{dd}; \quad r^{(o.e.)} = \frac{r^{(Om)}}{z_{\delta a3}};$$

7) коэффициенты трансформации для сопротивления и тока СГ:

$$k_z = \frac{r_f^{(o.e.)} z_{\delta a3}}{r_f^{(Om)}}; \quad k_i = \sqrt{\frac{3}{2}} k_z$$

и ток обмотки возбуждения, приведенный к обмотке статора и выраженный в

относительных единицах: $I_f = \frac{\sqrt{2}}{x_{ad}}$

3.1.4. Упрощенные уравнения синхронного генератора

В зависимости от поставленных задач по исследованию режимов работы в судовых электроэнергетических системах и требований к точности расчета уравнения следует выбирать с различной степенью упрощения [103]. Так во многих расчетах, направленных на изучение изменения напряжений и токов при нагрузках, близких к номинальным, при исследованиях устойчивости и т. п. можно пренебрегать демферными обмотками, апериодическими составляющими токов статора и изменением скорости вращения машин. После применения таких допущений уравнения синхронного генератора значительно упростятся:

$$\begin{cases} p\Psi_d = -u_d + \omega_r \Psi_q - r i_d; \\ p\Psi_q = -u_q - \omega_r \Psi_d - r i_q; \\ p\Psi_f = u_f - r_f i_f; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Psi_d = (x_{ad} + x_s)i_d + x_{ad}i_f; \\ \Psi_q = (x_{aq} + x_s)i_q; \\ \Psi_f = x_{ad}i_d + x_fi_f; \end{cases}$$

Здесь Ψ_d, Ψ_q – проекции векторов потокоцеплений статора на оси d, q ; u_d, u_q – проекции вектора напряжения на оси d, q ; r – сопротивление статорной обмотки; i_d, i_q – проекции вектора тока на оси d, q ; Ψ_f, i_f, u_f, r_f – потокоцепление, ток, напряжение и сопротивление обмотки возбуждения; t – время, x_s – индуктивное сопротивление рассеяния статорной обмотки; x_{ad}, x_{aq} – индуктивные сопротивления главного контура намагничивания по осям d, q ; x_f – индуктивное сопротивление обмотки возбуждения, p – символ дифференцирования.

3.2. Уравнения автоматического регулятора напряжения

Прямое амплитудно-фазовое компаундирование является основным принципом работы отечественных регуляторов напряжения судовых генераторов [103]. Компаундирующий трехобмоточный трансформатор с подмагничиванием выполняет в них основную функцию, работая в режиме трансформатора тока, причем магнитодвижущая сила одной из первичных обмоток пропорциональна току генератора, другой – напряжению на его зажимах (рис. 3.5).

Для определения напряжения на обмотке возбуждения генератора необходимо знать индукцию магнитного потока в железе в каждый момент времени, которая в свою очередь зависит от результирующей намагничивающей силы компаундирующего трансформатора.

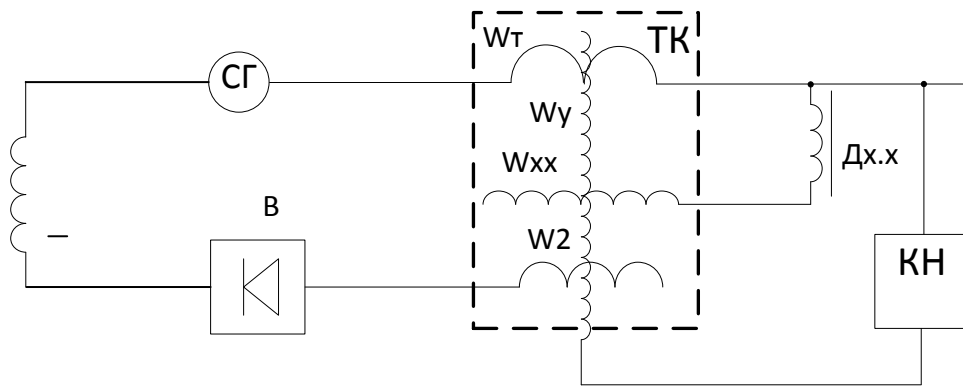


Рис. 3.5. Генератор с системой управляемого прямого амплитудно-фазового компаундирования:

СГ – синхронный генератор; ОБГ – обмотка возбуждения генератора; В – выпрямитель; ТК – трансформатор компаундирования; КН – корректор напряжения; Д_{хх} – дроссель холостого хода; W_T – токовая обмотка; W_{хх} – обмотка холостого хода; W₂ – вторичная обмотка; W_к – обмотка управления

Обозначим суммарную намагничивающую силу (н. с.), создаваемую токами двух первичных обмоток (токовой и холостого хода) через F_1 а н. с. вторичной обмотки через F_2 , тогда при отсутствии подмагничивания магнитопровода трансформатора можно записать:

$$\overline{F_p} = \overline{F_1} - \overline{F_2},$$

где F_p – результирующая н. с.

Преобразуем векторную разность н. с. в алгебраическую, для этого в соответствии с векторной диаграммой трансформатора тока спроектируем н. с. всех его обмоток на направление $\overline{F_2}$:

$$F_p \cos \alpha_0 \approx F_1 - F_2,$$

где α_0 – угол между векторами $\overline{F_p}$ и $\overline{F_2}$.

При подмагничивании магнитопровода трансформатора характеристики намагничивания железа сдвигаются вправо на величину н. с. управления F_y . Значит, уравнение баланса ампервитков имеет вид:

$$F_p \cos \alpha_0 \approx F_1 - F_2 - F_y.$$

Результирующая намагничивающая сила $F_p \cos \alpha_0$ создает в магнитопроводе поток, индукция которого по закону магнитной цепи равна $k_F F_p$, где k_F – коэффициент пропорциональности. Напряжение на вторичной обмотке трансформатора по закону электромагнитной индукции (без учета апериодической составляющей) пропорционально индукции B : $e_2 = k_B B$. Выпрямленное напряжение, подаваемое на обмотку возбуждения,

$$u_f = k_B e_2,$$

где k_B – коэффициент выпрямления, а e_2 – ЭДС вторичной обмотки.

Если пренебречь нелинейностью основной кривой намагничивания (до насыщения), считать постоянными коэффициент выпрямления выпрямителя и величину угла α_0 (существенно зависящую только от параметров цепи возбуждения), то

$$u_f = k_f F_p.$$

Соответственно

$$u_f = k_j (F_1 - F_2 - F_y).$$

Полученное выражение является основным для вывода уравнения регулятора напряжения.

Запишем зависимость намагничивающей силы F_1 от напряжения и тока генератора в общем виде:

$$\overline{F_1} = k_u \overline{u} + k_i x_d \overline{I};$$

$$|\overline{F_1}| = \sqrt{(k_u u)^2 + (k_i x_d I)^2 + 2k_u k_i x_d u I \sin \varphi},$$

где φ – угол фазного сдвига тока и напряжения;

x_d – продольная индуктивность генератора.

Можно разложить ток и напряжение по осям d и q :

$$\overline{F_1} = \sqrt{(k_u u_q + k_i x_d I_d)^2 + (k_u u_d - k_i x_d I_q)^2},$$

учитывая, что

$$u_q = u \cos \sigma;$$

$$u_d = u \sin \sigma;$$

$$I_d = I \sin(\sigma - \varphi);$$

$$I_q = I \cos(\sigma + \varphi).$$

В установившемся режиме генератора $u_d = x_d I_d$, тогда вторую часть подкоренного выражения можно записать как

$$(k_u - k_i)u_d - k_i(x_d - x_q)i_q.$$

Расчеты показывают, что значение этого выражения составляет 0,1 - 0,2 (в относительных единицах) и при сложении ею можно пренебречь.

Тогда намагничивающая сила имеет вид: $F_1 = k_u u_q + k_i x_d I_d$.

Намагничивающая сила вторичной обмотки $F_2 = k_{Bf} i_f$,

где k_{Bf} - коэффициент, зависящий от числа витков вторичной обмотки и коэффициента выпрямления по току.

Намагничивающая сила $F_y = \omega_y i_y$ может быть связана с напряжением генератора выражением в операторной форме: $F_y(p) = s(p) \Delta u(p)$, где Δu - отклонение напряжения генератора, $s(p)$ - передаточная функция цепи, состоящей из обмотки подмагничивания компаундирующего трансформатора, измерительного элемента регулятора (корректора напряжения) и усилителя.

В соответствии с характеристикой измерительного элемента на рис. 3.6, отклонение напряжения $\Delta u = u - u_0$.

Передаточная функция обмотки подмагничивания:

$$\frac{F_y(p)}{u_y(p)} = \frac{k_y}{T_y p + 1},$$

где u_y - напряжение на обмотке подмагничивания;

k_y, T_y - соответственно коэффициент усиления и постоянная времени обмотки.

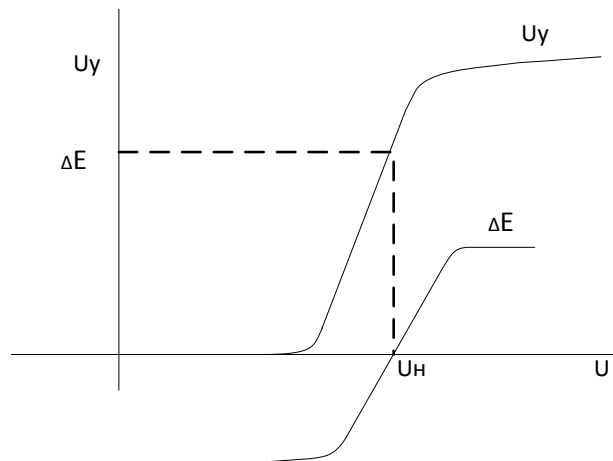


Рис. 3.6. Характеристики корректора напряжения: u – напряжение генератора; u_y – напряжение на обмотке управления; ΔE – величина, характеризующая эквивалентное действие системы подмагничивания трансформатора компаундирования

Передаточная функция усилителя может быть вида

$$\frac{u_y(p)}{u_{\text{вых}}(p)} = \frac{k_p}{Tp + 1},$$

где $u_{\text{вых}}$ – выходное напряжение измерительного элемента.

Измерительный элемент представляет собой безинерционное звено с коэффициентом усиления k_u

$$u_{\text{вых}}(p) = k_u \Delta u(p).$$

В соответствии с изложенным передаточная функция

$$s(p) = \frac{F_y(p)}{\Delta U(p)} = \frac{k_y k_p k_u}{(T_y p + 1)(Tp + 1)}.$$

Тогда, $u_f = k_f [k_u u_q + k_i x_d I_d - k_{Bf} i_f - k_f F_y]$.

Синхронный генератор бесконтактного исполнения получает напряжение возбуждения U_f от возбудителя, инерционность которого определяется постоянной времени T_B [16,17,18,19].

Возбудитель бесщеточного синхронного генератора и пропорциональный регулятор напряжения опишем следующим дифференциальным уравнением [16,17,18,19]

$$\frac{du_f}{dt} = [-u_f + K_f(U_0 - u_m)]/T_B,$$

где K_f – коэффициент передачи регулятора, $1 \leq K_f \leq 100$,

$u_m = \sqrt{u_d^2 + u_q^2}$, U_0 – задание по напряжению,

T_B – постоянная времени возбудителя, $1 \leq T_B \leq 300$.

В математической модели синхронного генератора введем ограничение напряжения возбуждения $U_{f \min} \leq U_f \leq U_{f \max}$ [16,17,18,19]. Верхнее ограничение возбуждения $U_{f \max}$ определяет форсировочные возможности системы регулирования. Величина $U_{f \max}$ зависит от мощности возбудителя. Величина $U_{f \max}$ составляет 1,1...2,5 номинальных значений напряжения. Нижнее ограничение напряжения возбуждения $U_{f \min}$ устанавливается для создания магнитного потока, который создает минимально необходимый синхронизирующий момент генератора при параллельной работе.

3.3. Уравнения статической 3-фазной симметричной активно-индуктивной загрузки

В неподвижной системе координат уравнение активно-индуктивной нагрузки для фазы А имеет вид [103]:

$$u_A = R_n i_{nA} + L_n \frac{di_{nA}}{dt}.$$

Совместим с началом координат системы осей А, В, С начало координат системы d, q, вращающейся в пространстве со скоростью $\omega_r = p\gamma$ где, γ – угол между осями.

Выразим величину фазного напряжения u_A , приложенного к нагрузке и равного проекции изображающего вектора u на ось А, через проекции его на оси d и q, тогда

$$u_A = u_d \cos \gamma - u_q \sin \gamma.$$

Аналогично ток нагрузки фазы А:

$$i_{nA} = i_{dn} \cos \gamma - i_{qn} \sin \gamma.$$

Подставим эти равенства в уравнение Кирхгофа для фазы А

$$u_d \cos \gamma - u_q \sin \gamma = R_n i_{dn} \cos \gamma - R_n i_{qn} \sin \gamma + L_n p i_{dn} \cos \gamma - L_n i_{dn} \sin \gamma p \gamma - L_n p i_{qn} \sin \gamma - L_n i_{qn} \cos \gamma p \gamma$$

$$(u_d - R_n i_{dn} L_n p i_{dn} + L_n p i_{qn}) \cos \gamma + (-u_q + R_n i_{qn} + L_n i_{dn} p \gamma + L_n p i_{qn}) \sin \gamma = 0,$$

равенство типа $A \cos \gamma + B \sin \gamma = 0$ может быть истинно при $A=B=0$. Тогда можно записать уравнения нагрузки в осях d и q :

$$u_d = R_n i_{dn} - L_n p i_{qn} + L_n p i_{dn};$$

$$u_q = R_n i_{qn} + L_n p i_{dn} + L_n p i_{qn}.$$

Запишем эти уравнения в относительных единицах. Примем за базисное напряжение $u_{\delta} = z_{\delta} i_{\delta} = L_{\delta} \omega_{\delta} i_{\delta}$ и разделим на него все члены уравнений:

$$\frac{u_d}{u_{\delta}} = \frac{R_n i_{dn}}{z_{\delta} i_{\delta}} - \frac{L_n \omega_r i_{qn}}{L_{\delta} \omega_{\delta} i_{\delta}} + \frac{L_n}{L_{\delta} \omega_{\delta}} p \frac{i_{dn}}{i_{\delta}};$$

$$\frac{u_q}{u_{\delta}} = \frac{R_n i_{qn}}{z_{\delta} i_{\delta}} + \frac{L_n \omega_r i_{dn}}{L_{\delta} \omega_{\delta} i_{\delta}} + \frac{L_n}{L_{\delta} \omega_{\delta}} p \frac{i_{qn}}{i_{\delta}};$$

$$u_d^* = R_n^* i_{dn}^* - x_n^* i_{qn}^* + x_n^* \frac{1}{\omega_r} p i_{dn}^*;$$

$$u_q^* = R_n^* i_{qn}^* + x_n^* i_{dn}^* + x_n^* \frac{1}{\omega_r} p i_{qn}^*.$$

Опуская значки (*), обозначающие относительные величины, получим

$$u_d = R_n i_{dn} - x_n \frac{1}{\omega_r} p i_{dn};$$

$$u_q = R_n i_{qn} + x_n \frac{1}{\omega_r} p i_{qn},$$

где $x_n = \omega_r L_n$, а ω_r — текущее значение частоты, определяемое скоростью вращения системы координат d, q , связанной с ротором генератора. Поэтому если определить x_n при номинальной частоте $\omega_r = \omega_{\delta}$ и подставить его в уравнения нагрузки, то влияние изменения скорости вращения генератора следует учесть умножением x_n на величину $(1+s)$, где $s = \frac{\omega_r - \omega_{\delta}}{\omega_{\delta}}$ — относительное отклонение скорости вращения генератора.

R_n и x_n определяются из равенств:

$$R_n = z_n \cos \varphi;$$

$$x_n = z_n \sin \varphi.$$

Если пренебречь электромагнитными процессами $s=0$, тогда

$$u_d = R_n i_{dn} - x_n i_{qn};$$

$$u_q = R_n i_{qn} + x_n i_{dn}.$$

Уравнения преобразования токов и напряжений статора из системы координат (d, q) , жестко связанной с ротором в неподвижную систему координат (α, β) имеют вид

$$i_{n\alpha} = i_{dn} \cos \gamma - i_{qn} \sin \gamma; \quad i_{n\beta} = i_{qn} \cos \gamma + i_{dn} \sin \gamma;$$

$$u_\alpha = u_d \cos \gamma - u_q \sin \gamma; \quad u_\beta = u_q \cos \gamma + u_d \sin \gamma,$$

где $\gamma = \gamma_0 + \omega_r t$.

3.4. Уравнения первичных двигателей генераторов и автоматических регуляторов скорости вращения

Регулируемым параметром первичного двигателя, как объекта системы автоматического регулирования, является скорость вращения вала. К валу двигателя приложены, с одной стороны, момент потерь и момент генератора, с другой – вращающий момент. Регулирующее воздействие двигателя создается регулирующим органом, изменяющим количество энергоносителя (топлива, пара, газа), от которого непосредственно зависит вращающий момент первичного двигателя. Для паровой турбины регулирующим органом является паровой клапан, для дизеля – рейка топливного насоса.

Приводной двигатель, в качестве которого используется дизель, вводится в систему уравнений в упрощенной форме [103]:

$$J_m \frac{d\omega_r}{dt} = M_d - M_g;$$

$$M_d = K_m h; \quad M_g = \Psi_q i_d - \Psi_d i_q,$$

где J_m – момент инерции всего агрегата, приведенный к валу двигателя, M_d – вращающий механический момент дизеля, M_g – электромагнитный момент сопротивления, развиваемый генератором, h – положение топливной рейки, K_m – коэффициент передачи дизеля по частоте вращения. Все моменты приведены к валу двигателя.

Момент инерции дизель-генераторного агрегата складывается из момента инерции дизеля J и ротора генератора

$$J_m = iJ_{\text{кшм}} + J_m + J_p,$$

где $J_{\text{кшм}}$, J_m – приведенные моменты инерции одного КШМ и маховика, кг*м²; i – количество цилиндров.

Момент инерции $J_{\text{кшм}}$, кг*м, может быть оценен по эмпирической формуле Терских В. П. [26,80] :

$$J_{\text{кшм}} = \frac{1,25 \cdot 10^4 R^3 D \sqrt{b}}{1,4 D \sqrt{b} + R} (k D \sqrt{b} + H d),$$

где D , d – диаметры цилиндра и шейки коленчатого вала; H – расстояние между цилиндрами; b – число полостей, приходящихся на одно колено; R – радиус кривошипа коленчатого вала;

$k = 0,25L + 0,6D\sqrt{b}$ – для чугунных поршней;

$k = 0,38L - 0,17D\sqrt{b}$ – для поршней из алюминиевых сплавов,

где L – длина шатуна.

Моменты инерции маховика дизеля J_m и ротора генератора оценим приближенно $J_m = \frac{1}{2} M R_m^2$,

Автоматические регуляторы скорости вращения первичных двигателей судовых генераторов строятся по обычной для регуляторов схеме. В регуляторах прямого действия отклонение скорости вращения преобразуется в поступательное перемещение муфты центробежного механизма и через систему рычагов передается рейке топливного насоса. Такие регуляторы применяются для дизелей малой и средней мощности.

В регуляторах непрямого действия перемещение муфты центробежного измерителя скорости передается на золотник гидравлического усилителя, и только уже перемещение поршня усилителя – на рейку. Такие регуляторы применяют на мощных дизелях. В регуляторах паровых турбин измерительный элемент выполняется в виде масляного насоса. Регуляторы турбин обычно имеют усилитель. Поскольку гидравлический усилитель представляет собой чисто интегрирующее звено, его обычно охватывают жесткой обратной связью.

Важной деталью регулятора скорости является пружина центробежного механизма. При номинальной скорости вращения центробежная сила вращающихся грузов уравнивается силой пружины. Если происходит изменение скорости, равновесие сил нарушается и муфта измерителя приходит в движение, передвигая рейку топливного насоса до тех пор, пока не изменится скорость вращения так, чтобы снова восстановилось равновесие. Для улучшения динамических качеств регуляторов их снабжают корректирующим звеном в виде масляного демпфера (катаракта). Для дистанционного изменения уставки регулятора конструкция его выполняется так, что опора пружины перемещается с помощью электродвигателя, который часто называют серводвигателем.

Для составления уравнения регулятора скорости прямого действия необходимо записать следующие уравнения:

- движения муфты центробежного механизма под действием суммы сил инерции, пружины, центробежной, катаракта и вязкого трения;
- зависимости силы пружины от хода муфты и перемещения опоры серводвигателем.

Представив все переменные в виде относительных отклонений от состояния установившегося равновесия, получим окончательные уравнения регулятора прямого действия в операторной форме [103]:

$$T_r^2 p^2 \eta + T_k p \eta + \delta \eta + \delta_i (\eta - \xi) = -\varphi + k_n \mu_n ;$$

$$T_i p \xi + \xi = \eta ,$$

где p – оператор дифференцирования;

η – ход муфты измерителя скорости;

φ – относительное отклонение скорости;

δ – статизм регулятора;

δ_i – временная степень неравномерности;

ξ – ход поршня демпфера (катаракта);

T_k – постоянная времени вязкого трения;

T_r – постоянная времени, связанная с механической инерцией движущихся частей регулятора;

T_i – постоянная времени катаракта;

μ_n – координата изменения уставки по скорости вращения (для настройки регулятора);

k_n – коэффициент передачи механизма уставки.

Вращающий момент обычно пропорционален ходу рейки и соответственно ходу муфты центробежного механизма.

Для регулятора непрямого действия к указанным выше уравнениям необходимо добавить уравнение гидравлического усилителя и обратной связи. Первое вытекает из записи уравнения неразрывности струи масла, перетекающего от золотника к цилиндру усилителя, второе – из условия равенства величины перемещения золотника и разности перемещений поршня усилителя и муфты измерителя:

– уравнение измерителя скорости с катарактом

$$T_r^2 p^2 \eta + T_k p \eta + \delta \eta + \delta_i (\eta - \xi) = -\varphi + k_n \mu_n;$$

– уравнение гидравлического усилителя

$$(T_s p + \lambda) \mu_p = \eta,$$

где T_s – постоянная времени усилителя;

λ – коэффициент жесткой обратной связи;

μ_p – выходная координата регулятора.

В некоторых случаях можно упростить приведенные выше уравнения дизеля и регулятора, представив их, например, в таком виде

$$T_a p \varphi = \mu_p - M_g ;$$

$$(T_s p + 1) \mu_p = -k_s \varphi + k_s \mu_n .$$

Величину T_s в этом случае следует подбирать так, чтобы при точном уравнении и приближенном получить близкие по виду переходные процессы, k_s – коэффициент усиления, определяемый статизмом.

При обычном регуляторе компенсационного типа регулирующее воздействие двигателя появляется только тогда, когда под действием электромагнитного момента уже произойдет изменение регулируемой величины – скорости вращения. В таком случае трудно обеспечить отсутствие отклонения скорости в установившемся режиме и малое отклонение в переходном.

Для получения скоростной характеристики, по виду подобной характеристике астатического регулятора, применяется комбинированный принцип. При таком принципе регулирующее воздействие в основном зависит не от отклонения регулируемой величины, а от возмущения, т. е. от самой причины появления отклонения скорости.

Осуществляется этот принцип с помощью измерения активной мощности генератора датчиком мощности и подачи выходного сигнала этого датчика на регулятор скорости. Преобразование выходного напряжения датчика в механическое перемещение происходит с помощью электромагнитного механизма.

Запишем уравнения такой системы при упрощенном описании регулятора:

$$(T_s p + 1) \mu_p = -k_s \varphi + k_s \mu_n .$$

В уравнении комбинированного регулятора к правой части необходимо добавить член, зависящий от электромагнитного момента:

$$(T_s p + 1) \mu_p = -k_s \varphi + k_s \mu_n + \frac{k_p}{T_p p + 1} M_g ,$$

где k_p – коэффициент усиления цепи воздействия по нагрузке;

T_p – постоянная времени.

Из уравнения видно, что в установившемся режиме при нулевом отклонении скорости регулирующее воздействие μ_p не равно нулю и может принимать различные значения.

Запишем уравнения двигателя и генератора в установившемся режиме

$$\mu_p = M_g;$$

$$\mu_p = -k_s \varphi + k_s \mu_n + k_p M_g.$$

Отклонение скорости зависит от возмущения (электромагнитного момента):

$$k_s \varphi = k_s \mu_n - M_g + k_p M_g = k_s \mu_n - M_g (1 - k_p).$$

Очевидно, что если уставка по скорости будет равна нулю, то

$$\varphi = \frac{k_p - 1}{k_s} M_g.$$

Коэффициент усиления цепи воздействия по нагрузке может принять значение, при котором φ будет равно нулю при любой величине электромагнитного момента. Для этого необходимо, чтобы $k_p = 1$.

В некоторых случаях полезно иметь передаточную функцию регулятора, например, для расчета частотных характеристик. Выведем передаточную функцию из следующих уравнений регулятора скорости дизеля:

$$(T_r^2 p^2 + T_k p + \delta) \mu_p + \delta_i (\mu_p - \xi) + s - \mu_0 = 0;$$

$$(T_i p + 1) \xi = \mu_p;$$

$$\left(T_r^2 p^2 + T_k p + \delta + \delta_i - \frac{\delta_i}{T_i p + 1} \right) \mu_p = -s + \mu_0;$$

$$\frac{\mu_p(p)}{(s + \mu_0)(p)} = \frac{T_i p + 1}{T_r^2 T_i p^3 + (T_k + T_r^2) p^2 + [T_k + (\delta + \delta_i) T_i] p + \delta}.$$

Однако, функциональные возможности механических регуляторов ограничены, поэтому в современных системах автоматического управления судовых дизелей используются электронные регуляторы частоты вращения на микропроцессорной базе. Это позволяет на качественно более высоком уровне реализовать сложные алгоритмы управления дизелем и обеспечить

значительно лучшие показатели качества процесса управления его частотой вращения.

Электронный регулятор частоты вращения дизеля представлен уравнением

$$T_{\omega} \frac{dh}{dt} = K_{\omega} \varepsilon - h,$$

где T_{ω} – постоянная времени исполнительного механизма, K_{ω} – коэффициент усиления пропорционального регулятора, ε – сигнал рассогласования между заданной ω_{r0} и действительной ω_r частотами вращения дизеля.

Как и любая инерционная система, регуляторы частоты вращения обладают определенным “люфтом”, который определяется суммарным зазором из-за нелинейностей составляющих элементов (рис. 3.7).

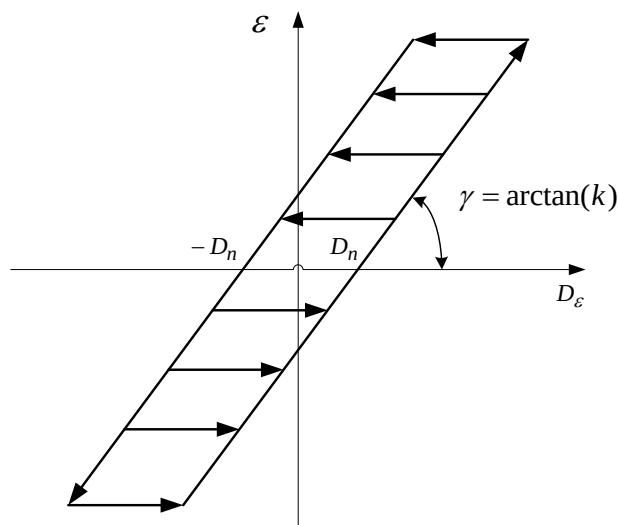


Рис. 3.7. Характеристика типа “люфт”

$$\varepsilon = \begin{cases} D_{\varepsilon} - D_n & \text{при } pD_{\varepsilon} > 0 \\ D_{\varepsilon} + D_n & \text{при } pD_{\varepsilon} < 0 \\ \text{const} & \text{при } |D_{\varepsilon} - \varepsilon| < D_n \end{cases},$$

где D_n – значение зазора люфта, D_{ε} – разность между заданной ω_{r0} и действительной ω_r частотами вращения дизеля.

3.5. Моделирование параллельной работы генераторов в составе СЭЭС

В современных условиях на судах морского флота в целях рационального производства, распределения и потребления электрической энергии устанавливается от двух до пяти, а иногда и больше, дизель-генераторных агрегатов, которые осуществляют параллельную работу в различных режимах эксплуатации. Таким образом, судовые электротехнические комплексы являются многогенераторными, поэтому моделирование многогенераторной установки сталкивается с большим количеством конфигураций сети включенных и отключенных ДГА.

Количество состояний n генераторных автоматических выключателей с учетом питания с берега составляет 2^{n+1} . Для пяти генераторов таких комбинаций будет 64.

Модель каждой конфигурации судовой сети имеет уравнения для токов и напряжений каждого включенного генератора и нагрузки. Выбор уравнений можно осуществить с помощью логических выражений, зависящих от состояния выключателей [14,80].

Для упрощения моделирования многогенераторной установки предлагается представлять состояния генераторных автоматов активными сопротивлениями R_{ki} , рис. 3.8.

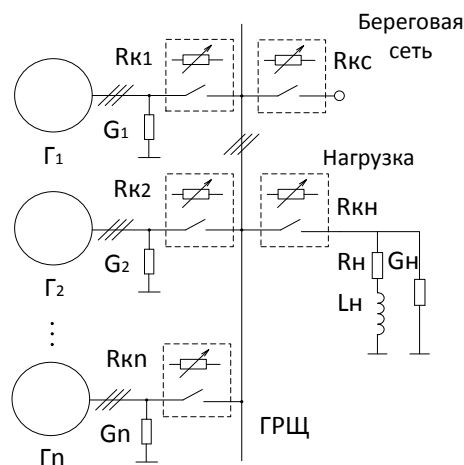


Рис. 3.8. Типовая схема судового электротехнического комплекса

Уравнения, описывающие процессы включения генераторов на параллельную работу составляются совместно с уравнениями ключей, соединяющих генераторы между собой или с сетью, рис. 3.8.

В замкнутом состоянии силовые выключатели имеют малое активное сопротивление, составляющее десятые доли Ома [14,80]. В разомкнутом состоянии сопротивление выключателей может быть принято равным нескольким десяткам Мом. В этом случае описание многогенераторной установки представляет одну систему уравнений, а ее конфигурация задается значениями соответствующих сопротивлений R_{ki} .

Например, если выключатель генератора подключен к ГРЩ, то его сопротивление стремится к нулю, а если выключатель отключен, то его сопротивление стремится к бесконечности.

Уравнения для параметров статорных цепей генераторов, сети и нагрузки запишем в неподвижной системе координат α, β . Уравнения проекций токов и напряжений на ось α для внешних цепей будет иметь вид [14], рис. 3.9:

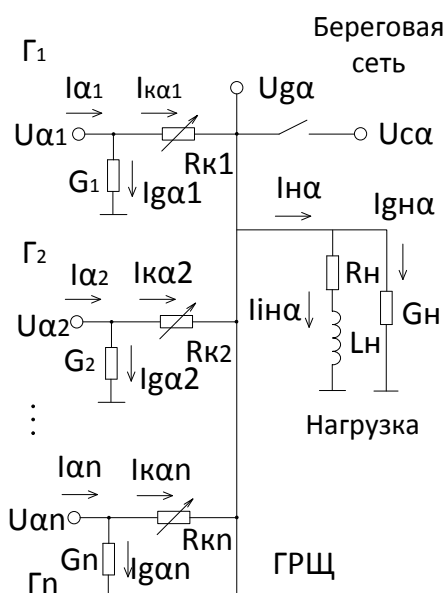


Рис. 3.9. Расчетная схема судового электротехнического комплекса

$$I_{\alpha 1} = I_{ga1} + I_{ka1}; I_{\alpha 2} = I_{ga2} + I_{ka2}; \dots I_{kn} = I_{gan} + I_{kan};$$

$$U_{\alpha 1} = I_{ka1} R_{k1} + U_{ga}; U_{\alpha 2} = I_{ka2} R_{k2} + U_{ga}; \dots U_{\alpha n} = I_{kan} R_{kn} + U_{ga};$$

$$I_{g\alpha 1} = U_{\alpha 1} G_1; I_{g\alpha 2} = U_{\alpha 2} G_2; \dots I_{g\alpha n} = U_{\alpha n} G_n;$$

$$I_{H\alpha} = I_{gH\alpha} + I_{l\alpha}; I_{gH\alpha} = U_{g\alpha} G_H; U_{g\alpha} = I_{lH\alpha} R_H + L_H \frac{dI_{lH\alpha}}{dt}.$$

Здесь G_i – проводимость измерительных цепей и утечек изоляции генераторов; G_H, R_H, L_H – параметры нагрузки; R_{ki} – сопротивление выключателей. При питании с берега $U_{g\alpha} = U_{ca}$.

Решим систему относительно напряжений [14]:

$$U_{g\alpha} = \frac{(I_{\alpha 1} + I_{\alpha 2} + \dots I_{\alpha i} - U_{\alpha 1} G_1 - U_{\alpha 2} G_2 - \dots U_{\alpha n} G_n - I_{lH\alpha})}{G_H};$$

$$U_{\alpha 1} = \frac{I_{\alpha 1} R_{k1} + U_{g1}}{1 + R_{k1} G_1}; U_{\alpha 2} = \frac{I_{\alpha 2} R_{k2} + U_{g2}}{1 + R_{k2} G_2}; \dots U_{\alpha n} = \frac{I_{\alpha n} R_{kn} + U_{gn}}{1 + R_{kn} G_n};$$

$$\frac{dI_{lH\alpha}}{dt} = \frac{(U_{g\alpha} - I_{lH\alpha} R_H)}{L_H}.$$

Уравнения конфигурации судовой сети совместно с уравнениями дизель-генераторов позволяют получить модель судовой многогенераторной электростанции.

Моделирование генераторных автоматов резисторами с изменяемым сопротивлением сокращает необходимое количество уравнений модели при различных конфигурациях многогенераторной электростанции.

3.6. Исследование методами математического моделирования

Рассмотрев математическое описание всех элементов судового электротехнического комплекса, перейдем к исследованию параллельной работы двух дизель-генераторных агрегатов многогенераторной СЭЭС.

Для этого составляем математическую модель [15,77,79,80,82,95] и реализуем ее компьютерной программой SG-SG-RG (автор Вишневский Л.В.), которую используем для изучения работы судового электротехнического комплекса. Компьютерная программа позволяет получить в виде графиков мгновенные значения напряжений U_{A1} , U_{A2} ,

моментов Mg_1 , Mg_2 , токов I_{A1} , I_{A2} , частот вращения роторов ω_{r1} , ω_{r2} , углов нагрузки Tet_1 , Tet_2 параллельно работающих генераторов (рис. 3.10 – 3.15).

Разработав математическую модель судового электротехнического комплекса, мы получили возможность проводить дальнейшие исследования не вмешиваясь в работу пассажирского судна, что в принципе было бы невозможным мероприятием по причине обеспечения безопасности мореплавания. Проведенные экспериментальные исследования выявили существование обменных колебаний мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов. При построении математической модели учтено существование “люфта” в системах автоматического управления частотой вращения дизелей. Необходимо выяснить, как влияют значения зазоров и их соотношения на амплитуду обменных колебаний мощности.

На рис. 3.10 приведены результаты моделирования параллельной работы двух синхронных дизель-генераторов со значениями зазоров регуляторов частоты вращения дизелей $D_{n1} = 0,002$ и $D_{n2} = 0,01$. На графиках токов и моментов генераторов видны примерно синусоидальные кривые с зеркальным характером, т.е. максимуму мощности одного генератора и наоборот, что и является основным признаком наличия обменных колебаний мощности. Проведем исследования, изменяя значения зазоров люфта. На рис. 3.11 представлены результаты моделирования параллельной работы двух генераторных агрегатов и при этом зазоры D_{n1} и D_{n2} равны нулю, то есть явления “люфт” у обоих генераторных агрегатов отсутствуют. При этом видно полное отсутствие обменных колебаний. Это можно определить по следующим признакам: амплитуда синусоид токов генераторов не меняется и их огибающими являются прямые линии параллельные оси абсцисс, графики моментов генераторов Mg_1 и Mg_2 , углов нагрузки Tet_1 , Tet_2 и частот вращения генераторов ω_{r1} и ω_{r2} после входа в установившийся режим совпадают. При одновременном увеличении зазоров D_{n1} и D_{n2} до равных значений 0,005 (рис. 3.12) видно появление небольших

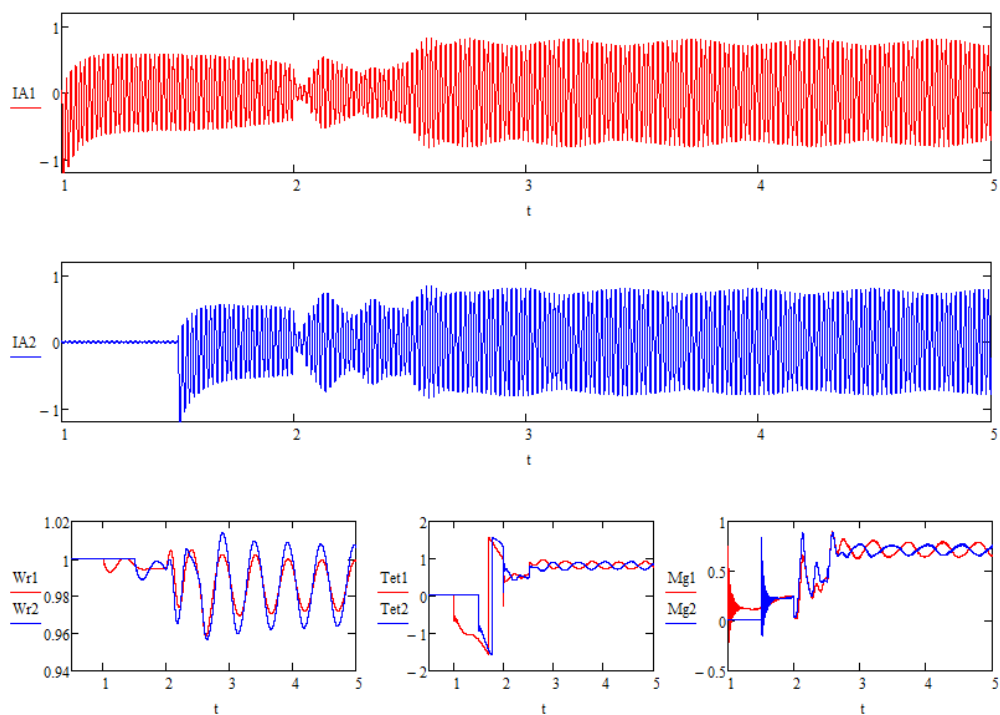


Рис. 3.10. Результаты моделирования, $D_{n1}=0.002$, $D_{n2}=0.01$, $K_{\omega 1}=50$, $K_{\omega 2}=50$, $\omega_{r01}=1$, $\omega_{r02}=1$

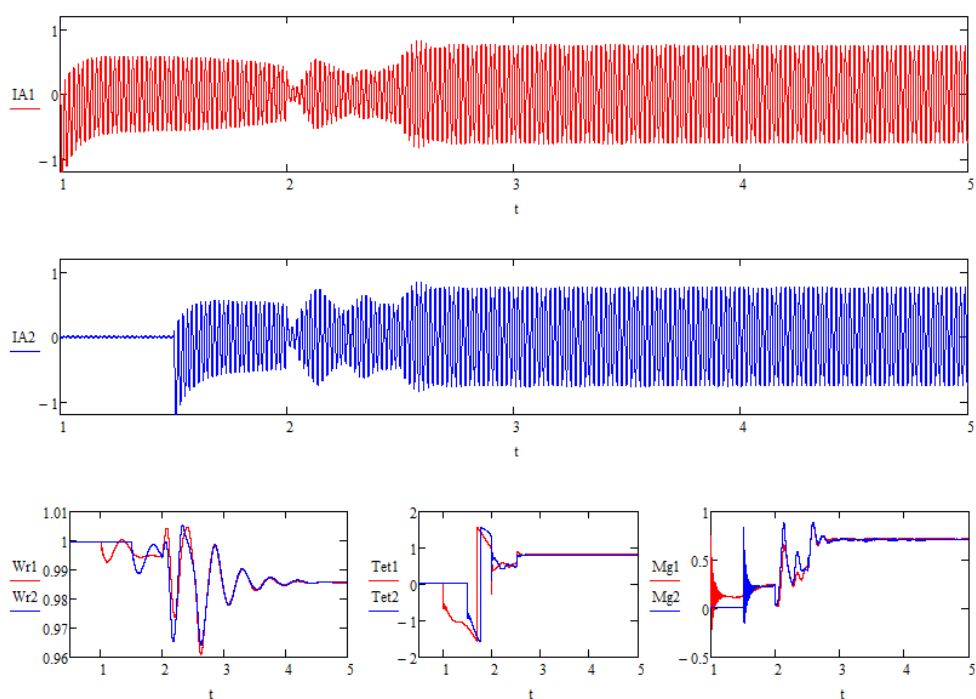


Рис. 3.11. Результаты моделирования, $D_{n1}=0$, $D_{n2}=0$, $K_{\omega 1}=50$, $K_{\omega 2}=50$, $\omega_{r01}=1$, $\omega_{r02}=1$

по амплитуде обменных колебаний по кривым токов и моментов генераторов, графики скоростей вращения агрегатов также имеют колебательный характер. При дальнейшем равном увеличении зазоров (рис. 3.13) наблюдаем увеличение амплитуд обменных колебаний. Однако существование равных зазоров даже у одностипных параллельно работающих генераторов возможно только в идеальном случае, на практике же зазоры имеют разные значения.

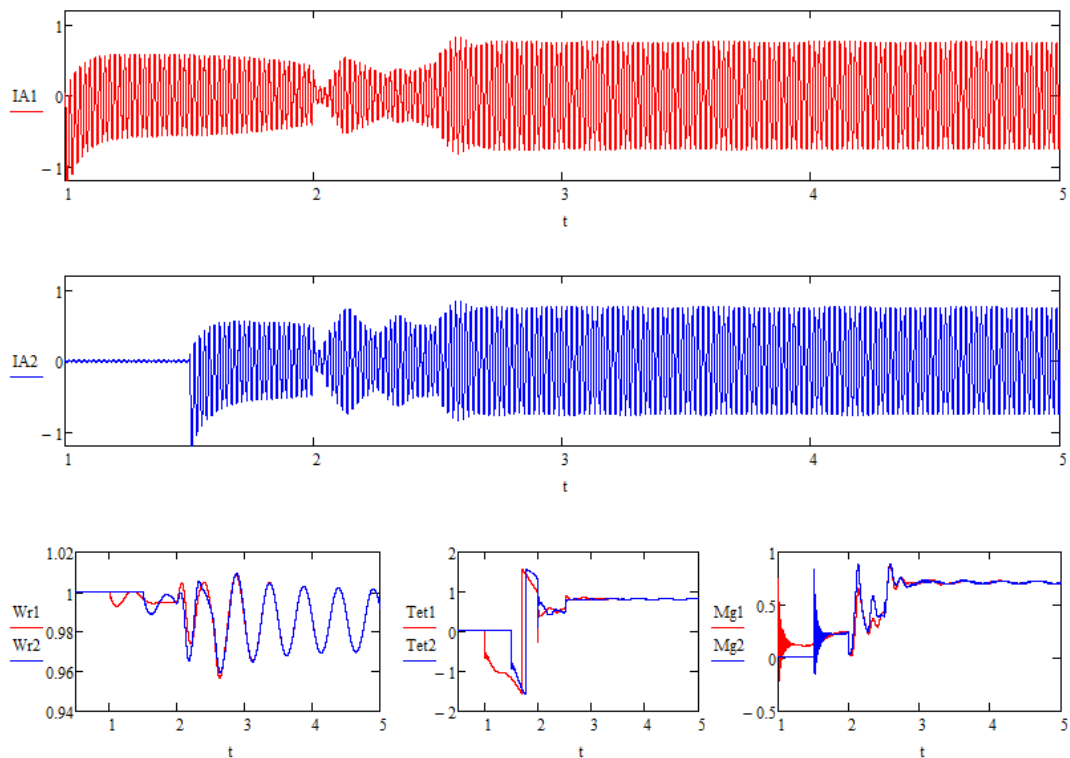


Рис. 3.12. Результаты моделирования, $D_{n1}=0,005$ $D_{n2}=0,005$

$$K_{\omega 1}=50, K_{\omega 2}=50, \omega_{r01}=1, \omega_{r02}=1$$

Сравним результаты моделирования представленные на рис. 3.10 и рис. 3.14. В обоих случаях зазоры различны, при этом имеющиеся в обоих случаях обменные колебания различаются по амплитуде. По результатам моделирования видно, что амплитуда обменных колебаний мощности растет с увеличением ширины зазоров параллельно работающих генераторов как в случае равных, так и в случае различных их значений.

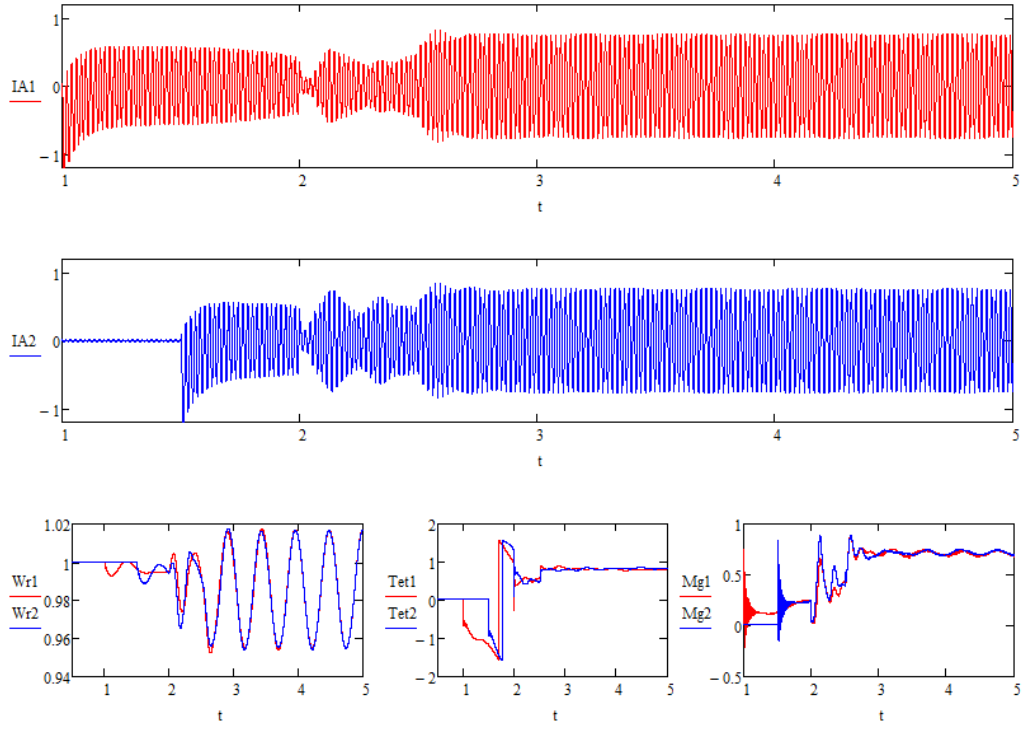


Рис. 3.13. Результаты моделирования, $D_{n1}=0,01$, $D_{n2}=0,01$, $K_{\omega 1}=50$, $K_{\omega 2}=50$,
 $\omega_{r01}=1$, $\omega_{r02}=1$

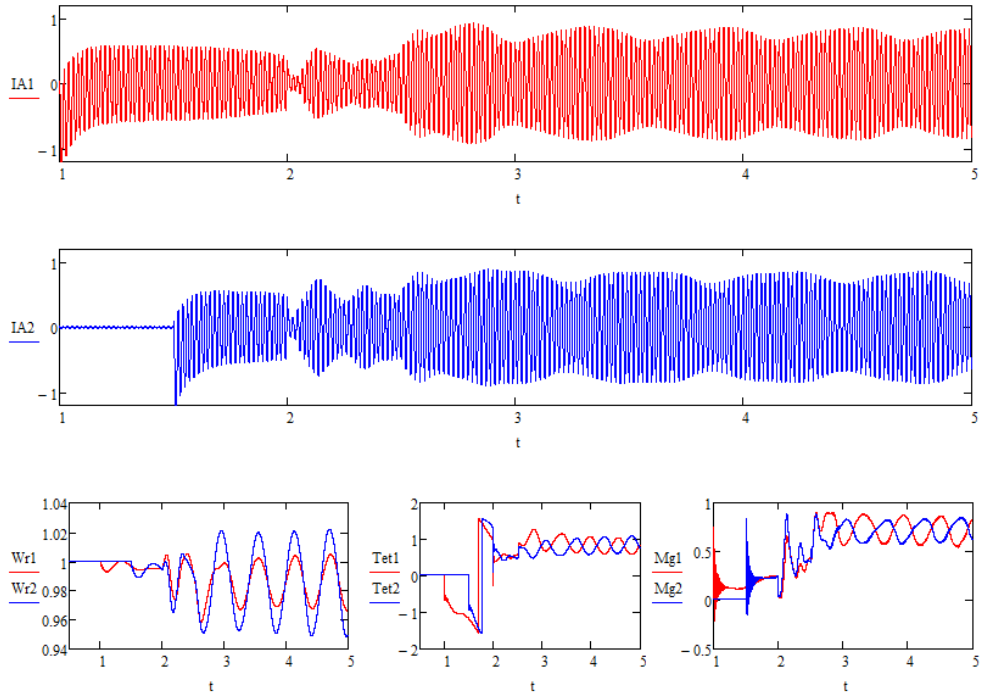


Рис. 3.14. Результаты моделирования. $D_{n1}=0,002$, $D_{n2}=0,02$, $K_{\omega 1}=50$, $K_{\omega 2}=50$,
 $\omega_{r01}=1$, $\omega_{r02}=1$

При экспериментальных исследованиях и математическом моделировании принимается равенство параметров параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов. Вместе с тем известно, что в реальных условиях значения этих параметров имеют некоторый разброс. Необходимо исследовать, как влияет разброс параметров однотипных дизель-генераторных агрегатов на существование колебаний мощности при их параллельной работе. Примем для модельного эксперимента вариант отличия на 25% значений всех конструктивных параметров дизель-генераторных агрегатов, которые используются при математическом моделировании.

Результаты моделирования (рис. 3.15) показывают, что разброс конструктивных параметров на 25% однотипных параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов не приводит к возникновению и существованию как обменных, так и синфазных колебаний мощности.

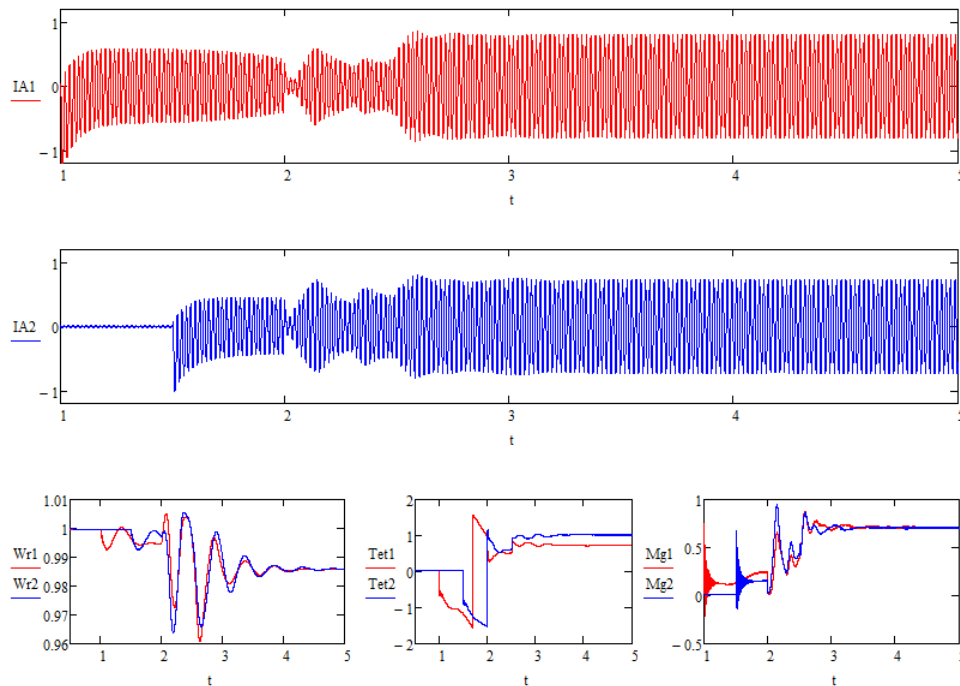


Рис. 3.15. Результаты моделирования. $D_{n1}=0$, $D_{n2}=0$, $K_{\omega 1}=50$, $K_{\omega 2}=50$, $\omega_{r01}=1$, $\omega_{r02}=1$. Конструктивные параметры ДГ 2 на 25% превышают параметры ДГ 1

Аналогичные результаты получаются при различии параметров на 15%, 35%, 50% (рис. В.1, В.2, В.3). По результатам исследования видно, что разброс параметров приводит к некоторому перераспределению мощностей, однако процессы имеют установившийся характер.

Полученные результаты дают основания исключить из причин возникновения колебаний мощности при параллельной работе судовых вспомогательных энергоустановок различия конструктивных параметров агрегатов. Таким образом, реализованная в модели возможность изменения зазоров регуляторов, т.е. учета люфтов, наглядно показала, что именно они являются одной из основных причин возникновения и существования обменных колебаний мощности при параллельной работе судовых синхронных генераторных агрегатов.

При проведении экспериментальных исследований на пароме “Ейск” получены осциллограммы тока фазы и активной мощности одного из двух параллельно работающих генераторов (рис. 2.23, 2.24, А.19-А.22). Синфазность изменения указанных величин позволяет говорить об обменных колебаниях мощности по аналогичным колебаниям токов генератора. Для подтверждения справедливости такого заявления смоделируем ток и мощность одного из двух параллельно работающих генераторов.

Мгновенные значения мощностей фаз генератора соответственно равны: мощность фазы А - $P_{A1} = i_{A1} \cdot u_{A1}$, мощность фазы В - $P_{B1} = i_{B1} \cdot u_{B1}$, мощность фазы С - $P_{C1} = i_{C1} \cdot u_{C1}$.

Токи фаз i_{A1} , i_{B1} , i_{C1} и напряжения фаз u_{A1} , u_{B1} , u_{C1} генератора находятся из матриц перехода от системы координат (α, β) к системе координат (А,В,С):

$$\begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix},$$

т.е. $i_{A1} = i_{\alpha 1}$, $u_{A1} = u_{\alpha 1}$,

$$i_{B1} = -\frac{1}{2} \cdot i_{\alpha 1} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{\beta 1}, \quad u_{B1} = -\frac{1}{2} \cdot u_{\alpha 1} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot u_{\beta 1},$$

$$i_{C1} = -\frac{1}{2} \cdot i_{\alpha 1} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{\beta 1}, \quad u_{C1} = -\frac{1}{2} \cdot u_{\alpha 1} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot u_{\beta 1}.$$

Мощность генератора, которая совпадает с его активной мощностью –

$$P_1 = P_A + P_B + P_C,$$

Результаты моделирования (рис 3.16) подтверждают результаты

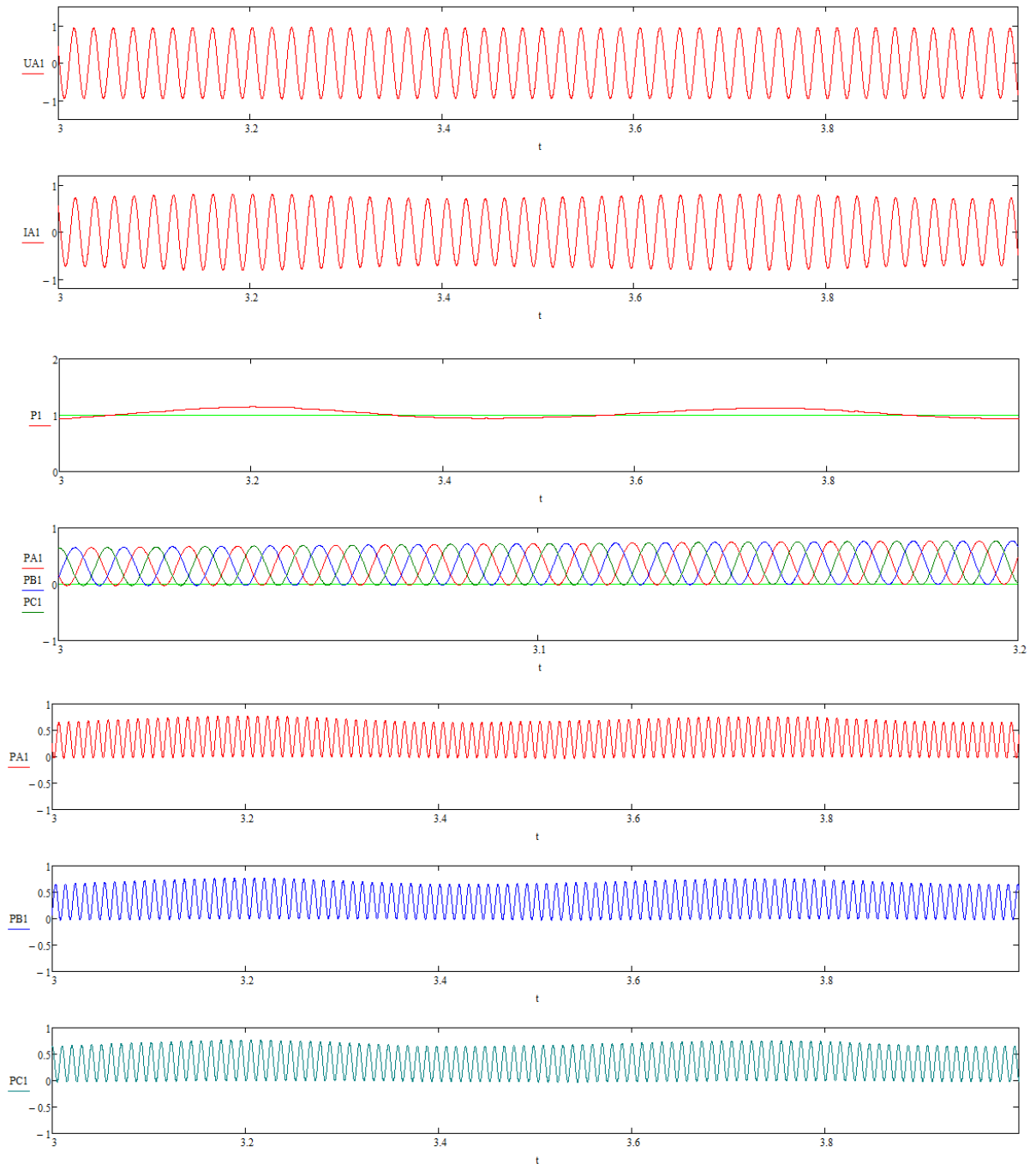


Рис. 3.16. Результаты моделирования для ДГ 1. $D_{n1}=0,002$, $D_{n2}=0,02$, $K_{\omega 1}=50$,
 $K_{\omega 2}=50$, $\omega_{r01}=1$, $\omega_{r02}=1$

экспериментального исследования. При наличии люфта в контурах регулирования частоты вращения параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов существуют обменные колебания мощности, причем мощность и огибающая тока генератора изменяются синфазно. Таким образом, возможность идентификации обменных колебаний мощности по токам фаз параллельно работающих генераторов подтверждается результатами математического моделирования.

Аналогично мощности P_1 одного из параллельно работающих генераторов, может быть смоделирована и мощность P_2 второго из двух параллельно работающих генераторов (рис. 3.17). Огибающая тока i_{A1} изменяется синфазно с мощностью P_1 , огибающая тока i_{A2} изменяется синфазно с мощностью P_2 , а максимумы мощности P_1 соответствуют минимумам мощности P_2 и наоборот, что также подтверждает возможность идентификации обменных колебаний мощности по токам фаз параллельно работающих генераторов.

3.7. Выводы к главе 3

1. Сравнением результатов математического моделирования и результатов натурных испытаний на пароме “Ейск” установлена корректность предложенной усовершенствованной математической модели судового электротехнического комплекса.

2. Исследованиями, проведенными с использованием математической модели, выявлена основная причина существования обменных колебаний мощности – наличие нелинейности “люфт” в контуре регулирования частоты вращения дизель-генераторных агрегатов.

3. Исследованиями, проведенными с использованием математической модели, установлен рост амплитуды обменных колебаний мощности при увеличении разницы зазоров “люфтов” параллельно работающих генераторных агрегатов судового электротехнического комплекса.

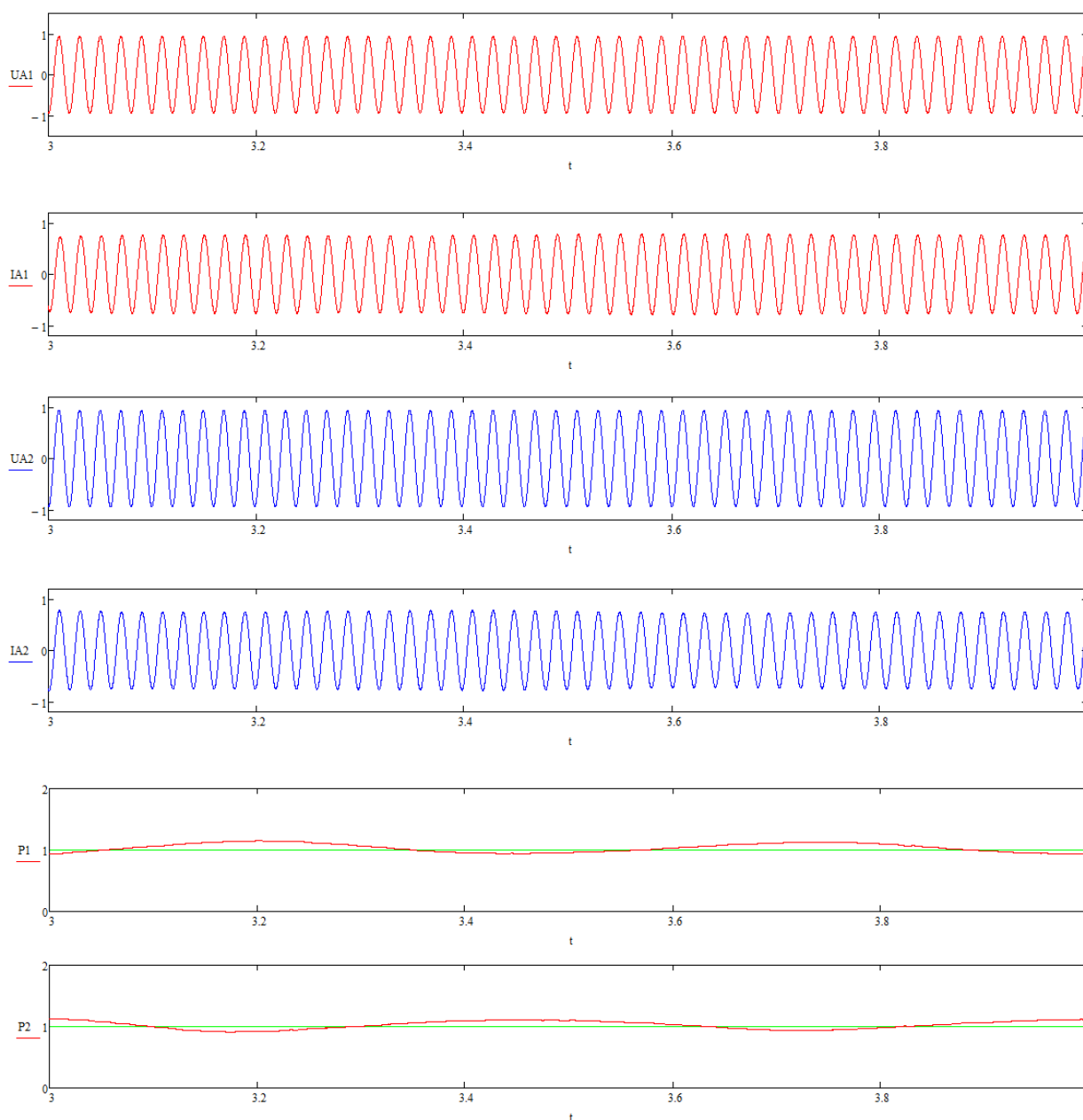


Рис. 3.17. Результаты моделирования для ДГ 1 и ДГ 2. $D_{n1}=0,002$, $D_{n2}=0,02$,
 $K_{\omega 1}=50$, $K_{\omega 2}=50$, $\omega_{r01}=1$, $\omega_{r02}=1$

4. На основе полученных результатов математического моделирования установлено отсутствие влияния разброса конструктивных параметров дизель-генераторных агрегатов на амплитуду обменных колебаний мощности.

5. На основе полученных результатов математического моделирования выявлены дополнительные признаки обменных колебаний мощности в

судовом электротехническом комплексе - колебания в противофазе моментов генераторов и углов нагрузки и синфазные колебания с разной амплитудой частот вращения роторов параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов.

ГЛАВА 4

РАЗРАБОТКА МЕТОДА УМЕНЬШЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ОБМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ МОЩНОСТИ В СУДОВОМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ**4.1. Метод уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности**

В результате проведенных экспериментальных исследований и математического моделирования СЭЭС доказано существование обменных колебаний мощности при параллельной работе ДГА, основной причиной которых является наличие “люфта” в элементах системы регулирования оборотов. Из математического описания электронного регулятора частоты вращения следует, что в контуре частоты вращения существует только два регулируемых параметра – коэффициент усиления регулятора K_ω и сигнал задания частоты вращения ω_{r0} . Одним из наиболее эффективных путей снижения уровня обменных колебаний мощности оказалось уменьшение коэффициента усиления регулятора частоты вращения дизеля, т.е. уменьшение жесткости его механической характеристики [77,81]. Результаты моделирования по предлагаемому методу подавления обменных колебаний представлены на рис. 4.1, где коэффициент усиления K_ω снижен до 20 для обоих агрегатов по сравнению с результатами представленными на рис. 3.10, где он равен 50. Однако видно заметное снижение до 0,92 частоты вращения в установившемся режиме, что является недостатком. Необходимость поддержания скорости вращения на номинальном уровне очевидна, так как ее снижение приводит к снижению частоты вырабатываемой электроэнергии, что ухудшает работу судового электрооборудования. Для устранения падения частоты вращения необходимо увеличить сигнал задания частоты вращения дизеля ω_{r0} [77]. На рис. 4.2 представлены результаты

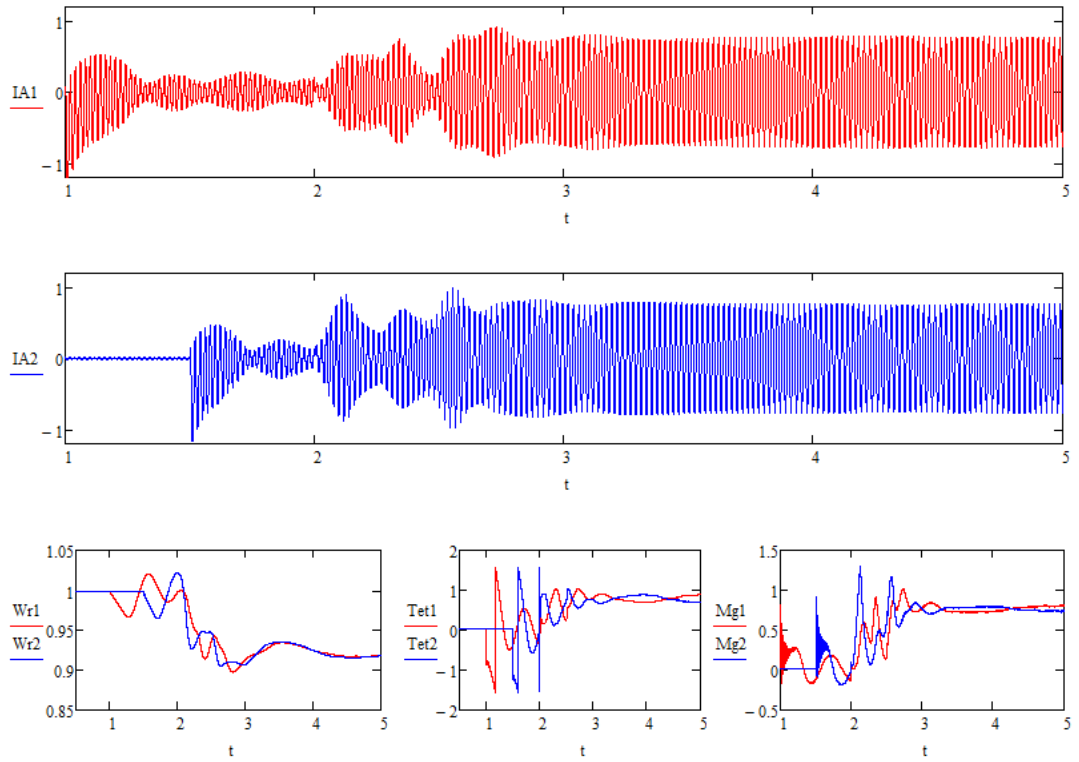


Рис. 4.1. Результаты моделирования. $K_{\omega 1} = K_{\omega 2} = 20$, $\omega_{r01} = \omega_{r02} = 1.0$,
 $D_{n1} = 0.002$, $D_{n2} = 0.01$

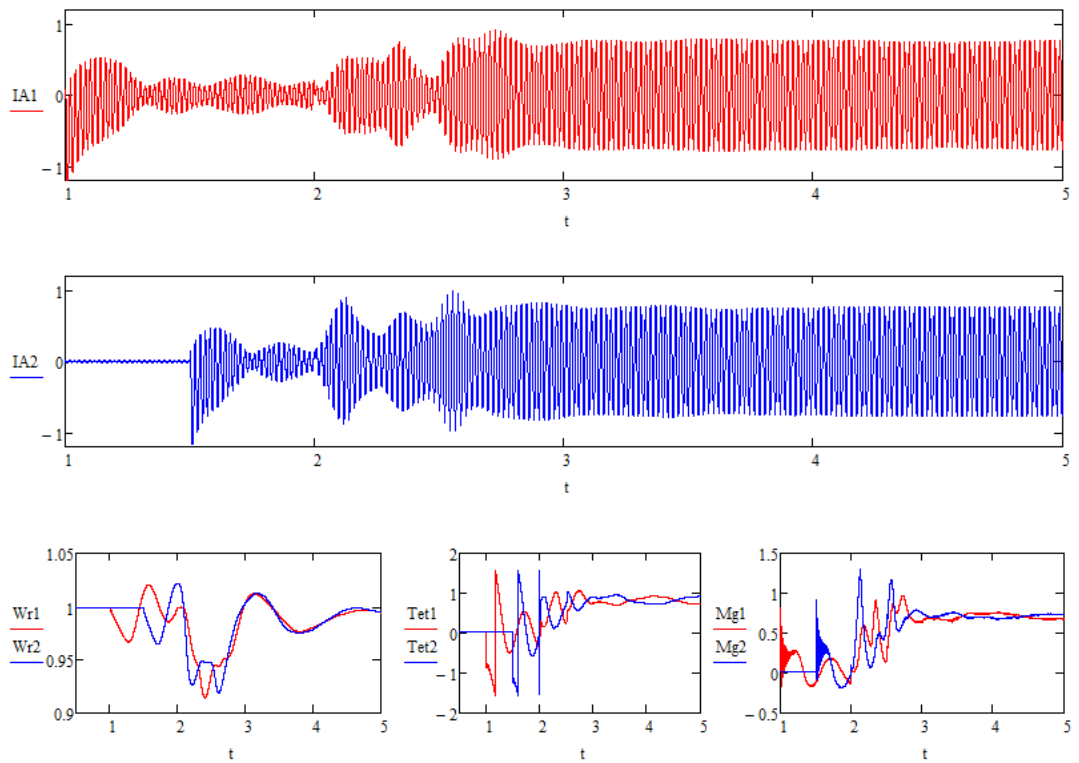


Рис. 4.2. Результаты моделирования. $K_{\omega 1} = K_{\omega 2} = 20$, $\omega_{r01} = \omega_{r02} = 1.06$,
 $D_{n1} = 0.002$, $D_{n2} = 0.01$

моделирования для режима, в котором K_{ω} для обоих генераторов 20, а ω_{r0} увеличена до 1,06, при этом частота вращения ротора близка к номинальной, а амплитуда обменных колебаний не увеличилась.

4.2. Изменения в структуре судового электротехнического комплекса

Исследования с использованием математической модели электротехнического комплекса подтвердили наличие обменных колебаний мощности в различных режимах работы судовой электростанции, основной причиной которых является наличие “люфта” с зазорами в системах регулирования частоты вращения дизелей. Дальнейшие исследования показали, что для уменьшения амплитуды обменных колебаний до допустимой величины, а по возможности и полного их устранения необходимо изменение настроек регулятора частоты вращения дизеля в процессе работы. Подстройка параметров должна осуществляться именно в процессе эксплуатации в связи с тем, что судовые электростанции современных судов являются многогенераторными, а значит количество одновременно параллельно работающих генераторных агрегатов может меняться в зависимости от суммарной мощности потребителей. С другой стороны, даже если количество параллельно работающих генераторов не меняется, то меняется количество, а значит, мощность работающих потребителей. Но главная причина изменения параметров автоматического регулятора частоты вращения дизеля в процессе эксплуатации – это возможные изменения зазоров “люфтов”, которые предсказать наперед невозможно. Механические регуляторы частоты вращения дизелей обслуживаются и настраиваются при их демонтаже во время ремонтов и освидетельствований, поэтому в них отсутствует возможность изменения параметров при их работе. Для наших целей лучше подходят электронные регуляторы частоты вращения, которые сопрягаются с микропроцессорными

системами управления и имеют возможность изменения параметров во время их штатной эксплуатации на судне. Электронные регуляторы частоты вращения дизеля широко используются на современных судах. Очень часто для обеспечения надежности параллельно электронным регуляторам устанавливаются механические для дублирования их функций в нештатных ситуациях. По результатам проведенных исследований и для реализации разработанного метода уменьшения амплитуды обменных колебаний, рассмотренного выше, необходимо ввести в структуру автоматического управления электростанции блок УОКМ – устройство обменных колебаний мощности (рис. 4.3) [81,89]. Это должна быть адаптивная система,

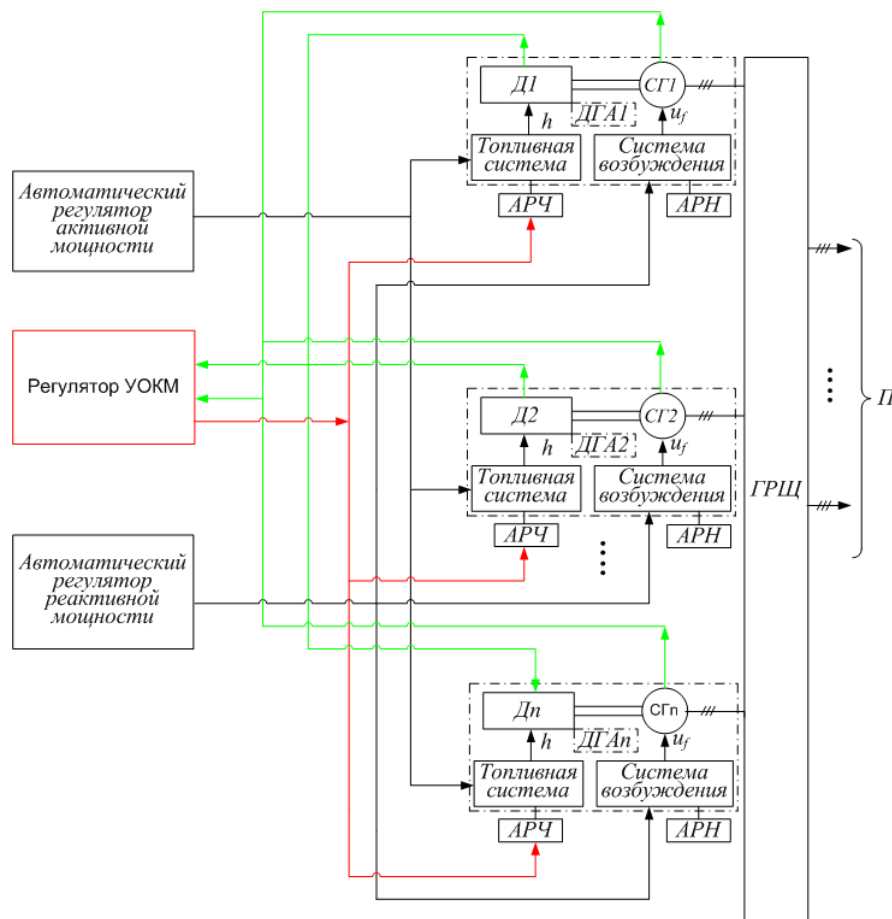


Рис. 4.3. Новая структура судового электротехнического комплекса

настроенная на обеспечение минимума критерия обменных колебаний мощности. Блок УОКМ получает информацию от всех дизелей и генераторов

работающих в параллельном режиме, после чего он обрабатывает информацию и в случае необходимости осуществляет подстройку коэффициентов передачи и уставок по частоте вращения автоматических регуляторов частоты. Необходимость ввода нового блока в структуру управления судовой электроэнергетической системой объясняется тем, что ни одна существующая система (рис. 1.2) не может выполнять функции, которые реализовывают разработанный метод уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов. Вместе с тем, новый блок в системе управления может быть успешно интегрирован в существующую структуру с точки зрения получения им необходимой информации и формирования сигналов управления.

4.3. Выбор типа системы автоматического управления

Поясним свой выбор в пользу адаптивной системы. Управляющая система, автоматически определяющая нужный закон управления посредством анализа поведения объекта при текущем управлении называется адаптивной [62]. Термин "адаптация" заимствован теорией управления из биологии, где им обозначают свойство приспособления организма к изменениям внешней среды. Элементы приспособления или адаптации существуют во многих автоматических системах, поэтому для выделения класса адаптивных систем рассмотрим особенности условий или требований, которые предъявляются к автоматическим системам управления и не могут быть качественно разрешены традиционными методами неадаптивного управления [35,46].

Система автоматического управления УОКМ должна выполнять свои функции при значительном усложнении решаемых задач управления, причем специфическая особенность такого усложнения заключается в отсутствии практической возможности для подробного изучения и описания процессов,

протекающих в судовом электротехническом комплексе.

Для решения нашей задачи нельзя применить неадаптивные методы управления, которые предусматривают наличие достаточного объема априорных сведений о всех условиях работы судового электротехнического комплекса еще на предварительной стадии разработки системы, которые затем используются при проектировании автоматической системы. Чем полнее априорная информация о характеристиках системы и условиях ее работы, тем обычно выше качество неадаптивного управления. Мы же не можем предсказать заранее все возможные комбинации работы судовой электростанции и внешних условий. В неадаптивных системах неполнота информации, необходимой для управления, существенно не мешает достижению цели управления, и поэтому в них не обязательно наличие канала автоматического пополнения информации в системе. К системам без пополнения информации относятся системы стабилизации и следящие системы.

Адаптивные системы управления работают в принципиально иных условиях, т. е. адаптивные методы способствуют достижению высокого качества управления при отсутствии достаточной полноты априорной информации о характеристиках управляемого процесса или в условиях неопределенности [30,62].

Вполне очевидно, что по мере усложнения задач, возлагаемых на автоматические системы управления судовым электротехническим комплексом, указанная неопределенность растет, т. е. становится все сложнее заранее определять характер изменения динамических свойств системы и управляемого процесса. Поэтому трудности в обеспечении надлежащего качества управления также возрастают по мере уменьшения объема априорных знаний о системе.

Только благодаря адаптивным методам управления можно найти достаточно эффективные способы уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности при параллельной работе генераторных агрегатов.

Эффект приспособления к изменяющимся условиям в адаптивных системах достигается за счет того, что часть функций по получению, обработке и анализу недостающей информации о параллельной работе генераторов осуществляется уже не проектировщиком на предварительной стадии, а самой системой УОКМ в процессе ее штатной эксплуатации.

Такой частичный перенос функций способствует не только более полному использованию рабочей информации (совокупности данных о состоянии системы, получаемой непосредственно в процессе управления) при формировании управляющих воздействий, но и позволяет существенно снизить влияние неопределенности на качество управления, компенсируя в определенной степени недостаток априорного знания проектировщика о работе судового электротехнического комплекса в каждом конкретном режиме.

Таким образом, к адаптивному управлению приходится обращаться тогда, когда сложность управляемого процесса достигает такого уровня, при котором влияние неопределенности или "неполноты" априорной информации об условиях работы системы становится существенным для обеспечения заданного качества процессов управления [30,62]. А именно такая ситуация сложилась в задаче уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности при параллельной работе судовых дизель-генераторных агрегатов.

Поскольку адаптивные системы широко используют рабочую информацию для анализа динамического состояния системы управления и организации контролируемых изменений свойств, параметров, управляющих воздействий и структуры системы управления, то в зависимости от способов реализации контролируемых изменений в процессе нормальной эксплуатации системы можно провести следующую классификацию адаптивных систем [62]: самонастраивающиеся системы, системы с адаптацией в особых фазовых состояниях и обучающиеся системы (рис. 4.4).

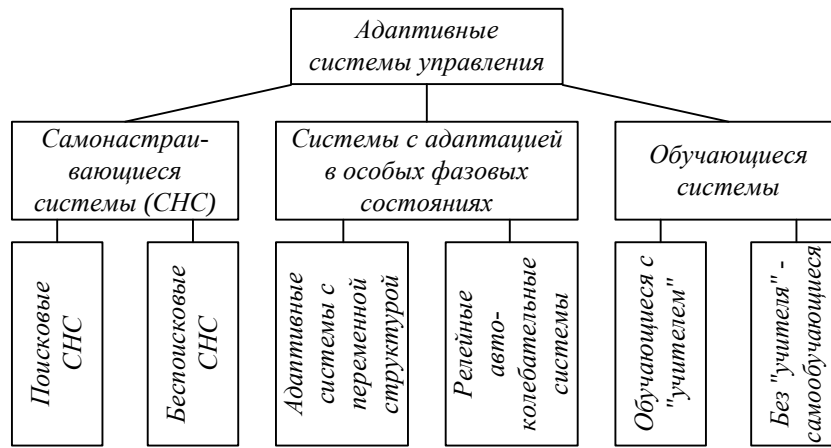


Рис. 4.4. Классификация адаптивных САУ

Самонастраивающиеся системы (СНС) характеризуются наличием специальных контуров самонастройки, с помощью которых оцениваются динамические и статические свойства системы и формируются такие контролируемые воздействия, что система самопроизвольно приближается к определенному эталону, часто задаваемому математически в виде критерия качества функционирования. При этом контур самонастройки служит для изменения параметров или структуры основного контура с целью обеспечения заданного критерия качества управления. Обычно критерий качества управления выражается в виде функционала или функции от параметров и измеряемых координат системы. В процессе работы системы значение функционала качества изменяется и задача контура самонастройки сводится к обеспечению экстремального (минимального или максимального) значения критерия. Нахождение и поддержание экстремального значения критерия качества управления может производиться с помощью пробных отклонений системы или путем аналитического определения условий экстремума. В зависимости от указанных способов нахождения экстремума самонастраивающиеся системы подразделяют на поисковые и беспоисковые. В свою очередь, поисковые самонастраивающиеся системы в зависимости от применяемых методов поиска делят на системы со случайным поиском, с поиском по методу Гаусса-Зайделя, с поиском по

методу градиента, с поиском по методу наискорейшего спуска. В классе беспоисковых СНС можно выделить самонастраивающиеся системы, использующие информацию о частотных характеристиках, СНС с контролем временных характеристик и границы устойчивости, СНС с эталонными моделями, градиентные СНС.

Системы с адаптацией в особых фазовых состояниях используют особые режимы или свойства нелинейных систем, например режимы автоколебаний, скользящие режимы для организации контролируемых изменений динамических свойств системы управления. Специально организованные особые режимы в таких системах либо служат дополнительным источником рабочей информации об изменяющихся условиях функционирования системы, либо наделяют систему управления новыми свойствами, за счет которых динамические характеристики управляемого процесса поддерживаются в желаемых пределах независимо от характера возникающих при функционировании изменений. Эти системы можно подразделить на релейные автоколебательные системы, адаптивные системы с переменной структурой и со скользящими режимами.

Обучающиеся системы управления характеризуются наличием специальных процессов обучения, которые заключаются в постепенном накоплении, запоминании и анализе информации о поведении системы и изменении законов функционирования в зависимости от приобретаемого опыта. К процессу обучения приходится прибегать тогда, когда не только мал объем априорных сведений об объекте, но и отсутствует возможность установления детальных причинно-следственных связей в структуре самой системы из-за ее сложности.

Накопление и обобщение информации в процессе обучения можно осуществлять за счет внесения "эталонного опыта" в систему извне либо путем формирования такого опыта внутри системы. В зависимости от способов накопления опыта указанные системы разделяют на обучающиеся с "учителем" и обучающиеся без "учителя" (самообучающиеся) системы.

При решении задачи по уменьшению амплитуды обменных колебаний мощности, по нашему мнению, оправдано применение самонастраивающейся системы (рис. 4.5). К основному контуру управления, состоящему из

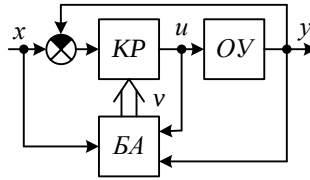


Рис. 4.5. Структурная схема самонастраивающейся САУ

классического (неадаптивного) регулятора KP и объекта управления OU , добавлен блок адаптации $БА$, с помощью которого осуществляется коррекция параметров и алгоритма работы классического регулятора. Для рассматриваемой системы классическим регулятором является автоматический регулятор частоты вращения дизеля, объектом управления – дизель, а блоком адаптации – УОКМ. Отличие структуры судовой электроэнергетической системы состоит в том, что осуществляется параллельная работа нескольких генераторных агрегатов и адаптивная система имеет связь с несколькими классическими регуляторами и объектами управления (рис. 4.3).

Основная задача самонастраивающейся системы заключается в поддержании вблизи экстремума значение функционала J , который выступает мерой качества работы системы при всех возможных изменениях входных управляющих воздействий, возмущающих воздействий, а также динамических характеристик объекта [62]. Такие адаптивные системы называются также экстремальными.

Так как значение функционала качества J изменяется при действии указанных сигналов, то для выполнения основной задачи возникает необходимость в определении условий экстремума.

Если время, требующееся для определения условий экстремума, не

является критическим фактором, например в случае сравнительно медленного изменения значений функционала качества в процессе управления, тогда целесообразно применять для определения условий экстремума поисковые методы.

Беспоисковые методы определения условий экстремума не требуют специальных затрат времени на поисковые движения и используют, как правило, аналитические методы определения указанных условий.

Сравнивая поисковые и беспоисковые самонастраивающиеся системы, можно сказать, что для определения условий экстремума поисковые системы нуждаются в меньшей информации, но требуют много времени на поиск, а беспоисковые системы высоким быстродействием, но требуют более полной информации об управляемом процессе [62].

Наиболее часто автоматический поиск применяется в системах управления, где статические характеристики объектов имеют экстремальный характер и задачей управления является нахождение и поддержание управляющих воздействий, обеспечивающих экстремальное значение управляемой величины. Когда автоматический поиск применяется для управления объектами с экстремальными характеристиками, соответствующие поисковые системы обычно называют *экстремальными системами*.

4.4. Разработка алгоритма работы блока УОКМ

Проведенный анализ существующих типов адаптивных систем и их особенностей показал, что для реализации разработанного метода уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности лучше всего подходит поисковая самонастраивающаяся система.

Поясним алгоритм работы блока УОКМ (рис. 4.6) [89].

После начала работы устанавливаются номинальные значения коэффициентов передачи K_{ω} регуляторов скорости дизелей и уставок задания ω_{r0} скоростей вращения дизелей. Затем определяются параметры, которые

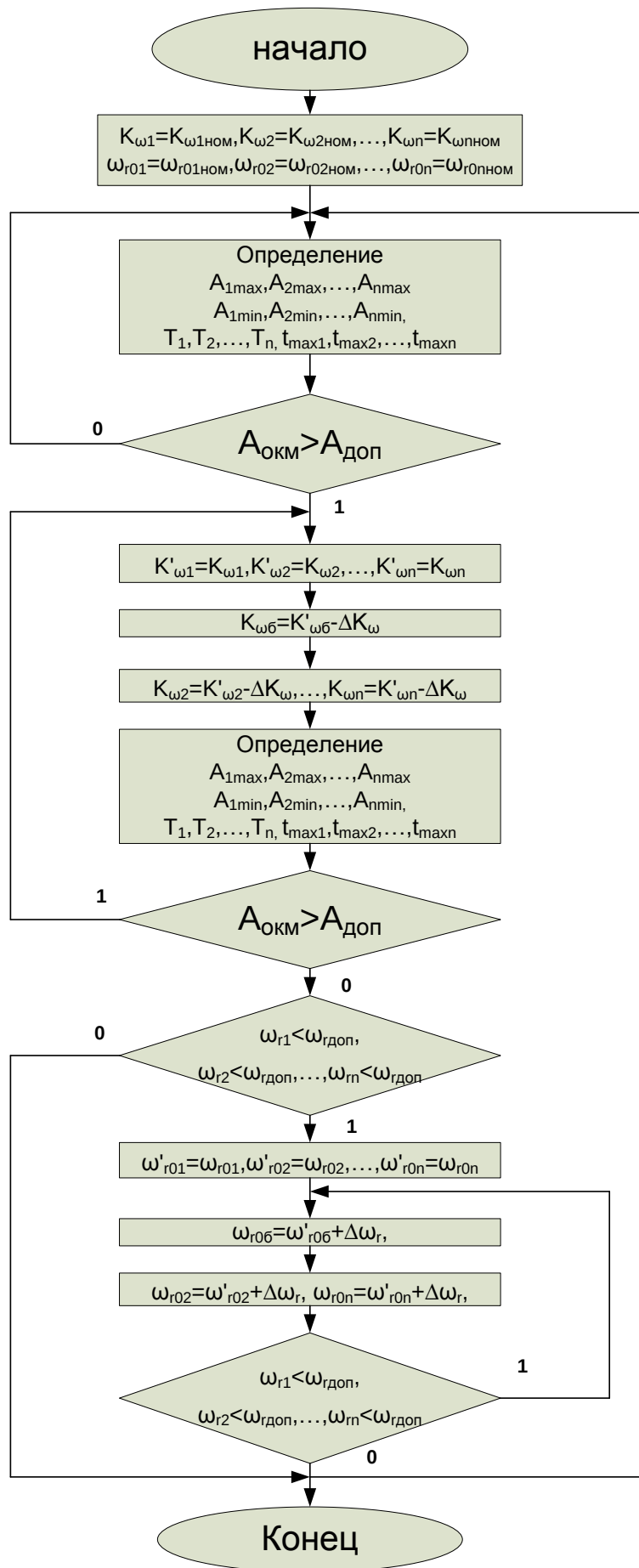


Рис. 4.6. Алгоритм работы блока УОКМ

будут использоваться для определения величины амплитуды обменных колебаний мощности всех параллельно работающих генераторных агрегатов - максимальные $A_{\max}$ и минимальные $A_{\min}$ значения амплитуд токов генераторов, моменты времени $t_{\max}$ максимальных значений токов, период колебаний T и другие. На основании полученных данных делается вывод о наличии и амплитуде обменных колебаний мощности. Блок УОКМ при выявлении превышения амплитуды $A_{\text{окм}}$ обменных колебаний выше допустимого значения $A_{\text{доп}}$ ступенчато с шагом ΔK_{ω} уменьшает коэффициенты передачи регуляторов скорости дизелей. При этом в первую очередь изменяется коэффициент передачи базового дизель-генераторного агрегата, выполняющего роль ведущего генератора. Коэффициенты передачи регуляторов скорости дизелей ведомых агрегатов изменяются одновременно с быстрым действием на много превышающим изменение коэффициента ведущего генераторного агрегата. Одновременно контролируются частоты вращения ω_r роторов генераторов, которые уменьшаются вследствие смягчения характеристик дизель-генераторных агрегатов. При снижении значений ω_r ниже допустимой величины $\omega_{\text{дон}}$ блок ступенчато с шагом $\Delta\omega_r$ увеличивает уставки задания скоростей вращения дизелей до достижения ими номинальной частоты вращения. При этом в первую очередь изменяется уставка задания скорости вращения базового дизель-генераторного агрегата, выполняющего роль ведущего генератора. Уставки задания скоростей вращения дизелей ведомых агрегатов изменяются одновременно с быстрым действием на много превышающим изменение уставки ведущего генераторного агрегата. Необходимость поддержания скорости вращения на номинальном уровне очевидна, так как ее снижение приводит к снижению частоты вырабатываемой электроэнергии, что ухудшает работу судового электрооборудования. Значения коэффициентов передачи K'_{ω} регуляторов скорости дизелей и уставок задания ω'_{r0} скорости вращения дизелей используются для сохранения текущих значений соответствующих параметров перед их изменением.

Блок УОКМ работает по предложенному алгоритму в установившихся режимах и является дополнением ко всем существующим системам автоматики судового электротехнического комплекса. При изменении числа работающих генераторов и значительном изменении нагрузки судовой электростанции его работа прерывается на время переходных процессов, а затем начинается сначала.

4.5. Синфазные колебания мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов

При проведении исследований и работы по составлению алгоритма работы блока УОКМ была выяснена природа и причины синфазных колебаний мощности, обнаруженных при проведении экспериментальных исследований на пароме “Ейск” [87,89]. Как было отмечено, каждый дизель-генераторный агрегат имеет автоматический регулятор частоты вращения, у которого есть два основных параметра - коэффициент передачи и уставка по частоте вращения. Известно, что двух абсолютно одинаковых устройств не существует, поэтому даже при установке одинаковых значений параметров регуляторов при их изготовлении или ремонте, дизель-генераторные агрегаты имеют отличные друг от друга механические характеристики. Разница углов наклона этих характеристик и значений уставки по частоте вращения как раз и приводят к синфазным колебаниям токов, а значит и мощностей параллельно работающих генераторов. Номинальные значения этих параметров определяются экспертным методом, так как только в этом случае возможно учесть индивидуальные особенности дизель-генераторных агрегатов. Блок УОКМ осуществляет дальнейшую подстройку коэффициентов передачи и уставок по частоте вращения относительно определенных номинальных значений.

Необходимо отметить обязательность одновременного изменения коэффициентов передачи регуляторов частоты вращения дизелей с целью

поддержания их равенства. Быстродействие локальных каналов подстройки параметров регуляторов частоты вращения ведомых дизель-генераторных агрегатов должно намного превышать быстродействие смены настроек базового агрегата. В этом случае не нарушается условие обеспечения устойчивости работы энергетической системы и не возникает колебаний мощности из-за рассогласования параметров настройки регуляторов частоты вращения дизелей.

Исследования, проведенные на математической модели судовой электростанции показали, что невыполнение этого условия (рис. 4.7 – 4.10) приводит к возникновению дополнительных синфазных колебаний мощности дизель-генераторных агрегатов, которые накладываются на имеющиеся обменные колебания. Результаты моделирования для различных значений коэффициентов передачи регуляторов частоты вращения дизелей показывают мгновенные значения моментов M_{g1}, M_{g2} , токов I_{A1}, I_{A2} ,

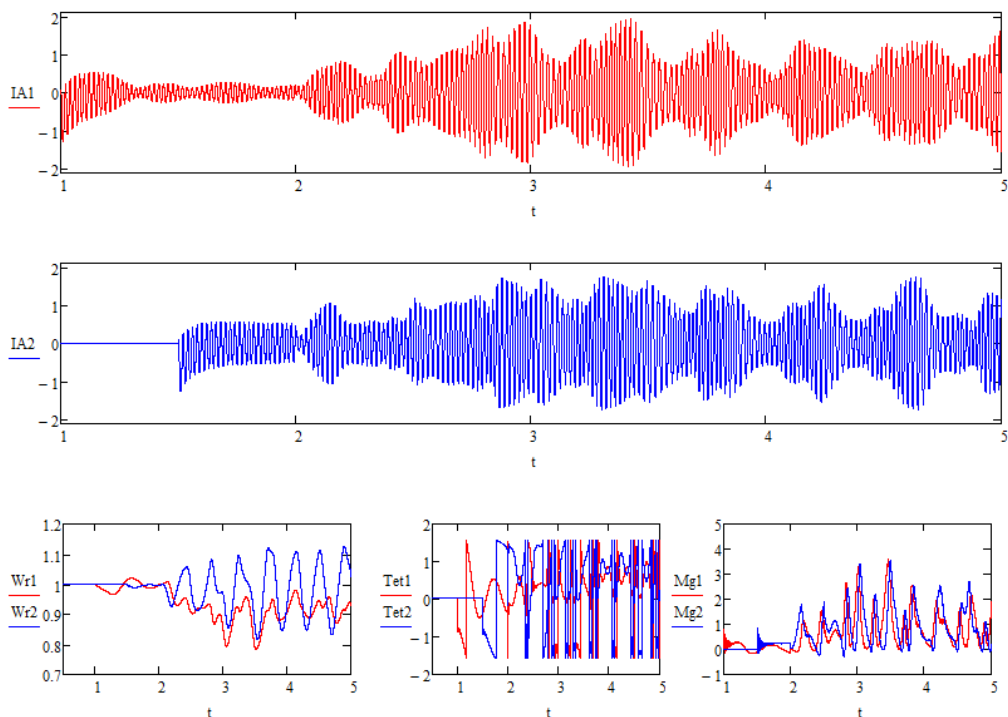


Рис. 4.7. Результаты моделирования, $D_{n1}=0,002$, $D_{n2}=0,01$,

$$K_{\omega 1}=10, K_{\omega 2}=50, \omega_{r01}=1, \omega_{r02}=1$$

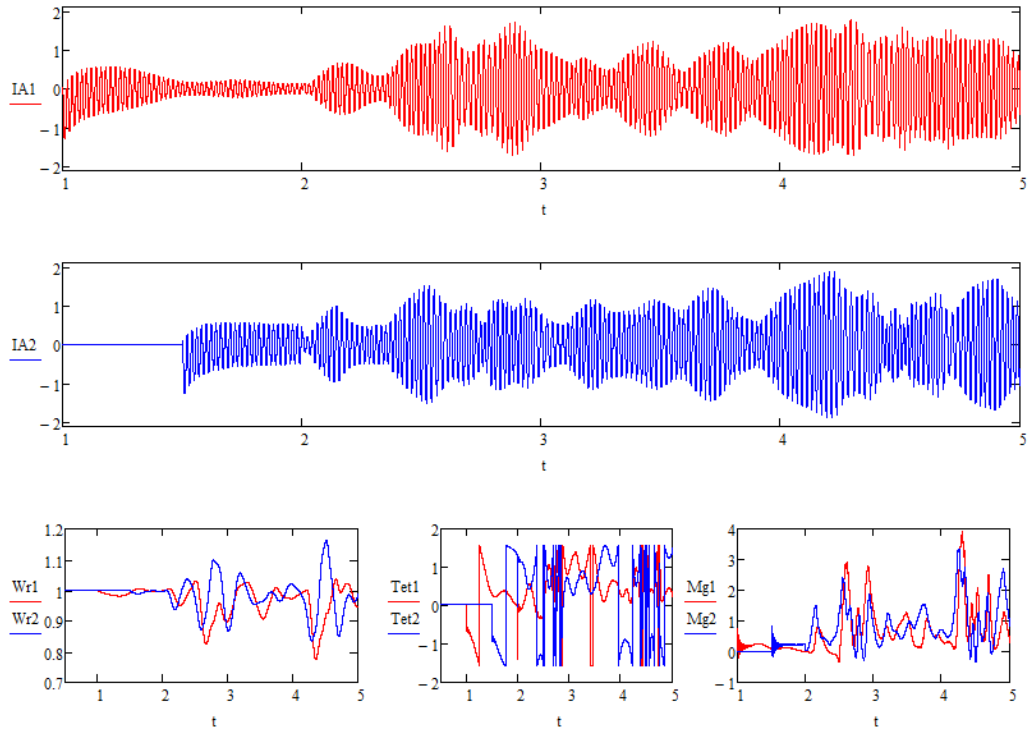


Рис. 4.8. Результаты моделирования, $D_{n1}=0,002$, $D_{n2}=0,01$,
 $K_{\omega 1}=20$, $K_{\omega 2}=50$, $\omega_{r01}=1$, $\omega_{r02}=1$

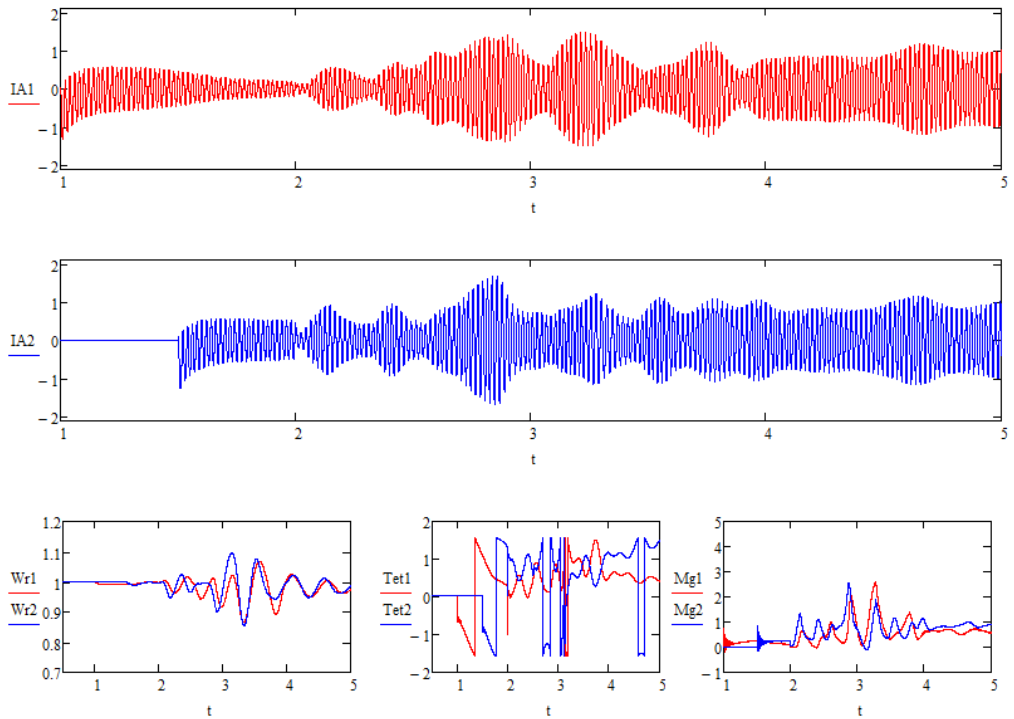


Рис. 4.9. Результаты моделирования, $D_{n1}=0,002$, $D_{n2}=0,01$,
 $K_{\omega 1}=30$, $K_{\omega 2}=50$, $\omega_{r01}=1$, $\omega_{r02}=1$

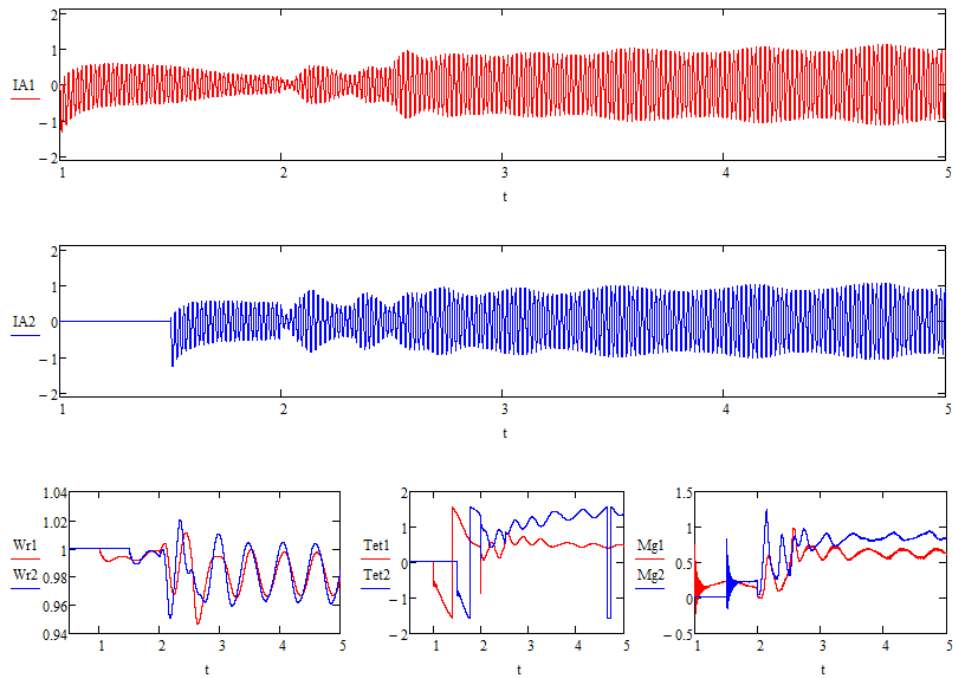


Рис. 4.10. Результаты моделирования, $D_{n1}=0,002$, $D_{n2}=0,01$,
 $K_{\omega 1}=35$, $K_{\omega 2}=50$, $\omega_{r01}=1$, $\omega_{r02}=1$

частот вращения роторов ω_{r1} , ω_{r2} , углов нагрузки Tet_1 , Tet_2 параллельно работающих генераторов.

На приведенных графиках имеют место синфазные колебания токов, частот вращения и моментов генераторов. Амплитуда колебаний увеличивается с увеличением разницы коэффициентов передачи регуляторов параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов.

В процессе работы блока УОКМ задания по частотам вращения всех параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов должны изменяться относительно своих номинальных значений также одновременно с целью поддержания их равенства, так как иначе возникают синфазные колебания мощности, которые суммируются с обменными колебаниями. Быстродействие локальных каналов подстройки задания частоты вращения ведомых дизель-генераторных агрегатов должно намного превышать быстродействие смены настроек базового агрегата. На рис. 4.11 – 4.13 приведены результаты математического моделирования работы дизель-

генераторных агрегатов, уставки по скорости которых различны. Во всех моделируемых режимах присутствует зазор “люфта” со

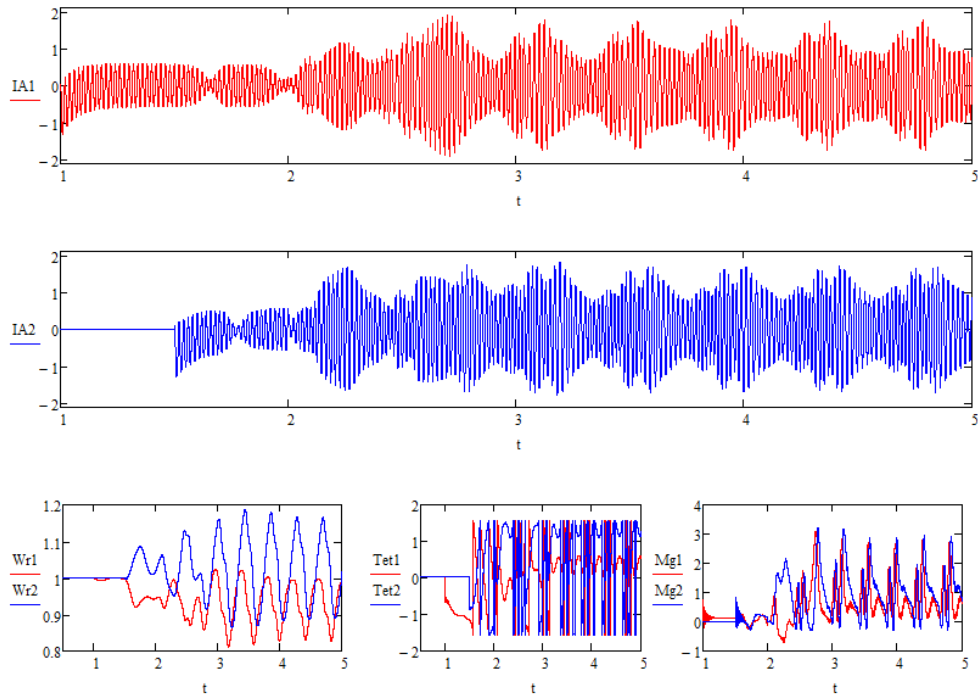


Рис. 4.11. Результаты моделирования, $D_{n1}=0,002$, $D_{n2}=0,01$,
 $K_{\omega 1}=50$, $K_{\omega 2}=50$, $\omega_{r01}=0,945$, $\omega_{r02}=1,045$

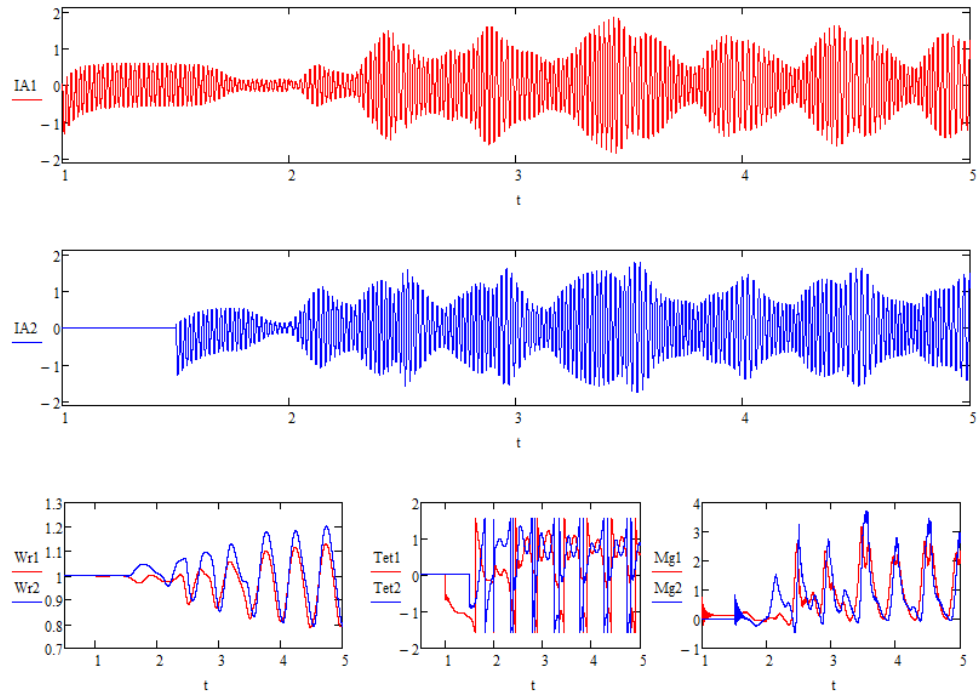


Рис. 4.12. Результаты моделирования, $D_{n1}=0,002$, $D_{n2}=0,01$,
 $K_{\omega 1}=50$, $K_{\omega 2}=50$, $\omega_{r01}=0,985$, $\omega_{r02}=1,025$

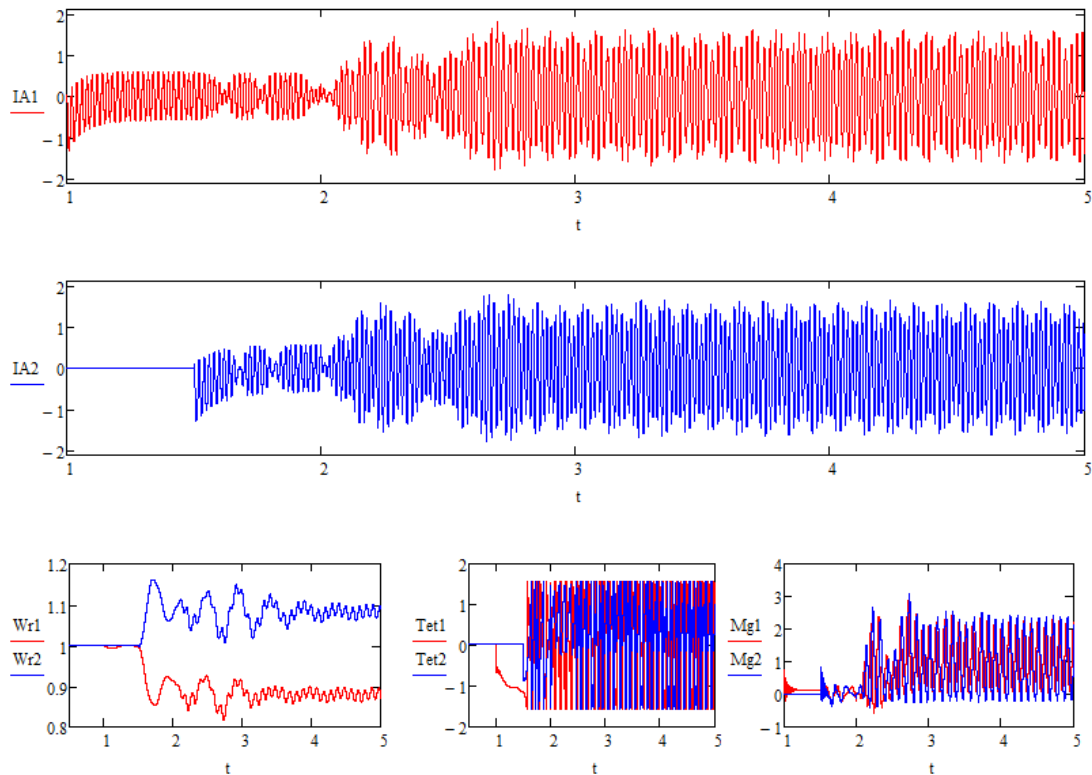


Рис. 4.13. Результаты моделирования, $D_{n1}=0,002$, $D_{n2}=0,01$,

$$K_{\omega 1}=50, K_{\omega 2}=50, \omega_{r01}=0,9, \omega_{r02}=1,1$$

значениями $D_{n1}=0,002$, $D_{n2}=0,01$, к которому добавляются различия в значениях уставок по скорости. Здесь очевидно возникновение дополнительных колебаний мощности, период которых, как показали исследования, увеличивается с ростом разницы уставок по скорости.

Таким образом, синфазные колебания мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов, имеют место при неодинаковых значениях коэффициентов передачи регуляторов частоты вращения и уставок по частоте вращения. Такие различия могут появляться не только в процессе работы системы автоматического управления ОКМ. При проведении экспериментальных исследований на пароме “Ейск” зафиксированы синфазные колебания (рис. 2.20 – 2.22, 2.27 – 2.28, 2.30, А.14 – А. 18, А.26 – А.30) при работе гребных двигателей в ходовом режиме. Синфазные колебания имеют место при движении судна с различной скоростью и при

маневрировании при работе подруливающего устройства. Очевидно, причиной этих колебаний являются различия в настройках регуляторов частот вращения дизелей.

4.6. Определение допустимого уровня обменных колебаний

В алгоритме работы блока УОКМ содержится параметр $A_{\text{доп}}$, с которым сравнивается текущее значение уровня обменных колебаний мощности $A_{\text{окм}}$ при параллельной работе любого количества генераторных агрегатов. Наилучшим методом определения значения $A_{\text{окм}}$, по нашему мнению, является применение интегрального критерия площади разности огибающих токов нормированной по времени [76,84,85]. Рассмотрим подробнее предлагаемый метод для случая параллельной работы двух генераторов (рис. 4.14). Как было отмечено выше, при возникновении обменных колебаний мощности наблюдается пульсирующий характер огибающих токов, что видно на осциллограммах, то есть постоянно меняется амплитуда синусоидального тока. Если соединить максимумы и минимумы токовых

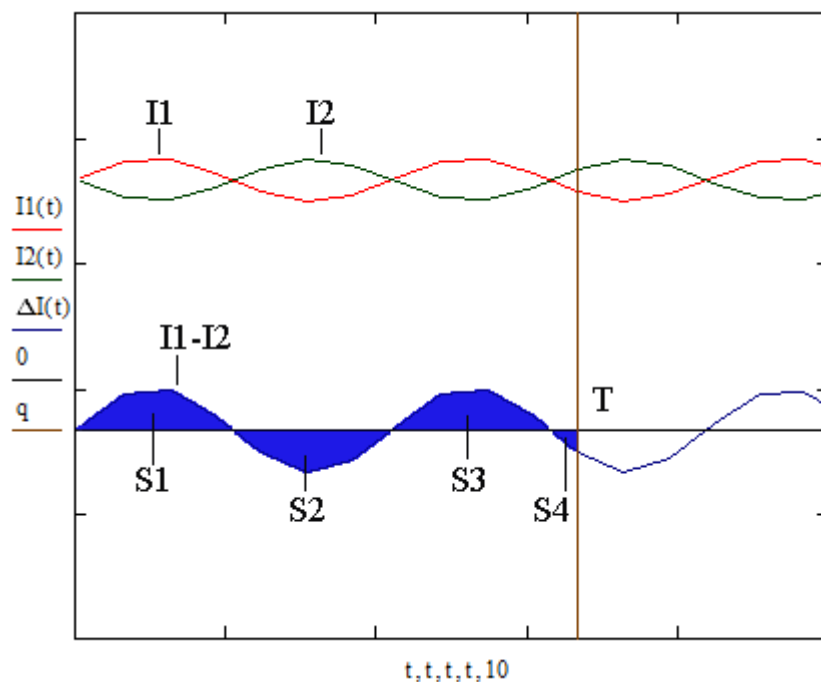


Рис. 4.14. Определение критерия $A_{\text{доп}}$ для двух генераторов

синусоид, то получим примерно синусоидальные линии с частотой несколько Герц. В нашем методе мы будем использовать огибающие I_1 и I_2 , которые соединяют максимумы токовых синусоид. Точки максимумов и минимумов можно находить как экспериментально, так и с использованием эталонной математической модели. Если далее найти разность таких огибающих всех параллельно работающих генераторов, то результатом будет являться синусоидальная линия I_1-I_2 , которая колеблется с той же частотой, что и исходные огибающие вокруг горизонтальной линии, за которую удобно принять ось абсцисс. Линия I_1-I_2 , пересекаясь с осью, отсекает площади $S_1, S_2 \dots S_n$, которые необходимо просуммировать и, таким образом, определить истинный уровень колебаний. Для эффективной работы системы автоматического управления при определении уровня обменных колебаний суммарную площадь необходимо нормировать по времени, то есть отнести к некоторому промежутку T . Значения T и $A_{\text{доп}}$ должны определяться экспертно для каждого судового электротехнического комплекса, а в некоторых случаях и для отдельных режимов работы. На рис. 4.15 и 4.16 пояснено как выглядит применение предлагаемого критерия для случая параллельной работы трех и четырех генераторных агрегатов.

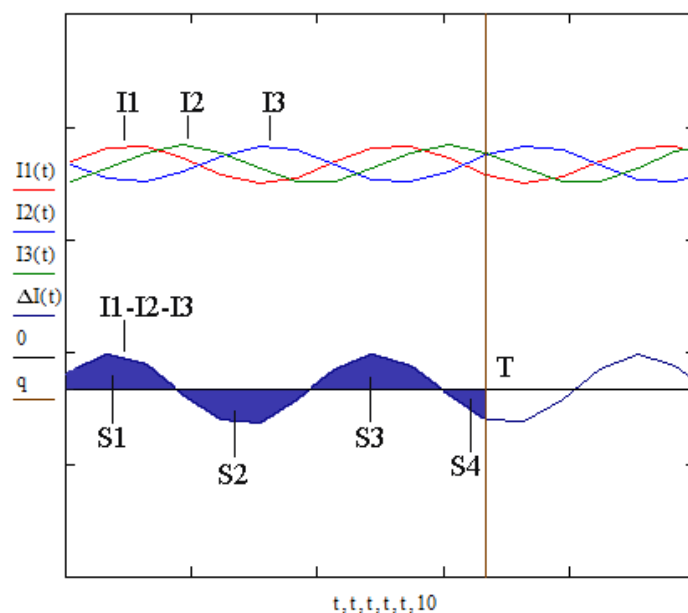


Рис. 4.15. Определение критерия $A_{\text{доп}}$ для трех генераторов

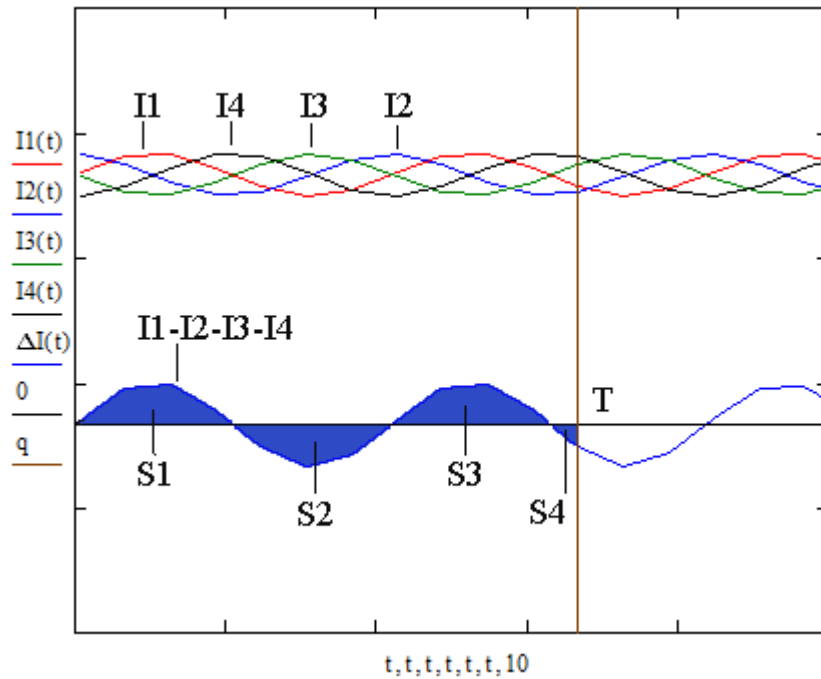


Рис. 4.16. Определение критерия $A_{\text{доп}}$ для четырех генераторов

В математическом виде критерий для определения значения амплитуды обменных колебаний для случая параллельной работы n генераторных агрегатов при использовании интегрального метода площадей можно записать в следующем виде

$$A_{\text{окм}} = \frac{\sum_1^n S(I1 - I2 - \dots - In)}{T}.$$

4.7. Проверка эффективности и работоспособности метода уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности

Проверка эффективности и работоспособности разработанного метода уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности является важной задачей. Реализовать такую проверку на пароме “Ейск”, где проводились экспериментальные исследования, не представляется возможным по нескольким причинам. Основной причиной является требование международной конвенции Солас-74 по безопасности мореплавания

пассажирских судов, запрещающее вносить изменения в работу СЭЭС и выводить их из штатного режима эксплуатации. СЭЭС относятся к особо ответственным системам, обеспечивающим жизнедеятельность судна, что имеет особенно важную значимость в условиях интенсивного морского судоходства в Керченском проливе и большого количества пассажиров на борту парома “Ейск”.

При исследованиях использовалась компьютерная программа SG-SG-RG, моделирующая параллельную работу двух ДГА. Для проверки метода уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности разработана новая программа RESTRICTION (разработчик Савенко А.Е), где реализован алгоритм адаптации параметров настройки регулятора частоты – коэффициента усиления K_ω и сигнала задания по частоте вращения ω_{r0} и интегральный метод оценки уровня обменных колебаний. Разработанная программа более чем в два раза превосходит исходную программу по объему. В программе предусмотрена возможность изменения точности оценки уровня обменных колебаний, шагов поиска коэффициентов усиления K_ω и сигналов задания по частоте вращения ω_{r0} и нормировочного диапазона для вычисления площади. Площадь, ограниченная конечной линией, вычисляется как сумма площадей прямоугольников, на которые она условно разделена программой. При работе программа выводит текущие значения адаптивно изменяющихся коэффициентов усиления K_ω и сигналов задания по частоте вращения ω_{r0} и соответствующий им уровень обменных колебаний в виде численного значения площади. В конце указываются их оптимальные значения.

Приведем результат работы программы RESTRICTION (Рис. 4.17) для исходных условий $D_{n1}=0,002$, $D_{n2}=0,01$, $K_{\omega1}=50$, $K_{\omega2}=50$, $\omega_{r01}=1$, $\omega_{r02}=1$, которые уже использовались при исследованиях [83,84].

В программе задан нормировочный диапазон по времени от 3,5 секунд до 5,5 секунд, таким образом огибающие токов строятся в течение 2 сек. На графике ток I_{A1} показан красным цветом, а огибающая на нем синяя, а для

тока I_{A2} наоборот. Шаг поиска коэффициента усиления K_ω задан равный 4, а шаг поиска уставки по частоте – 0,01. Площадь, характеризующая уровень обменных колебаний принята равной 0,025.

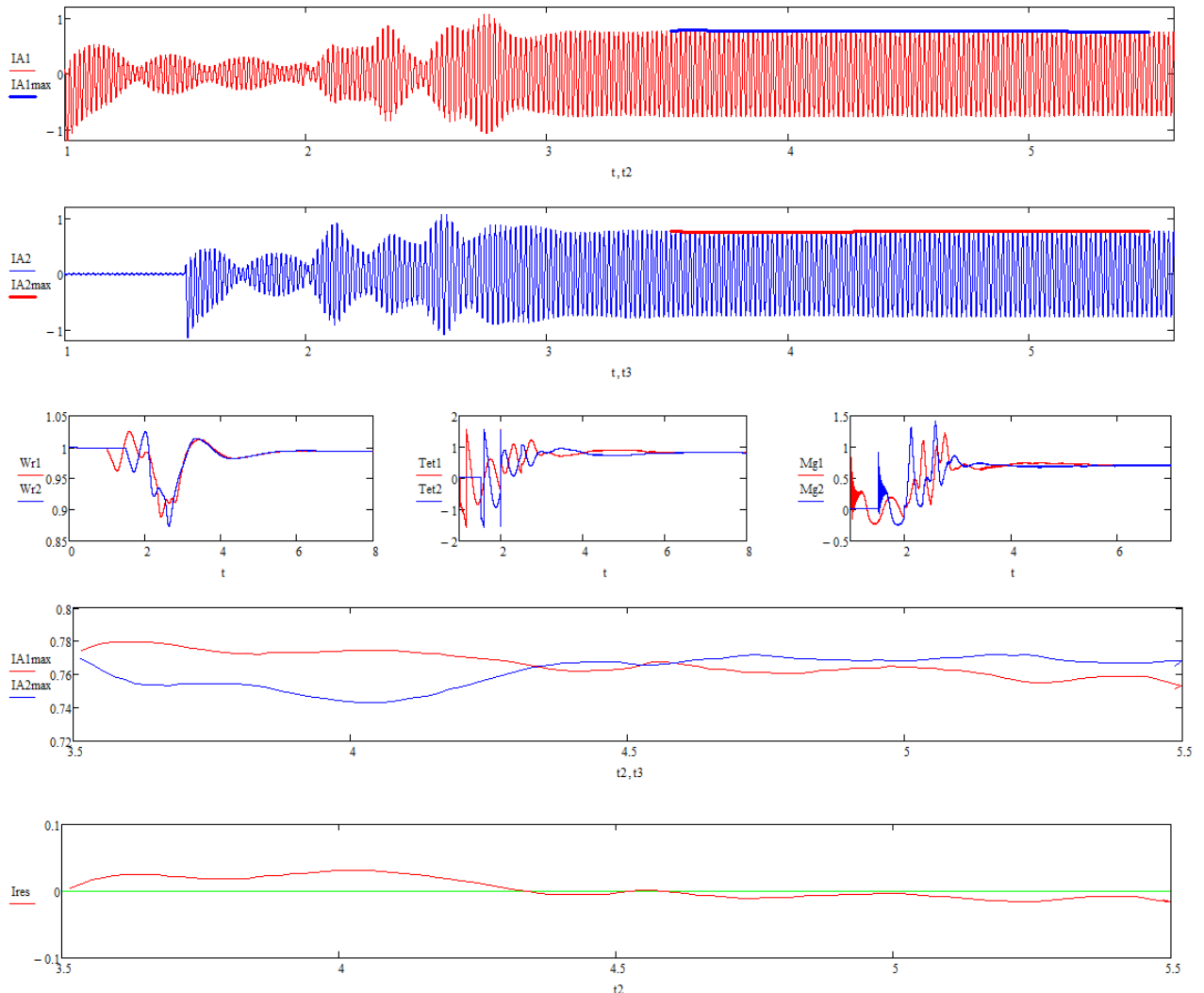


Рис. 4.17. Результаты работы блока адаптации, начальные условия

$$D_{n1}=0,002, D_{n2}=0,01, K_{\omega 1}=50, K_{\omega 2}=50, \omega_{r01}=1, \omega_{r02}=1$$

Результаты работы программы продемонстрировали положительные результаты – обменные колебания мощности отсутствуют или крайне малы, все остальные параметры находятся в допустимых пределах. На рис. 3.10 показано как выглядели результаты работы до начала работы программы адаптации, имеют место значительные колебания мощности.

В судовых многогенераторных электротехнических комплексах возможна ситуация, когда конструктивные параметры дизель-генераторных агрегатов отличаются друг от друга. Поэтому для полноты проведены модельные экспериментальные исследования, направленные на апробацию работоспособности УОКМ в таких условиях. На рис 4.18 приведены результаты работы УОКМ при $D_{n1}=0,002$, $D_{n2}=0,01$, $K_{\omega 1}=50$, $K_{\omega 2}=50$, $\omega_{r01}=1$, $\omega_{r02}=1$, а конструктивные параметры ДГ 2 на 25% превышают параметры ДГ1. Результаты испытаний продемонстрировали положительные результаты (рис.4.18, D.4, D.5, D.6) – обменные колебания мощности отсутствуют или

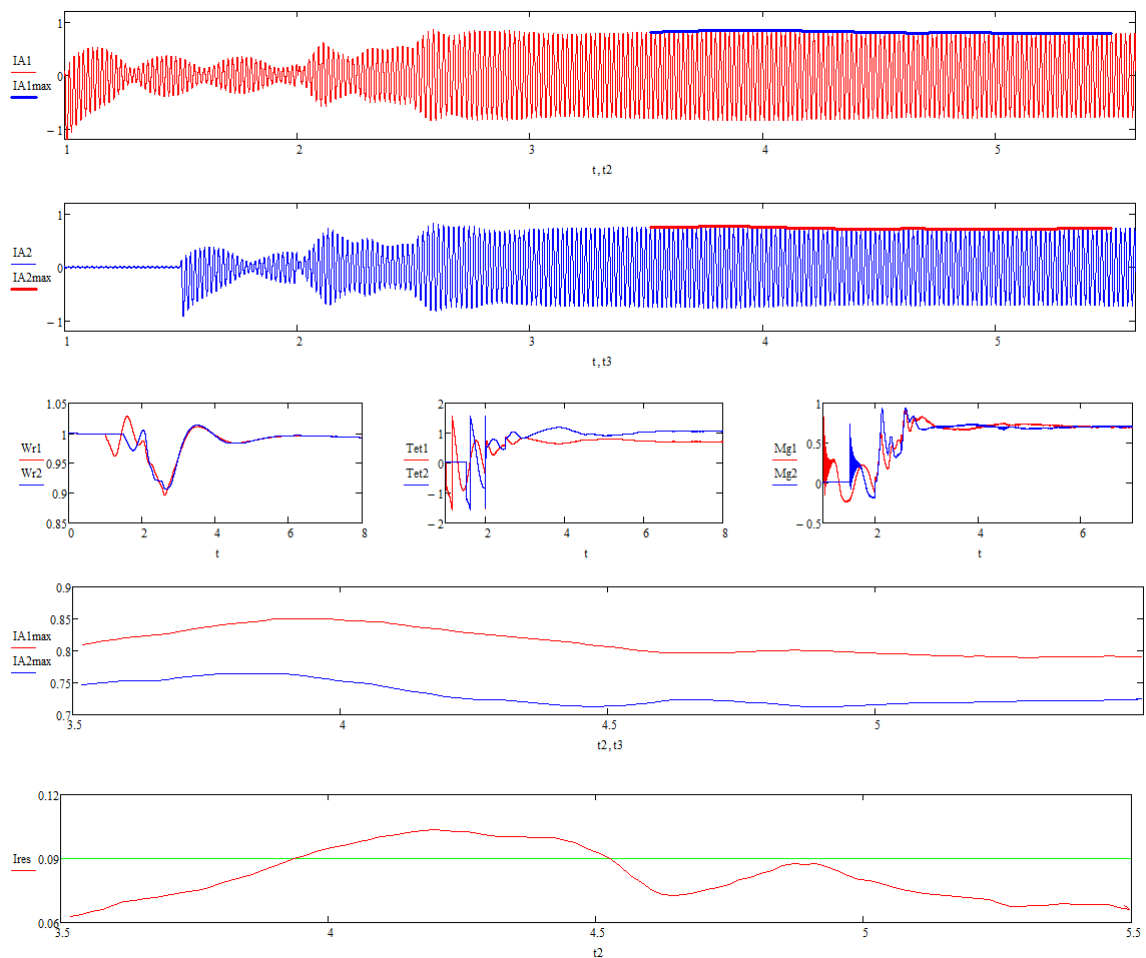


Рис. 4.18. Результаты работы УОКМ, начальные условия $D_{n1}=0,002$, $D_{n2}=0,01$, $K_{\omega 1}=50$, $K_{\omega 2}=50$, $\omega_{r01}=1$, $\omega_{r02}=1$. Конструктивные параметры ДГ 2 на 25% превышают параметры ДГ 1

крайне малы, все остальные параметры находятся в допустимых пределах, т.е. УОКМ успешно справляется с поставленной задачей при наличии люфтов и отличающихся конструктивных параметрах дизель-генераторных агрегатов.

Таким образом, результаты работы программы RESTRICTION подтвердили эффективность и работоспособность разработанных методов и средств по уменьшению амплитуды обменных колебаний мощности при параллельной работе ДГА в составе судовой СЭЭС.

4.8. Выводы к главе 4

1. На основе проведенных исследований с использованием математической модели разработан метод уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов судового электротехнического комплекса. Результат достигается за счет уменьшения коэффициентов передачи регуляторов частоты вращения дизель-генераторных агрегатов.

2. Разработана новая структура судового электротехнического комплекса, имеющая в своем составе адаптивную самонастраивающуюся систему автоматического управления - устройство обменных колебаний мощности.

3. Разработан алгоритм работы устройства обменных колебаний мощности. При обнаружении обменных колебаний мощности устройство адаптивно изменяет коэффициенты передачи регуляторов частоты вращения и уставки задания по частоте вращения дизель-генераторных агрегатов.

4. Установлена причина возникновения синфазных колебаний мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов - рассогласование настроек регуляторов частоты вращения дизелей. Для их исключения в разработанном алгоритме работы устройства обменных

колебаний мощности заложено поддержание равенства коэффициентов передачи регуляторов и уставок по частоте вращения.

5. Разработан критерий определения уровня обменных колебаний для случая параллельной работы n генераторных агрегатов на основе использования интегрального метода площадей.

6. Разработана компьютерная программа, реализующая математическую модель двухгенераторного судового электротехнического комплекса, имеющего в своем составе устройство обменных колебаний мощности. В программе предусмотрена возможность изменения точности определения амплитуды обменных колебаний мощности, шагов поиска коэффициентов усиления K_ω и сигналов задания по частоте вращения $\omega_{г0}$ дизель-генераторных агрегатов, значения нормировочного диапазона T для вычисления площади.

7. На основе проведенного моделирования с использованием разработанной компьютерной программы получены результаты, подтверждающие эффективность работы устройства обменных колебаний мощности, реализующего разработанный метод определения и уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности в судовом электротехническом комплексе.

Заключение

В работе приведено новое решение актуальной задачи повышения технико-экономической эффективности параллельной работы синхронных генераторов судового электротехнического комплекса, которое показывает целесообразность и эффективность совершенствования их системы управления для уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности.

Получены следующие новые результаты, имеющие научное и практическое значение.

1. Проанализированы особенности эксплуатационных режимов параллельно работающих ДГА переменного тока судовых электротехнических комплексов и выявлены причины возникновения обменных колебаний мощности. Показаны возможность и целесообразность совершенствования системы автоматического управления судового электротехнического комплекса, направленного на уменьшение амплитуды обменных колебаний мощности, повышение безопасности мореплавания судна и уменьшение его эксплуатационных затрат.

2. Получены обширные результаты в виде осциллограмм для всех режимов работы действующего морского судна-парома “Ейск”, подтверждающие наличие обменных и синфазных колебаний мощности амплитудой до 100 %, а также значительное, с выбросами до 80%, искажение синусоидальной формы кривых напряжений и токов во время работы тиристорных преобразователей, свидетельствующее о наличии проблем и недостатков параллельной работы судовых синхронных генераторных агрегатов.

3. Получено экспериментальное подтверждение результатов математического моделирования эксплуатационных режимов параллельно работающих ДГА переменного тока многоагрегатной СЭЭС на действующем морском судне-пароме “Ейск” “Керченской паромной переправы”.

4. Доказано с использованием разработанной математической модели электротехнического комплекса исследуемого судна, что основной причиной возникновения обменных колебаний мощности является наличие “люфта” в системе автоматического управления частоты вращения дизелей, а синфазных колебаний мощности – различия в настройке параметров автоматических регуляторов частот вращения дизелей.

5. Предложен метод уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности путем изменения настроек автоматических регуляторов частот вращения дизелей. Обоснована целесообразность применения адаптивной самонастраивающейся системы автоматического управления для реализации разработанного метода.

6. Обоснована целесообразность изменения структуры системы автоматического управления судовым электротехническим комплексом путем ввода в ее состав блока УОКМ. Разработан алгоритм работы блока УОКМ, как адаптивной самонастраивающейся системы автоматического управления, способной уменьшить амплитуду колебаний мощности до допустимого значения.

7. Разработан и проверен на математической модели критерий для определения уровня обменных колебаний при параллельной работе n генераторных агрегатов на основе интегрального метода площадей.

8. Работоспособность и эффективность предложенных в работе методов, критериев и алгоритмов подтверждена результатами математического моделирования судового электротехнического комплекса. Результаты исследований и натурных испытаний переданы для опытной эксплуатации в филиал государственного унитарного предприятия Республики Крым “Крымские морские порты” “Керченская паромная переправа”, директор Каверниченко Н.Н. и в Керченский участок ООО “Югremaвтоматика”, директор Анищенко И.В. (акт о внедрении от 05.11.2014 г.), ООО “ТИС-Крым”, директор Ходько С.П. (акт о внедрении от 31.03.2015 г.).

9. Использование предложенных методов и средств по снижению уровня колебаний мощности позволит повысить безопасность мореплавания и уменьшить затраты на обслуживание дизель-генераторных агрегатов, увеличить объемы выработки электроэнергии и, соответственно, прибыль от эксплуатации судна за счет более эффективного их использования.

Список использованных сокращений

АВ – автоматический выключатель;
АРАМ – автоматический регулятор активной мощности;
АРН – автоматический регулятор напряжения;
АРРМ – автоматический регулятор реактивной мощности;
АРЧ – автоматический регулятор частоты;
АФХ – амплитудно-фазовая характеристика;
ВФШ – винт фиксированного шага;
ГРЩ – главный распределительный щит;
ГЭД – гребной электрический двигатель;
ГЭУ – гребная электрическая установка;
Д – дизель;
ДГА – дизель-генераторный агрегат;
ОУ – объект управления;
П – приемник;
ПИ – пропорционально-интегральный;
ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальный;
САУ – система автоматического управления;
СГ – синхронный генератор;
СНС – самонастраивающаяся система;
СЭЭС – судовая электроэнергетическая система;
ТНВД – топливный насос высокого давления;
ТП – тиристорный преобразователь;
УОКМ – устройство обменных колебаний мощности;
УСГ – устройство синхронизации генераторов;
ЭДС – электрическая движущая сила;

1. Байков П. М. Исследование периодического перераспределения нагрузки между синхронными генераторами судовых электроэнергетических систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Байков Павел Михайлович. – Л., 1970. – 23 с.
2. Баловнев Д. И. Исследование и управление качеством электрической энергии синхронных генераторов автономных энергоустановок: дис. ... канд. техн. наук. : 05.09.01 / Баловнев Денис Иванович. – Смоленск, 2003. – 219 с.
3. Баранов А. П. Моделирование судового электрооборудования и средств автоматизации / А. П. Баранов, М. М. Раимов. – СПб.: Элмор, 1997. – 232 с.
4. Баранов А. П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы / А. П. Баранов. – М.: Транспорт, 1988. – 328 с.
5. Болотин Б. И. Анализ некоторых причин обменных колебаний при параллельной работе судовых дизель-генераторов / Б. И. Болотин, В. И. Толшин, Г. А. Конкс // Сборник научно-технических статей ПТНИИ. –1969. – вып. 10. – С. 167–172.
6. Болотин Б. И. Инженерные методы расчетов устойчивости судовых автоматизированных систем / Б. И. Болотин, В. Л. Вайнер. – Л.: Судостроение, 1974. – 332 с.
7. Болотин Б. И. Исследование параллельной работы разнотипных автоматизированных судовых ГА / Б. И. Болотин, В. Л. Вайнер // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1973 – № 5. – С. 108–117.
8. Болотин Б. И. Исследование устойчивости параллельной работы судовых генераторов с устройствами автоматического распределения активной нагрузки / Б. И. Болотин, А. И. Виноградова, Л. Н. Токарев // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. –1964. – вып. 213. – С. 100–116.

9. Важнов Д. И. Переходные процессы в машинах переменного тока / Д. И. Важнов. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.
10. Васьковский Ю. Н. Определение индуктивных сопротивлений синхронных машин на основе численных расчетов электромагнитных полей / Ю. Н. Васьковский, С. С. Цивинский, С. А. Ветушко // Технічна електродинаміка. – 2006. – №1. – С. 52–56. – ISSN 0204-3599.
11. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учебное пособие для электроэнергет. спец. вузов. – 4-е издание, перераб и доп / В. А. Веников. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.
12. Веретенников Л. П. Моделирование, вычислительная техника и переходные процессы в судовых электроэнергетических системах / Л. П. Веретенников, А. И. Потапкин, М. М. Раимов. – Л.: Судостроение, 1964. – 384 с.
13. Веретенников Л. П. Теория и методы исследования процессов в судовых электроэнергетических системах / Л. П. Веретенников. – Л.: Судостроение, 1975. – 375 с.
14. Вишневский Л. В. Включение синхронных генераторов в многоагрегатную судовую электростанцию / Л. В. Вишневский, А. М. Веретенник, И. Е. Войтецкий, И. П. Козырев // Електромашинобудування та електрообладнання. – К.: Техніка, 2007. – Вип. 68. – С.26–29.
15. Вишневский Л. В. Выбор критерия для оценки процесса включения генераторов на параллельную работу / Л. В. Вишневский, А. М. Веретенник, И. Е. Войтецкий // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – Херсон, 2007. – № 2(20). – С. 136–139.
16. Вишневский Л. В. Компьютерное моделирование судовых вспомогательных электроустановок / Л. В. Вишневский, А. М. Веретенник, Н. И. Муха // Судовые энергетические установки. – Одесса: ОНМА – 2001 – № 6 – С. 23–30.
17. Вишневский Л. В. Моделирование включения синхронных

генераторов в судовую сеть / Л. В. Вишневский, А. М. Веретенник, Н. И. Муха, И. П. Козырев // Електромашинобудування та електрообладнання. – К.: Техніка, 2006. – Вип. 66. – С. 201–204.

18. Вишневский Л. В. Моделирование генераторов переменного тока с различными типами роторов / Л. В. Вишневский, А. М. Веретенник // Електромашинобудування та електрообладнання. – К.: Техніка, 2001. – Вип. 57. – С. 50–54.

19. Вишневский Л. В. Универсальная математическая модель генератора переменного тока / Л. В. Вишневский, В. П. Мироненко // Изв. ВУЗ Электромеханика – 1986. – № 3. – С. 33–40.

20. Вишневский Л. В. Управление процессом синхронизации судовых генераторов / Л. В. Вишневский, А. М. Веретенник, И. П. Козырев // Автоматизация судовых технических средств. – Вып. 15. – Одесса: ОНМА. – 2009. – С. 3–7.

21. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

22. Губанов Ю. А. Теория и методы интеграции средств управления корабельными электроэнергетическими системами: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.09.03 / Губанов Юрий Александрович. – СПб., 2000. – 37 с.

23. Дворак В. Н. Стабилизация динамических характеристик контура регулирования частоты вращения дизель-генератора при параллельной работе генераторов / В. Н. Дворак // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 6. – С. 46–51.

24. Дворак В. Н. Совершенствование системы регулирования генераторных агрегатов автономной судовой электростанции: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Дворак Василий Николаевич. – Севастополь, 2008. – 143 с.

25. Епифанова О. В. Оптимизация режимов работы автономных систем электроснабжения с мощными тихоходными генераторами с дизельным приводом: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.14.02 / Епифанова

Ольга Викторовна. – СПб, 2007. – 22 с.

26. Ефремов Л. В. Теория и практика исследования крутильных колебаний силовых установок с применением компьютерных технологий / Л.В. Ефремов // – Санкт -Петербург: Наука, 2007 г. – 276 с.

27. Загорский А. Е. Управление переходными процессами в электрических машинах переменного тока / А. Е. Загорский, Ю. Г. Шакарян. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 176 с.

28. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: Учебник для вузов / А. В. Иванов–Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

29. Казовский Е. Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока / Е. Я. Казовский. – М.:, Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 400 с.

30. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2 Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Ким Д.П. – М.: Физматлит, 2004. – 464 с.

31. Кириленко О. В. Математичне моделювання в електроенергетиці / О. В. Кириленко, М. С. Сегеда, О. Ф. Буткевич, Т. А. Мазур. – Львів: Видавництво Національного Університету “Львівська політехніка”, 2010. – 608 с. – ISBN 978-966-553-938-4

32. Климанов О. Н. Особенности математического описания параллельной работы при исследовании колебаний мощности генераторов / О. Н. Климанов, Л. Н. Токарев, В. Н. Толчеев // Труды ЦНИДИ. –1968. – вып. 56. – С. 171–189.

33. Климанов О. Н. Разработка систем уравнений для нормализации расчетов переходных процессов в СЭС / О. Н. Климанов // Труды ЦНИИСЭ. – 1970. – вып. 1. – С. 3–9.

34. Ковач К. П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац. – М.:, Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

35. Коломейцева М. Б. Синтез адаптивной системы автоматического регулирования возбуждения синхронного генератора на основе фаззи-

регулятора / М. Б. Коломейцева, Хо Дак Лок // Электричество. – 2002. – №6. – С. 13–15.

36. Конкс Г. А. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта / Г. А. Конкс, В. А. Лашко. – М.: Машиностроение, 2005 г. – 512 с.

37. Коноплев К. Г. Изменение фазного напряжения при импульсном регулировании синхронного генератора в автономных электрических системах / К. Г. Коноплев // Технічна електродинаміка. – 2006. – №1. – С. 68–71. – ISSN 0204-3599.

38. Коноплев К. Г. Импульсное регулирование синхронных генераторов / К. Г. Коноплев. – Севастополь: СевНТУ, 2008. – 258 с.

39. Коноплев К. Г. Новый метод определения фазного напряжения синхронных генераторов при импульсном регулировании / К. Г. Коноплев, А. М. Олейников, Н. Н. Чепендюк // Енергетика та електрифікація. – 2007. – №1. – С. 13–15.

40. Константинов В. Н. Системы и устройства автоматизации судовых электроэнергетических установок / В. Н. Константинов. – Л.: Судостроение, 1988. – 312 с.

41. Константинов В. Н. Синхронизация судовых синхронных генераторов. Теория и методы расчета / В. Н. Константинов. – Л.: Судостроение, 1978. – 216 с.

42. Костенко М. П. Электрические машины / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский – М., Л.: Энергия, 1965. – 704 с.

43. Костюк О. М. К вопросу синтеза систем автоматического регулирования возбуждения синхронных машин / О. М. Костюк // В сб.: “Проблемы технической электродинамики. Автоматизация и релейная защита электрических систем”. – Киев, Наукова думка. – 1966. – С. 9–26.

44. Костюк О. М. Колебания и устойчивость синхронных машин / О. М. Костюк, М. И. Соломаха. – Киев: Наук. думка, 1991. – 200 с. – ISBN 5-12-002101-8.

45. Краснов В. В. Основы теории и расчёта судовых электроэнергетических систем: Моделирование для исследования специальных режимов: Учебное пособие / В. В. Краснов, П. А. Мещанинов, А. П. Мещанинов. – Л.: Судостроение, 1989. – 328 с.

46. Крумм Л. А. Методы адаптивного эквивалентирования в задачах анализа установившихся режимов энергетических систем и управление ими / Л. А. Крумм, В. А. Мантров // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1989. – № 6. – С. 19–32.

47. Крутов В. И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания / В. И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1968. – 535 с.

48. Куцик А. С. Аналіз та синтез систем збудження машин змінного струму електромашиновентильних комплексів генерування електроенергії: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.09.03 / Куцик Андрій Степанович. – Національний ун-т "Львівська політехніка", 2007. – 40 с.

49. Куцик А. С. Експериментальні дослідження електромагнітних процесів в електромеханічній системі з компенсацією реакції якоря синхронної машини / А. С. Куцик, М. Б. Семенюк, В. В. Тутка // Енергетика та електрифікація. – 2010. – №4. – С. 41–45.

50. Куцик А. С. Електромагнітні процеси в системах генерування електроенергії синхронними машинами з фазовим компаундуванням / А. С. Куцик, М. Б. Семенюк // Електроінформ. – 2010. – №4. – С. 18–20.

51. Лайон В. Анализ переходных процессов в электрических машинах переменного тока методом симметричных составляющих / В. Лайон. – М.: Госэнергоиздат, 1958. – 400 с.

52. Литкенс И. В. Нелинейные колебания в регулируемых электрических системах / И. В. Литкенс. – М.: Изд. МЭИ, 1974. – 144 с.

53. Логинов А. Г. Микропроцессорное устройство управления распределением нагрузок параллельно работающих тиристорных систем возбуждения синхронных генераторов / А. Г. Логинов, Л. Г. Егоров // Электричество. – 2006. – №4. – С. 27–31.

54. Лозинський А. О. Структура нечіткого регулятора системи керування збудження синхронного генератора / А. О.Лозинський, А. С. Куцик // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2006. – Вип. 66. – С. 386–388.

55. Лоханин Е. К. Еще раз о математическом моделировании синхронных и асинхронизированных машин при анализе процессов в энергосистемах / Е. К. Лоханин, Л. Г. Мамикоянц // Электричество. – 2000. – №2. – С. 15–21.

56. Лукаш Н. П. Применение нечеткой логики для построения автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов / Н. П. Лукаш, Д. Н. Суховой // Технічна електродинаміка. – 2005. – №5. – С. 41–47. – ISSN 0204-3599.

57. Мальнев А. Н. Синхронизация судовых синхронных генераторов в условиях нелинейных искажений напряжения сети: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Мальнев Алексей Николаевич. – СПб., 2003. – 16 с.

58. Мануилов В. П. Эксплуатационные режимы судовых энергетических установок (сборник ситуационных задач): Учебное пособие / В. П. Мануилов, О. В. Бурлаченко, А. И. Иванов, В. Ю. Кателко, Б. А. Подруцкий. – Одесса: ОГМА, 1992. – 84 с.

59. Маркович И. И. Режимы энергетических систем / И. И. Маркович. – М.: Энергия, 1969. – 350 с.

60. Мелешкин Г. А. Переходные режимы судовых электроэнергетических систем / Г. А. Мелешкин. – Л.: Судостроение, 1971. – 158 с.

61. Мельник Д. А. Аналітичний адаптивний регулятор збудження синхронного генератора з інформацією про активну потужність / Д. А. Мельник, Н. П. Лукаш // Електроінформ. – 2009. – №4. – С. 9–11.

62. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н. Д. Егупова – М., МГТУ, 2002. – 744 с.

63. Методика расчетов устойчивости автоматизированных

электрических систем / Под ред. В. А. Веникова. – М., Высшая школа, 1966. – 510 с.

64. Михайлов В. А. Автоматизация судовых электрических станций / В. А. Михайлов, Б. И. Норневский. – Л.: Судостроение, 1966. – 352с.

65. Мишин В. И. Математическая модель автономной системы “синхронный генератор – асинхронный двигатель” / В. И. Мишин, В. В. Каплун, В. В. Козырский, С. С. Макревич // Энергетика та електрифікація. – 2006. – №10. – С. 30–37.

66. Морозова Ю. А. Параметры и характеристики вентильных систем возбуждения мощных синхронных генераторов / Ю. А. Морозова. – М.: Энергия, 1976. – 152 с.

67. Обобщение опыта наладки и сдачи систем автоматического распределения активной нагрузки / З. С. Рудерман, Л. Г. Конради, Б. И. Болотин, В. П. Коваленко // Судостроение. – 1970. – № 7. – С. 35–37.

68. Олейніченко Н. М. Підвищення якості напруги суднового синхронного генератора з використанням параметричної стабілізації: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Олейніченко Наталія Миколаївна. – Севастополь, 2012. – 22 с.

69. Паластин Л. М. Синхронные машины автономных источников питания / Л. М. Паластин. – М.: Энергия, 1980. – 384 с.

70. Плахтына Е. Г. Математическое моделирование электромашино-вентильных систем / Е. Г. Плахтына. – Львов: Вища шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1986. – 164 с.

71. Постников И. М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин / И. М. Постников. – Киев: Техника, 1966. – 415 с.

72. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб: Российский морской регистр судоходства, 2013. – Том 2. – 718 с.

73. Приходько И. А. Нечеткие структуры систем регулирования возбуждения синхронного генератора / И. А. Приходько // Электричество. – 2002. – №2. – С. 46–50.

74. Режимы работы энергетических систем: Доклады XXII сессии Международной конференции по большим энергетическим системам (СИГРЭ) / Под ред. Веникова В. А. – М.: Энергия, 1968. – 754 с.

75. Рикардо Г. Р. Быстроходные двигатели внутреннего сгорания / Г. Р. Рикардо. – М.: Машгиз, 1960. – 354 с.

76. Савенко А. Е. Визначення амплітуди коливань потужності в судовій електроенергетичній системі // Контроль и управление в сложных системах: тезисы докладов XII Международной научно-технической конференции. – Винница: ВНТУ, 2014. – С. 133.

77. Савенко А. Е. Дослідження судової електроенергетичної системи порому “Сйськ” / А. Е. Савенко // Вістник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 1. – С. 85–89.

78. Савенко А. Е. Исследование обменных колебаний мощности при параллельной работе судовых синхронных генераторов / А. Е. Савенко // Материалы 19 международной конференции по автоматическому управлению “Автоматика 2012”. – Киев, 2012. – С. 251–252.

79. Савенко А. Е. Исследование судовой электроэнергетической системы парома “Ейск” // Контроль и управление в сложных системах: тезисы докладов XI Международной научно-технической конференции. – Винница: ВНТУ, 2012. – С. 173–174.

80. Савенко А. Е. Математическая модель судового электротехнического комплекса / А. Е. Савенко // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 5. – С.

81. Савенко А. Е. Метод уменьшения обменных колебаний мощности при управлении параллельной работой судовых дизель-генераторных агрегатов / А. Е. Савенко // Материалы 20 международной конференции по автоматическому управлению “Автоматика 2013”. – Николаев, 2013. – С. 271–272.

82. Савенко А. Е. Моделирование судовых многогенераторных установок / Л. В. Вишневский, А. Е. Савенко // Материалы 15

международной конференции по автоматическому управлению “Автоматика 2008”. – Одесса, 2008. – С. 93–95.

83. Савенко А. Е. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах. / А. Е. Савенко // III Балтийский морской форум. Международная научная конференция “Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии”: тезисы докладов. I том. – Калининград: изд-во БГАРФ, 2015. – С. 117–119.

84. Савенко А. Е. Ограничение амплитуды обменных колебаний мощности в судовом электротехническом комплексе / А. Е. Савенко // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 2. – С. 52–57.

85. Савенко А. Е. Определение допустимой величины обменных колебаний мощности при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов / А. Е. Савенко // Материалы 21 международной конференции по автоматическому управлению “Автоматика 2014”. – Киев, 2014. – С. 142–143.

86. Савенко А. Е. Оптимизация работы многогенераторной судовой электроэнергетической системы / А. Е. Савенко // Оптимальное управление электроустановками: тезисы докладов I Международной научно-технической конференции. – Винница: ВНТУ, 2011. – С. 14.

87. Савенко А. Е. Оптимизация работы судовой электростанции с целью повышения качества электроэнергии / А. Е. Савенко // Оптимальное управление электроустановками: тезисы докладов II Международной научно-технической конференции. – Винница: ВНТУ, 2013. – С. 91.

88. Савенко А. Е. Оптимізація роботи багатогенераторної суднової електроенергетичної системи / А. Е. Савенко // Вістник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1. – С. 131–134.

89. Савенко А. Е. Оптимізація роботи суднової електростанції з метою підвищення якості електроенергії / А. Е. Савенко // Вістник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 6. – С. 74–78.

90. Савенко А. Е. Применение синхронного индукторного двигателя

в винторулевых колонках с аzipодом / А. Е. Савенко // Рибне господарство України. – 2005. – №7. – С. 51–52.

91. Савенко А. Е. Результаты экспериментального исследования режимов работы судовой электроэнергетической системы парома “ Ейск”/ А. Е. Савенко // Судовые энергетические установки. – 2010. – №26. – С. 30–36.

92. Савенко А. Е. Теоретическое и экспериментальное исследование работы многогенераторной судовой электроэнергетической системы / А. Е. Савенко // Контроль и управление в сложных системах: тезисы докладов X Международной научно-технической конференции. – Винница: ВНТУ, 2010. – С. 166.

93. Савенко А. Е. Теоретичне та експериментальне дослідження роботи багатогенераторної судової електроенергетичної системи / А. Е. Савенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 3. – С. 58–62.

94. Савенко А. Е. Управление параллельной работой современных судовых многогенераторных электростанций / Л. В. Вишневский, А. Е. Савенко, И. П. Козырев // Судовые энергетические установки. – 2007. – №19. – С. 87–91.

95. Савенко А. Е. Экспериментальное подтверждение математической модели судовой многогенераторной системы / А. Е. Савенко // Материалы 18 международной конференции по автоматическому управлению “Автоматика 2011”. – Львов, 2011. – С. 63.

96. Сергиенко Л. И. Электроэнергетические системы морских судов / Л. И., Сергиенко, В. В. Миронов. – М.: Транспорт, 1991. – 264 с.

97. Сидельников Б. В., Рогачевская Г. С., Кульметов А. А. Идентификация параметров синхронных машин с магнитоэлектрическим возбуждением / Б. В. Сидельников, Г. С. Рогачевская, А. А. Кульметов // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2006. – Вип. 66. – С. 234–236.

98. Сипайлов Г. А. Математическое моделирование электрических

машин / Г. А. Сипайлов, А. В. Лоос. – М.: Высшая школа, 1980. – 176 с.

99. Справочник судового электротехника: Судовое электрооборудование / Под ред. Г. И. Китаенко. – Л.: Судостроение, 1980. – Т. 2. – 624 с.

100. Сыромятников В. Ф. Эксплуатация систем автоматического регулирования судовых силовых установок / В. Ф. Сыромятников. – М.: Транспорт. 1975. – 272 с.

101. Твердяков В. В. Определение параметров мощных синхронных генераторов по частотным характеристикам / В. В. Твердяков // Технічна електродинаміка. – 2001. – №5. – С. 57–60. – ISSN 0204-3599.

102. Тимченко В. Ф. Колебания нагрузок и обменной мощности энергосистем / В. Ф. Тимченко. – М.: Энергия, 1975. – 208 с.

103. Токарев Л. Н. Математическое описание, расчет и моделирование физических процессов в судовых электростанциях / Л. Н. Токарев – Л. : Судостроение, 1980 г. – 119 с.

104. Толшин В. И. Устойчивость параллельной работы дизель-генераторов / В. И. Толшин. – Л.: Машиностроение, 1968. – 430 с.

105. Толшин В. И., Болотин Б. И. Результаты аналитического исследования обменных колебаний при параллельной работе дизель-генераторов ДГР 150/750 / В. И. Толшин, Б. И. Болотин // – "Труды ЦНИДИ". – 1968. – вып. 56. – С. 208–218.

106. Толшин В. И., Болотин Б. И. Экспериментально-расчетный метод исследования обменных колебаний мощности при параллельной работе дизель-генератора с сетью / В. И. Толшин, Б. И. Болотин // Энергомашиностроение. – 1967. – № 9. – С. 38–45.

107. Толшин В. И., Болотин Б. И., Конкс Г. А. Влияние топливной аппаратуры на устойчивость дизель-генератора мощностью 150 кВт / В. И. Толшин, Б. И. Болотин, Г. А. Конкс // Труды Науч. исслед. ин-та информации тяж. маш. – 1969. – № 4. – С. 3–9.

108. Толшин В. И., Сизых В. А. Автоматизация судовых

энергетических установок / В. И. Толшин, В. А. Сизых. – М.: РКонсульт, 2003. – 304 с.

109. Трещев И. И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока / И. И. Трещев. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.

110. Федотов А. И. Дискретные математические модели синхронной машины с вентильной системой самовозбуждения / А. И. Федотов, Р. Р. Каримов, Е. А. Федотов // Электричество. – 2004. – №11. – С. 33–40 .

111. Хижняков Ю. Н. Комбинированный метод управления параллельной работой генераторов переменного тока / Ю. Н. Хижняков. – Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1999. – 114 с.

112. Чабан В. Математичне моделювання електромеханічних процесів / В. Чабан. – Львів: Видавництво Національного Університету “Львівська політехніка”, 1997. – 342 с. – ISBN 966 553-005-4

113. Шейнихович В. В. Качество электрической энергии на судах / В. В. Шейнихович, О. Н. Климанов, Ю. И. Пайкин, Ю. Я. Зубарев – Л.: Судостроение, 1988. – 160 с.

114. Шхати Х. В. Разработка мероприятий по снижению опасных воздействий крутильных колебаний на турбоагрегаты на основе компьютерного моделирования: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Шхати Хамид Васфи. – СПб., 2001. – 20 с.

115. Юрганов А. А., Кожевников В. А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов / А. А. Юрганов, В. А. Кожевников. – СПб.: Наука, 1996. – 138 с.

116. Boldea I. The Electric Generators Handbook. Synchronous generators / I. Boldea. – Taylor & Francis Group, LLC, 2006. – 425 p. – ISBN 0-8493-5725-X (alk. paper).

117. Boldea I. The Electric Generators Handbook. Variable speed generators / I. Boldea. – Taylor & Francis Group, LLC, 2006. – 494 p. – ISBN 0-8493-5715-2 (alk. paper).

118. Sankaran C. Power quality / C. Sankaran. – CRC Press LLC, 2002. –

202 p. – ISBN 0-8493-1040-7 (alk. paper).

119. Reimert D. Protective relaying for power generation systems / D. Reimert. – Taylor and Francis Group, LLC, 2006. – 545 p. – ISBN-13: 978-0-8247-0700-2 (alk. paper).

120. Donald G. Standard Handbook for Electrical Engineers, 14 edition / G. Donald, H. Fink, B. Wayne. Mc Graw – Hill Engineering and Technology Management, October 1, 1999. – 2304 p.

121. Acha E. Power Electronic Control in Electrical Systems / E. Acha, V. G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T. J. Miller. – MPG Books Ltd, Bodmin, Cornwall, 2002. – 451 p. – ISBN: 0-7506-5126-1.

122. Fitzgerald E. Electric Machinery / E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. – McGraw-Hill, 2003. – 703 p. – ISBN: 0-8493-5715-2 (alk. paper).

123. Klempner G. Operation and maintenance of large turbo generators / G. Klempner, I. Kerszenbaum. – John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004. – 580 p. – ISBN 0-471-61447-5.

124. Hiyama T. A. Fuzzy Logic Excitation System for Stability Enhancement of Power Systems with Multi-mode Oscillations / T. Hiyama, K. Miyazaki, H. Satoh // IEEE Trans, on Energy Conversion. – 2006. – Vol. 11. – No. 2. – P. 449–454.

125. Whitaker J. C. AC Power Systems Handbook Third Edition / J. C. Whitaker. – Taylor & Francis Group, 2007. – 405 p. – ISBN: 0-8493-4034-9 (alk. paper).

126. Gieras J. F. Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines / J. F. Gieras, R. J. Wang, M. J. Kamper. – Springer Science and Business Media, Inc, 2005. – 344 p. – ISBN: 1-4020-2720-6.

127. Jalili-Kharaajoo M. Design of Simple Neuro-controller for Global Transient Control and Voltage Regulation of Power Systems / M. Jalili-Kharaajoo, R. Mohammadi-Milasi // International Journal of Control, Automation, and Systems. – 2005. – Vol. 3. – No. 2 (special edition). – P. 302–307.

128. Pyrhonen J. Design of Rotating Electrical Machines / Juha Pyrhonen,

Tapani Jokinen and Val'eria Hrabovcov'a. – John Wiley & Sons, Ltd. 2008. – 531 p. – ISBN: 978-0-470-69516-6 (H/B).

129. Riley K.F. Mathematical Methods for Physics and Engineering. Third Edition / K.F. Riley, M.P. Hobson, S. J. Bence. – United States of America by Cambridge University Press, New York, 2006. – 1363 p. – ISBN: 13 978-0-511-16842-0.

130. Barnes M. Practical variable speed drives / Malcolm Barnes – V. Mehra, Mumbai, India, 2003. – 299 p. – ISBN 0-7506-5808-8.

131. El-Hawary M. Electrical energy system / Mohamed El-Hawary. – Boca Raton London New York Washington, D.C., 2000. – 369 p. – ISBN: 0-8493-2191-3.

132. Ouassaid M. A new nonlinear excitation controller for transient stability enhancement in power systems / M. Ouassaid, A. Nejmi, M. Cherkaoui, M. Maaroufi // Proceedings of world academy of science, engineering and technology. – 2005. – Vol. 8. – P. 116–121.

133. Kiameh P. Power generation handbook / P. Kiameh. – McGraw-Hill Professional, 1 edition, Aug 28 2002. – 560 p. – ISBN: 0-0713-9604-7.

134. Breeze P. Power generation technologies / P. Breeze. – Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 30 Corporate Drive, Burlington, MA 01803, 2005. – 289 p. – ISBN 0- 7506-6313-8.

135. Rajeev Gupta. Design of decentralized power system stabilizers for multimachine power system using model reduction and fast output sampling techniques / Rajeev Gupta, B. Bandyopadhyay, A. M. Kulkarni // Control Conference. – 2004. – P. 1384–1392.

136. Sedaghati A. A PI controller based on gain-scheduling for synchronous generator / A. Sedaghati // Turkish journal of electrical engineering & computer sciences. – 2006. – Vol. 14. – No.2. – P. 241–251.

137. Toliyat H. A. Design of Augmented Fuzzy Logic Power System Stabilizers to Enhance Power Systems Stability / H. Toliyat, J. Sadeh, R. Ghazi // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2006. – Vol. 11. – No. 1. – P. 97–103.

138. Venayagamoorthy G.K. Two Separate Continually Online-Trained Neurocontrollers for Excitation and Turbine Control of a Turbogenerator / G. K. Venayagamoorthy, R. G. Harley // IEEE Trans, in industry applications. – 2002. – Vol. 38. – No. 3. – P. 887–893.

139. Watson D. B. Response of a self-excited induction generator to rectifier harmonics / D. B. Watson, R. M. Duke - Intern. Journal of Electr. Eng. Education, v. 25, Nr 1, 1988. – P. 15–25.

ПРИЛОЖЕНИЕ

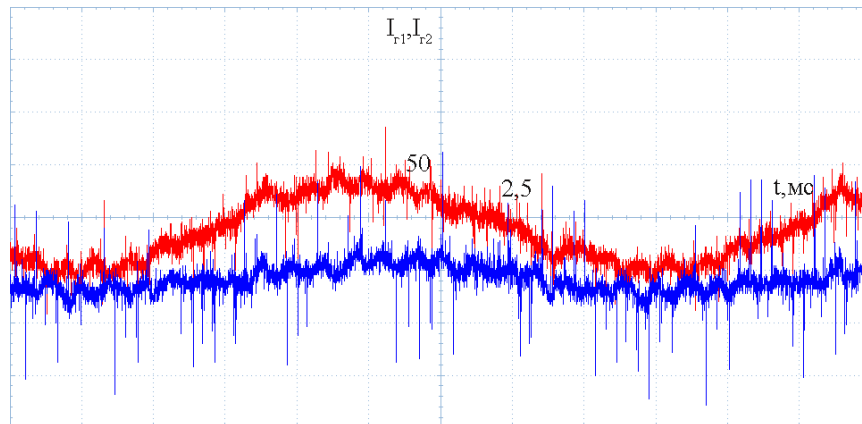
Приложение А. Результаты экспериментальных исследований на пароме
“Ейск”

Рис. А.1. Токи ДГ 1 и ДГ 2 при параллельной работе, нагрузка по 50 кВт

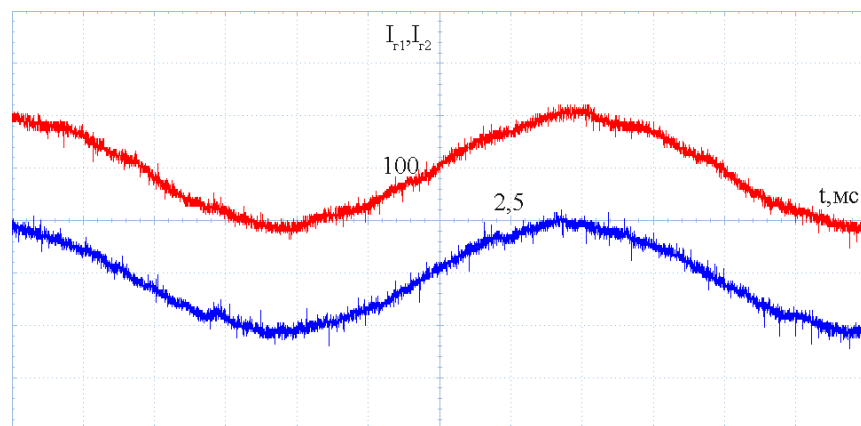


Рис. А.2. Токи ДГ 1 и ДГ 2 при параллельной работе, запуск подруливающего устройства, бросок тока до 500 А

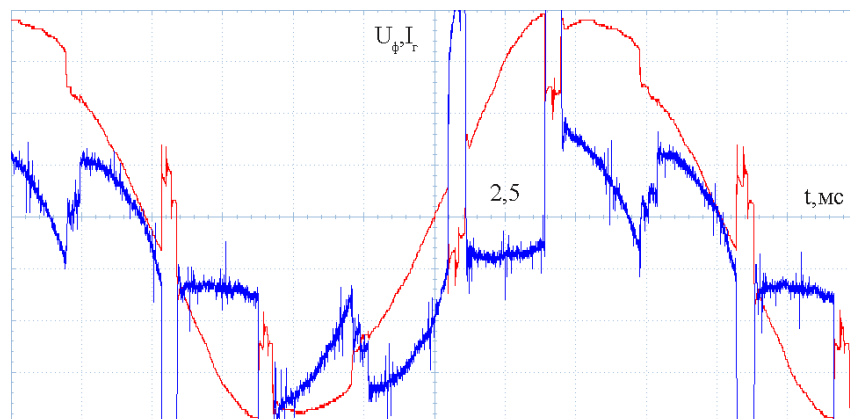


Рис. А.3. Начало работы тиристорного преобразователя, пробный пуск до 100 А, красная кривая – фазное напряжение, синяя – ток ДГ 2

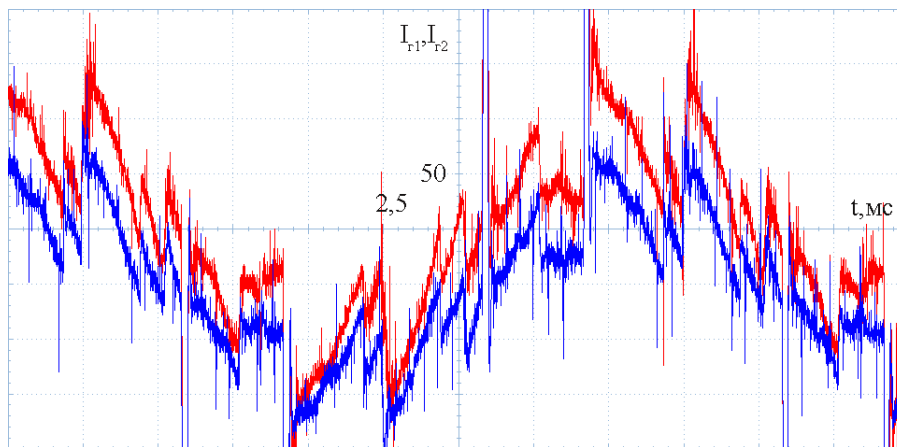


Рис. А.4. Токи ДГ 1 и ДГ 2 при параллельной работе, швартовка

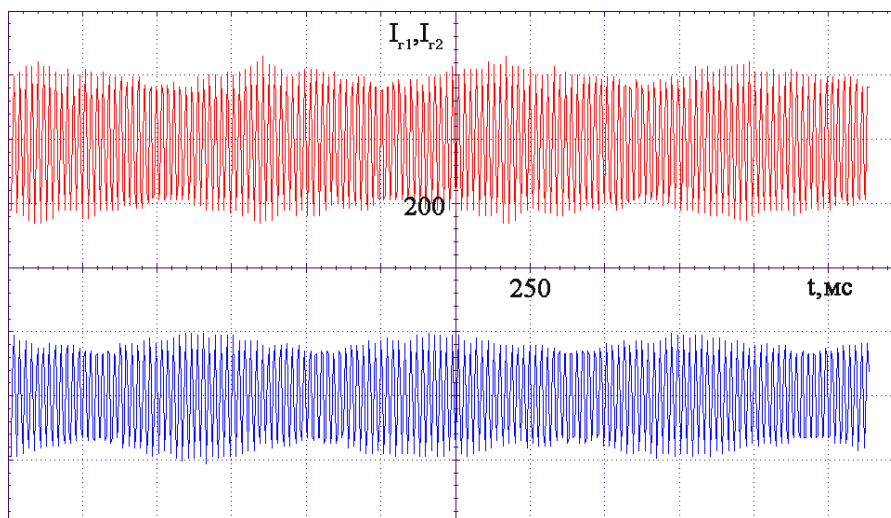


Рис. А.5. Токи параллельно работающих генераторов в установившемся режиме 3

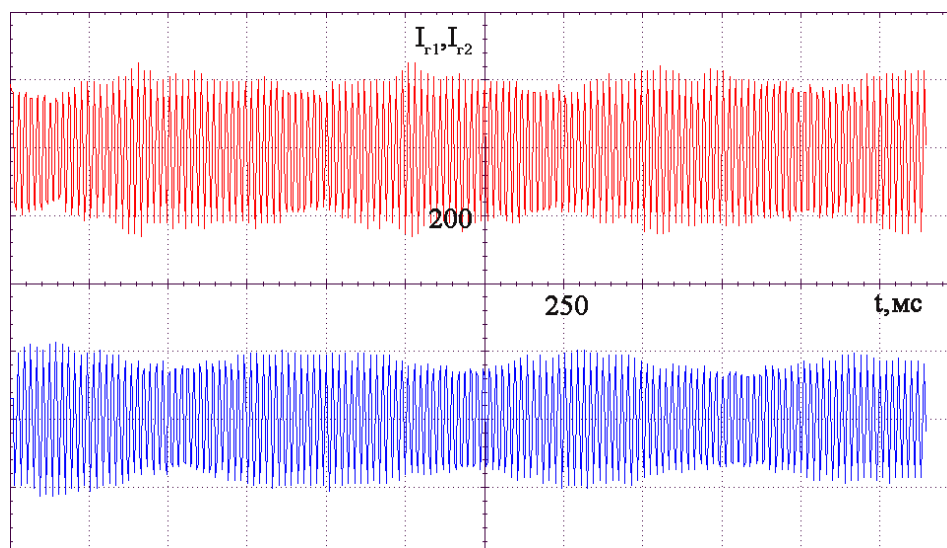


Рис. А.6. Токи параллельно работающих генераторов в установившемся режиме 4

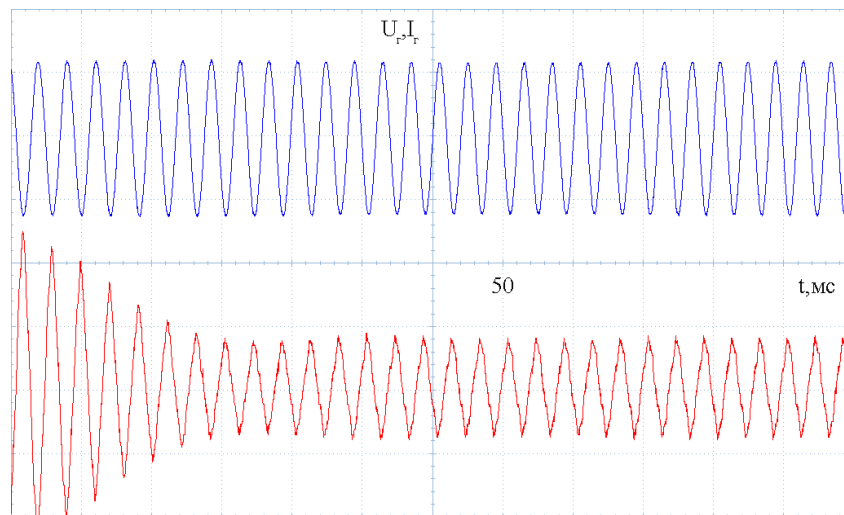


Рис. А.7. Ток и напряжение одного из параллельно работающих генераторов при останове подруливающего устройства

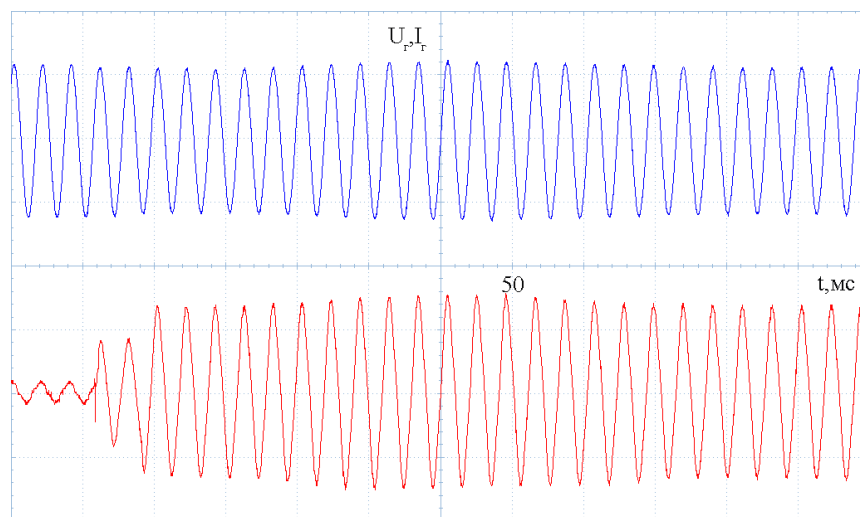


Рис. А.8. Напряжение и ток одного из параллельно работающих генераторов при пусках потребителей (режим 3)

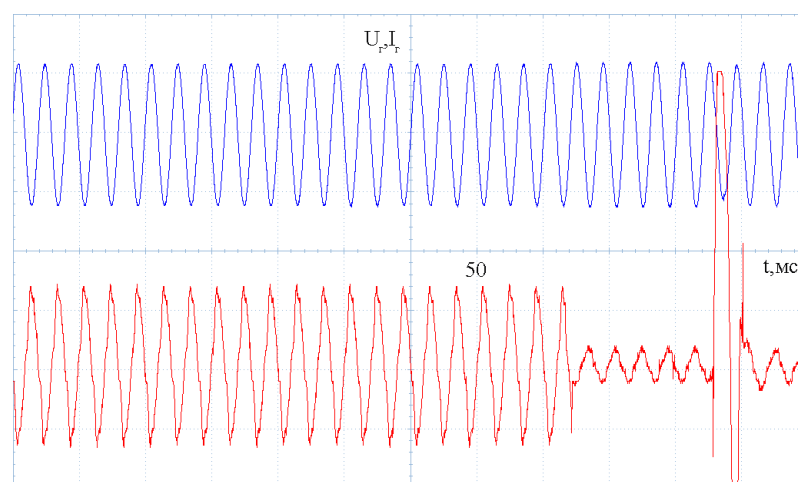


Рис. А.9. Напряжение и ток одного из параллельно работающих генераторов при останове потребителей

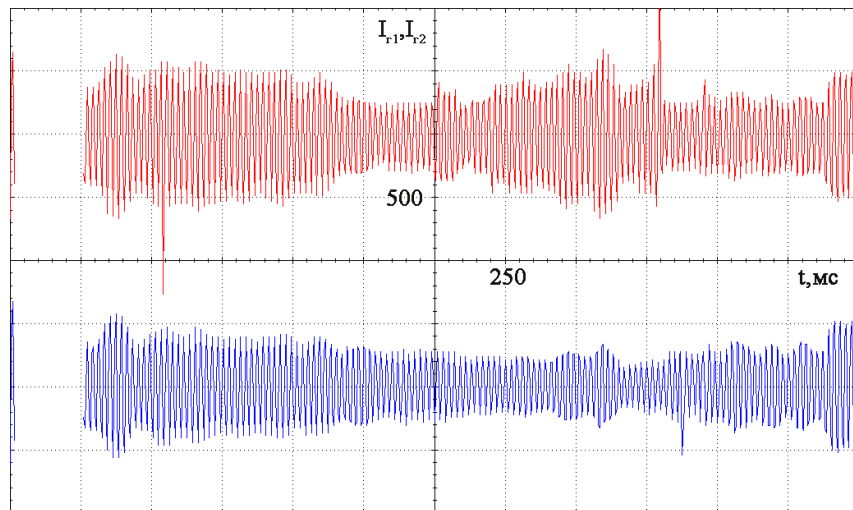


Рис. А.10. Токи параллельно работающих генераторов при работающем подруливающем устройстве (режим 3)

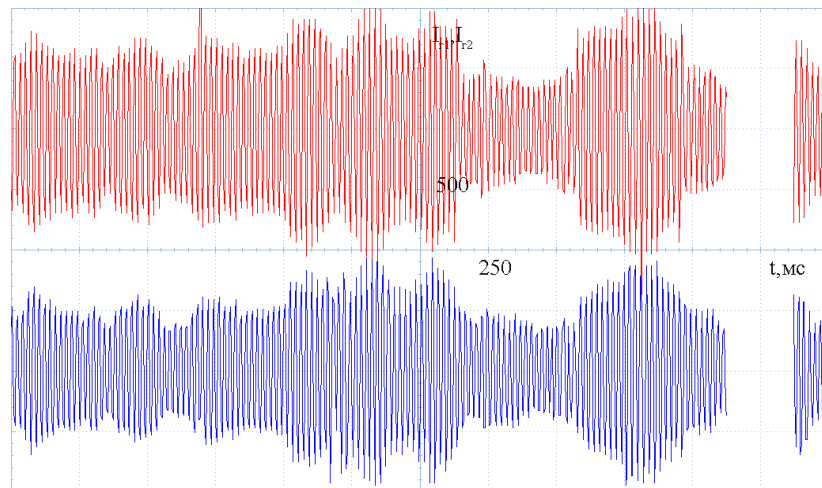


Рис. А.11. Токи параллельно работающих генераторов при работающем подруливающем устройстве (режим 4)

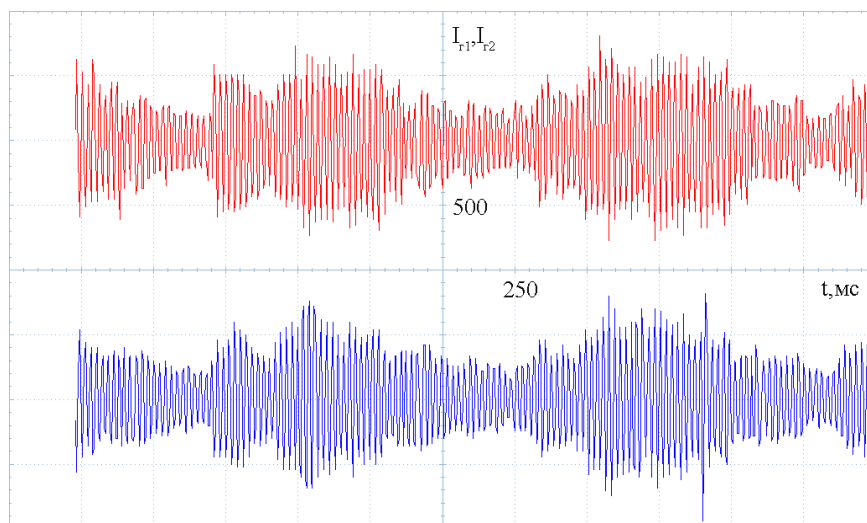


Рис. А.12. Токи параллельно работающих генераторов при работающем подруливающем устройстве (режим 5)

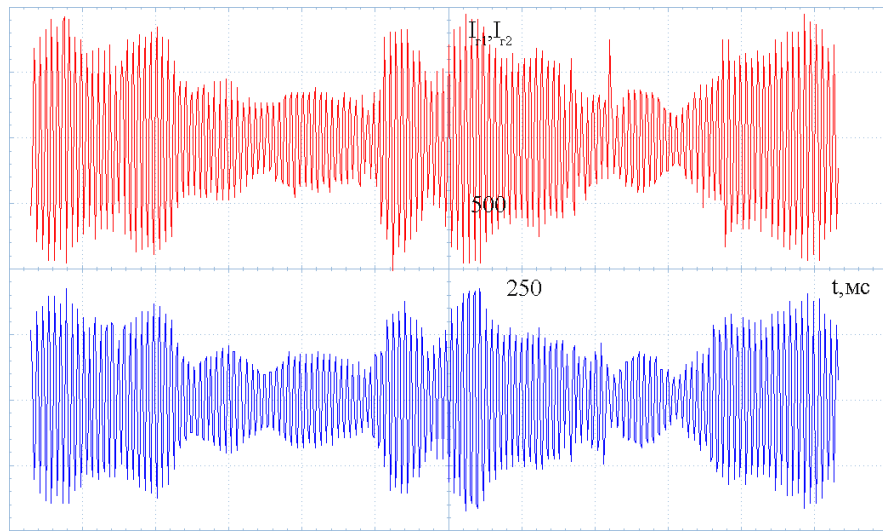


Рис. А.13. Токи параллельно работающих генераторов при работающем подруливающем устройстве (режим 6)

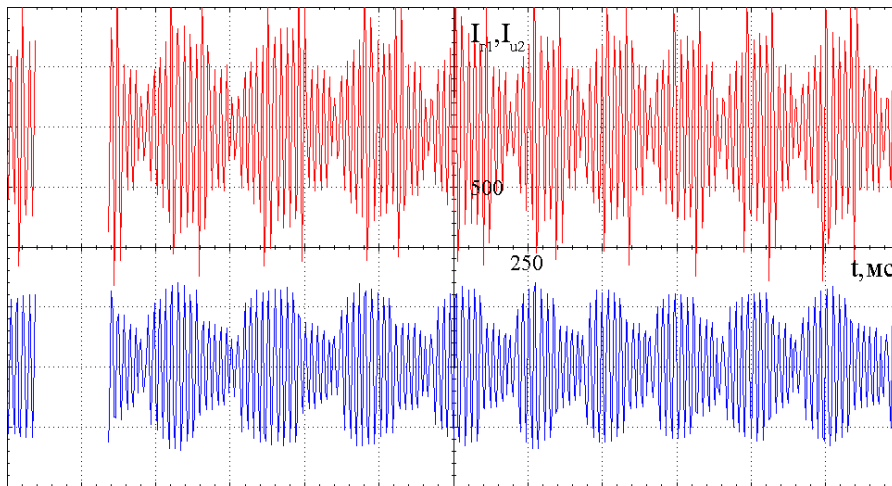


Рис. А.14. Токи параллельно работающих генераторов при работающих гребных двигателях (режим 4)

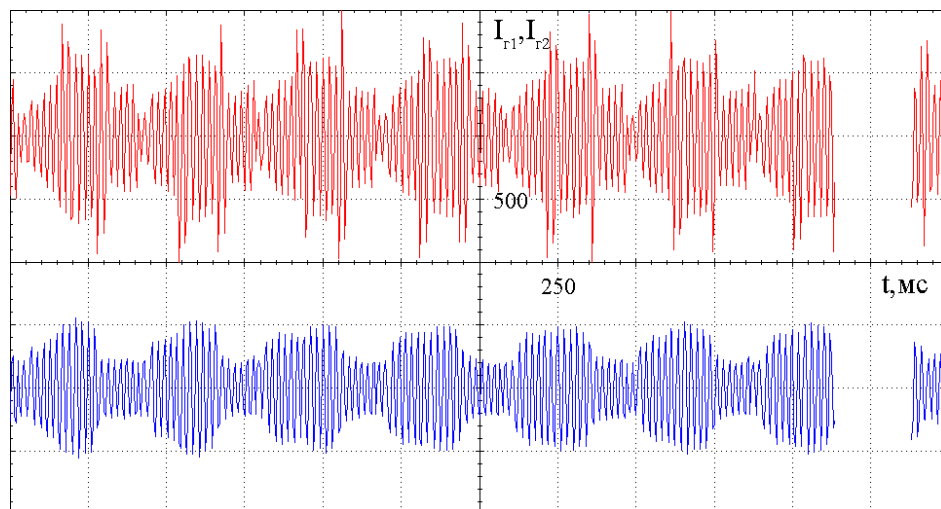


Рис. А.15. Токи параллельно работающих генераторов при работающих гребных двигателях (режим 5)

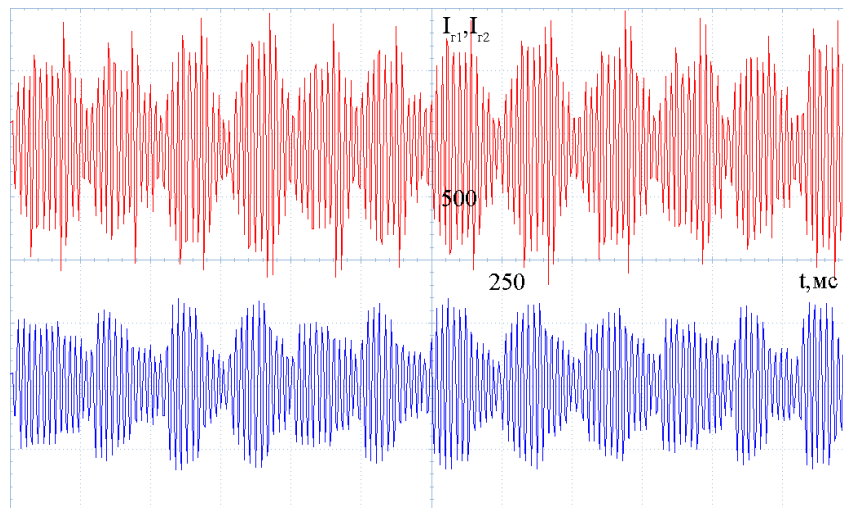


Рис. А.16. Токи параллельно работающих генераторов при работающих гребных двигателях (режим 6)

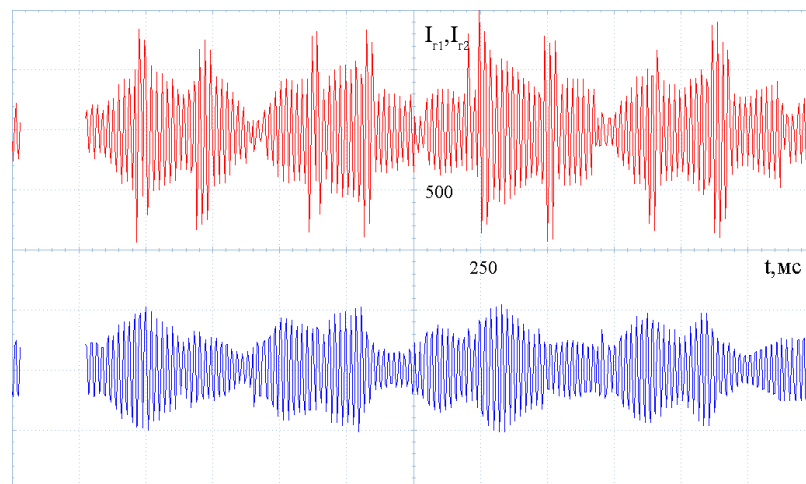


Рис. А.17. Токи параллельно работающих генераторов при работающих гребных двигателях (режим 7)

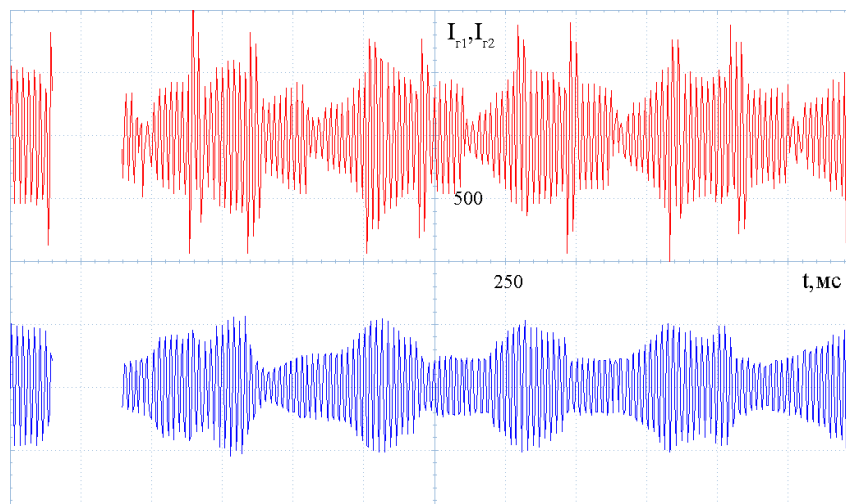


Рис. А.18. Токи параллельно работающих генераторов при работающих гребных двигателях (режим 8)

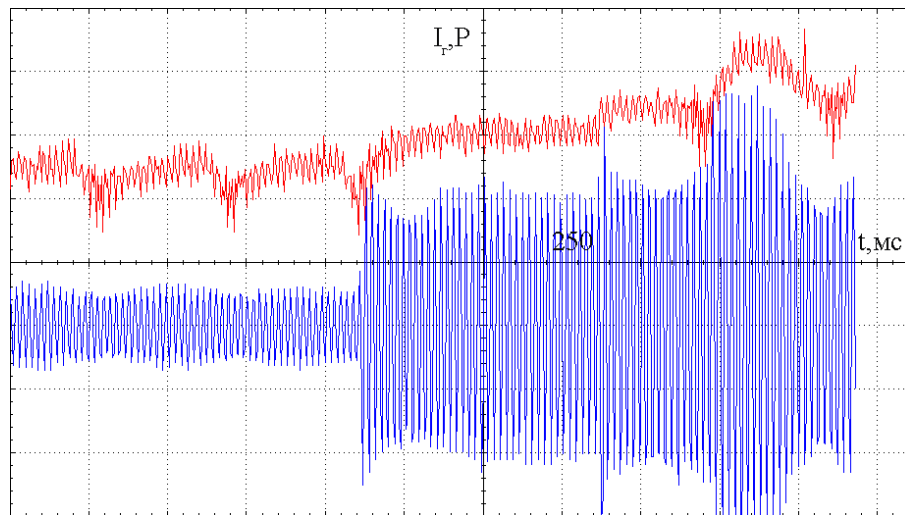


Рис. А.19. Ток и активная мощность одного из параллельно работающих генераторов (наброс нагрузки)

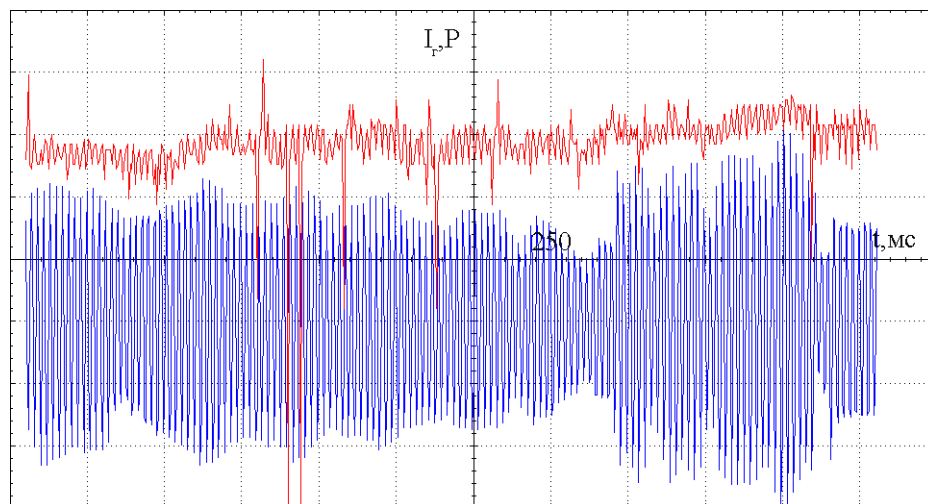


Рис. А.20. Ток и активная мощность одного из параллельно работающих генераторов (работает подруливающее устройство)

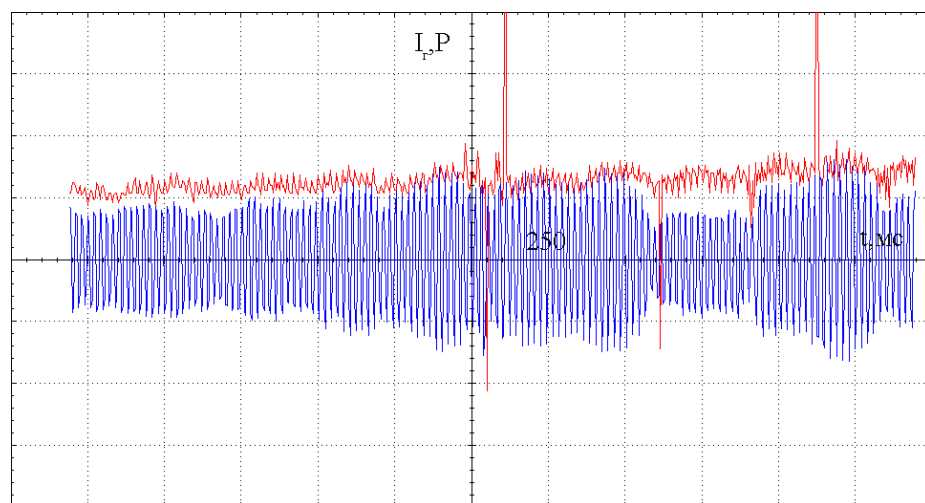


Рис. А.21. Ток и активная мощность одного из параллельно работающих генераторов

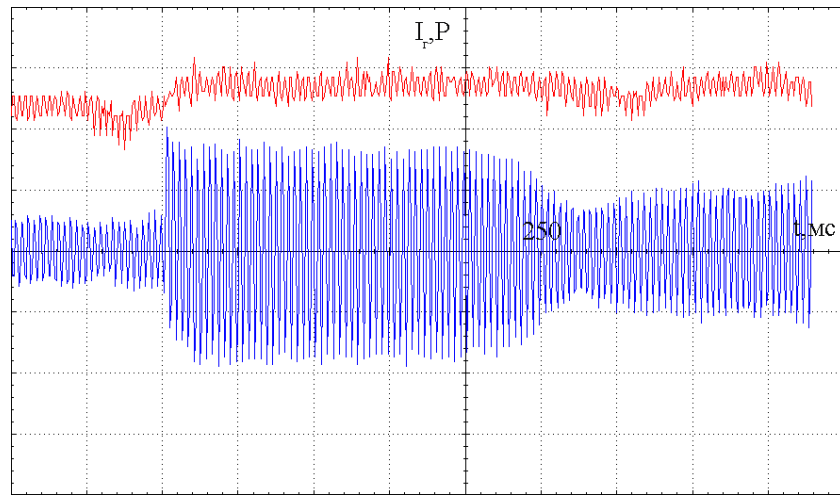


Рис. А.22. Ток и активная мощность одного из параллельно работающих генераторов (пуск вентиляторов)

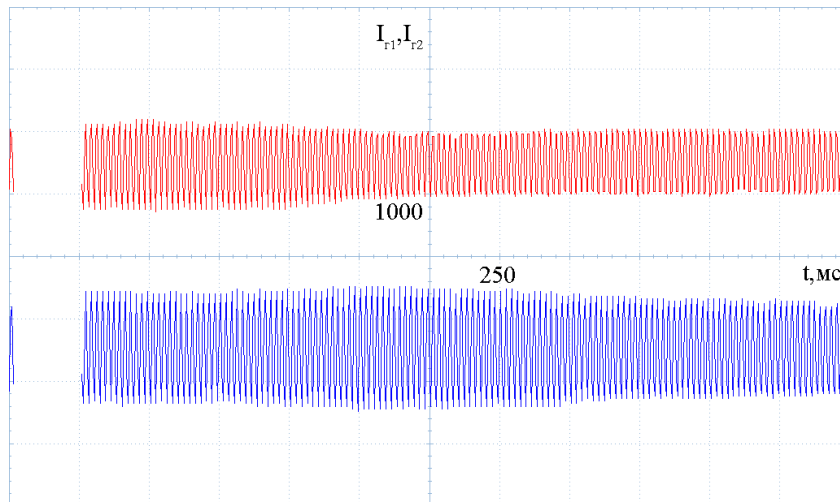


Рис. А.23. Токи параллельно работающих генераторов.
Работают два генератора (режим 2)

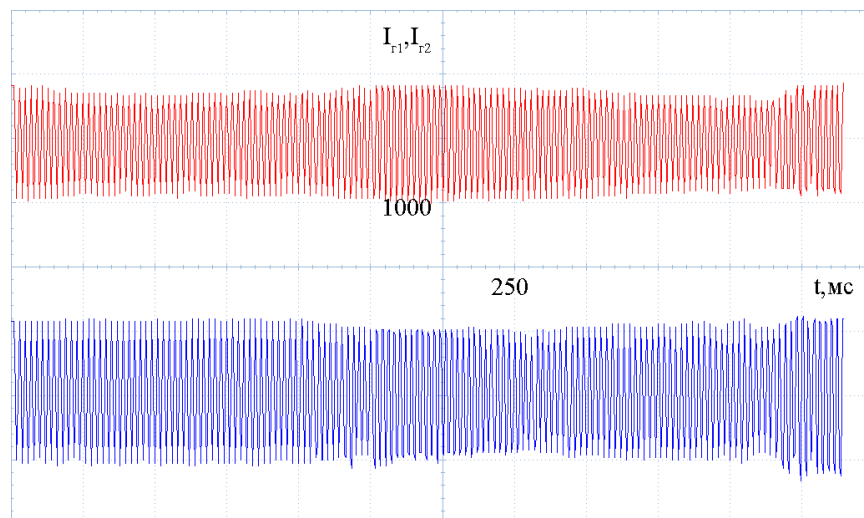


Рис. А.24. Токи параллельно работающих генераторов.
Работают два генератора (режим 3)

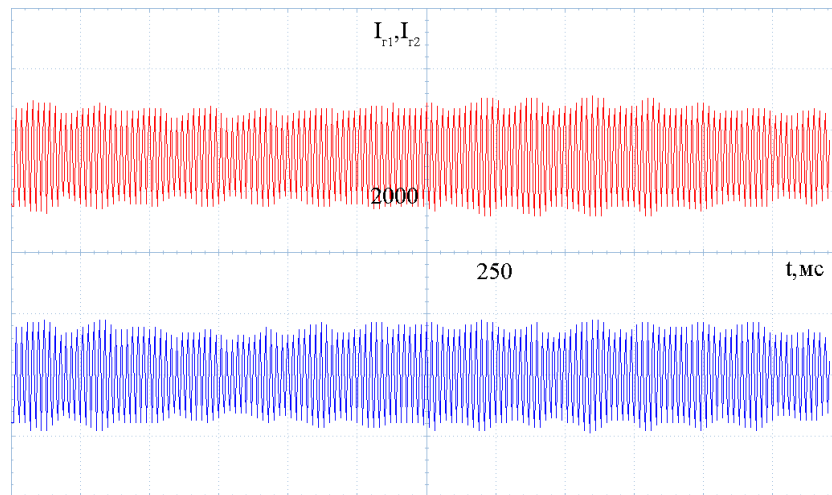


Рис. А.25. Токи параллельно работающих генераторов.

Работают два генератора (режим 4)

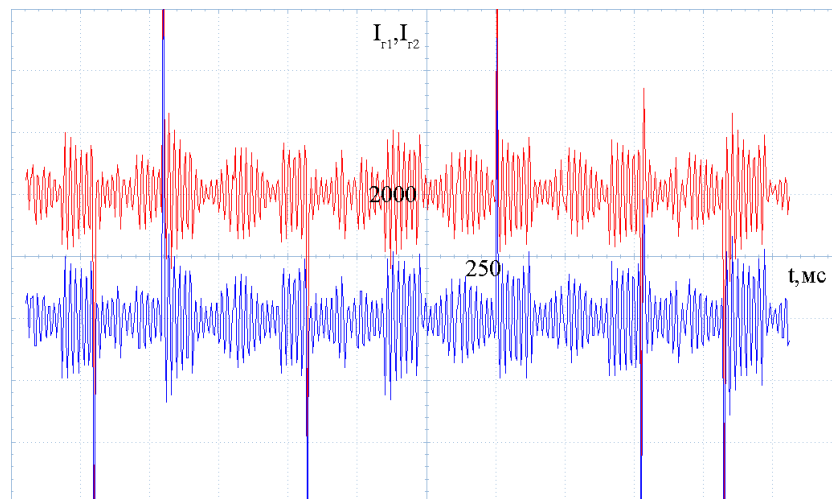


Рис. А.26. Токи параллельно работающих генераторов.

Работают два генератора, нагрузка по 110 кВт

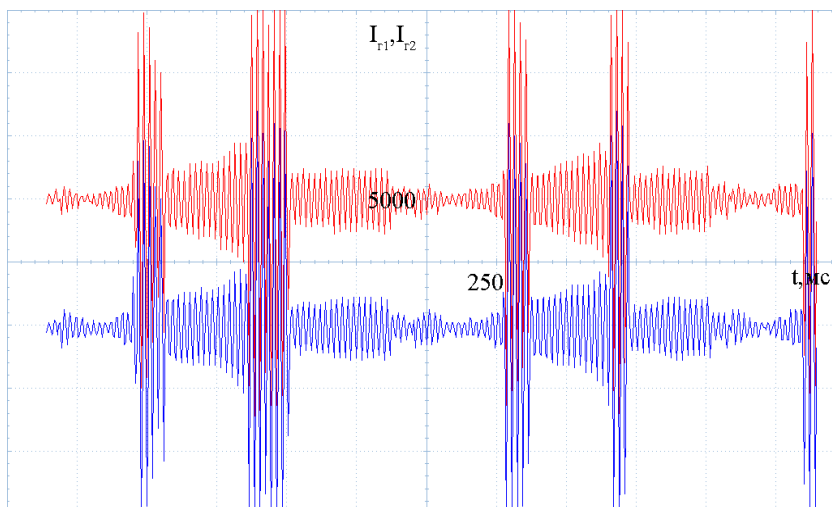


Рис. А.27. Токи параллельно работающих генераторов.

Работают два генератора (режим 5)

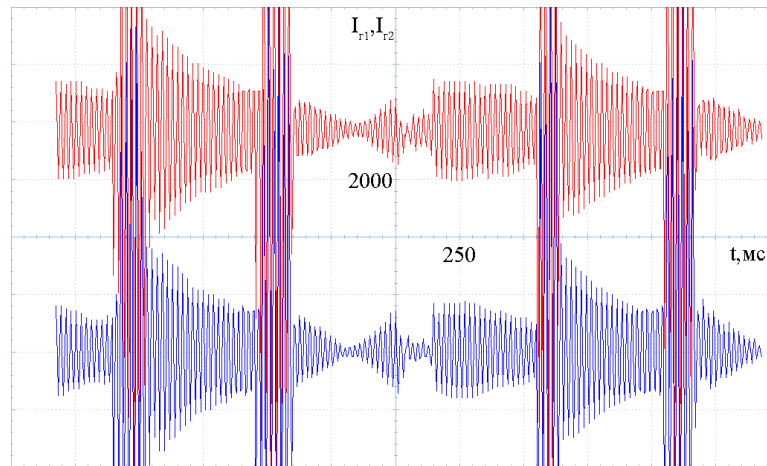


Рис. А.28. Токи параллельно работающих генераторов.

Работают три генератора, нагрузка по 200 кВт

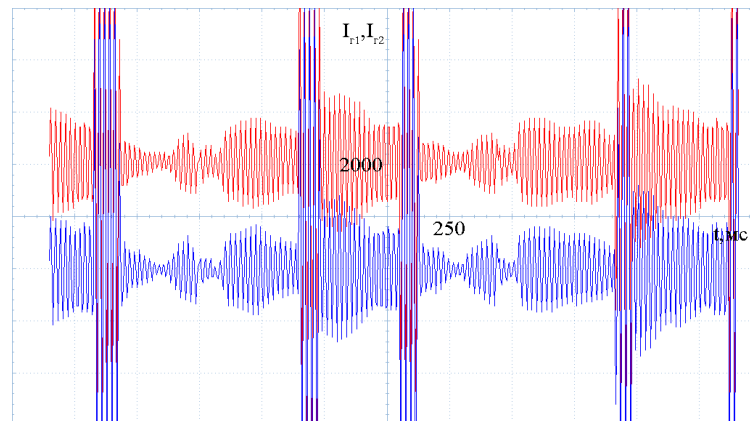


Рис. А.29. Токи параллельно работающих генераторов.

Работают три генератора, нагрузка по 200 кВт

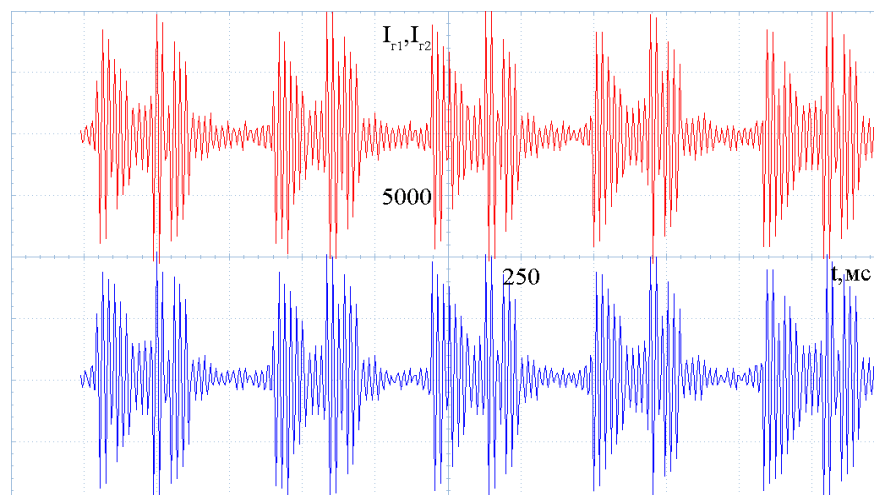


Рис. А.30. Токи параллельно работающих генераторов.

Работают три генератора, нагрузка по 600 кВт

Приложение В. Расчет параметров генератора типа S450MG

В связи с тем, что экспериментальные исследования проведены на автомобильном пароме “Ейск”, электростанция которого имеет три генератора типа S450MG, определим параметры уравнений, описывающих синхронный генератор этого типа.

Из технических условий синхронного генератора типа S450MG имеем:
 $p_H=750 \text{ кВА}, 600 \text{ кВт}, u_H=400 \text{ В}, I_H=1100 \text{ А}, n=1000 \text{ об/мин}; 2p=3;$

$$r = 0,0027 \text{ Ом},$$

$$r_f=0,177 \text{ Ом},$$

$$x_s=0,075 \text{ о. е.},$$

$$x_d=1,123 \text{ о. е.},$$

$$x_q=0,651 \text{ о. е.},$$

$$x'_d=0,188 \text{ о. е.},$$

$$x''_d=0,133 \text{ о. е.},$$

$$x''_q=0,176 \text{ о. е.},$$

$$T_{d0}=2,28 \text{ с},$$

$$T'_d = 0,382 \text{ с},$$

$$T''_d = 0,06 \text{ с},$$

$$T_a=0,054 \text{ с}.$$

1) базисные величины:

$$U_{\delta a3} = U_H \sqrt{\frac{2}{3}}, \quad I_{\delta a3} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{P_H}{\sqrt{3} U_H \cos \varphi_H}, \quad z_{\delta a3} = \frac{U_{\delta a3}}{I_{\delta a3}},$$

$$U_{\delta a3} = U_H \sqrt{\frac{2}{3}} = 326,6$$

$$I_{\delta a3} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{P_H}{\sqrt{3} U_H \cos \varphi_H} = 883,9$$

$$z_{\delta a3} = \frac{U_{\delta a3}}{I_{\delta a3}} = 0,37$$

2) сопротивления взаимной индукции по осям d и q:

$$x_{ad} = x_d - x_s = 1,1048, \quad x_{aq} = x_q - x_s = 0,576;$$

3) индуктивные сопротивления демпферной обмотки по оси d:

$$x_{\sigma dd} = \frac{1}{\frac{1}{x_d'' - x_s} - \frac{1}{x_d' - x_s}} = 0,12, \quad x_{dd} = x_{\sigma dd} + x_{ad} = 1,225,$$

4) индуктивные сопротивлений обмотки возбуждения:

$$x_f = \frac{x_{ad}^2}{x_d - x_d'} = 1,3, \quad x_{\sigma f} = x_f - x_{ad} = 0,195,$$

5) индуктивные сопротивления демпферной обмотки по оси q:

$$x_{\sigma dq} = \frac{x_{aq}(x_q'' - x_s)}{x_q - x_q'} = 0,123, \quad x_{dq} = x_{\sigma dq} + x_{aq} = 0,699,$$

6) активные сопротивления обмоток ротора

$$r_{dd} = \left[x_{\sigma dd} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma f}} + \frac{1}{x_s}} \right] \cdot \frac{1}{\omega_c T_d''} = 0,04, \quad \text{где } \omega_c = 314,$$

$$r_f = \frac{x_f x_d'}{\omega_c T_d' x_d} = 0,0018, \quad r_{dq} = 0,75 \cdot r_{dd} = 0,03, \quad r_s^{(o.e.)} = \frac{r_s^{(Om)}}{Z_{\delta az}} = 0,0073,$$

7) коэффициенты трансформации для сопротивления и тока СГ:

$$k_z = \frac{r_f^{(o.e.)} Z_{\delta az}}{r_f^{(Om)}} = 0,0038, \quad k_i = \sqrt{\frac{3}{2}} k_z = 0,075$$

и ток обмотки возбуждения, приведенный к обмотке статора и выраженный в

относительных единицах: $I_f = \frac{\sqrt{2}}{x_{ad}} = 1,28$

Таким образом, с учетом возможного скольжения система уравнений с численными значениями коэффициентов для работающей в системе ограниченной мощности синхронной машины S450MG имеет следующий вид:

$$\begin{cases} p\Psi_d = -u_d + (1+s)\Psi_q - 0,0073 i_d, \\ p\Psi_q = -u_q - (1+s)\Psi_d - 0,0073i_q, \\ p\Psi_f = u_f - 0,0018i_f, \\ p\Psi_{\mathcal{A}d} = -0,04i_{\mathcal{A}d}, \\ p\Psi_{\mathcal{A}q} = -0.03i_{\mathcal{A}q}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Psi_d = 1,123i_d + 1,1048i_f + 1,1048i_{\mathcal{A}d}, \\ \Psi_q = 0,651i_q + 0,576i_{\mathcal{A}q} \\ \Psi_f = 1,1048i_d + 1,3i_f + 1,1048i_{\mathcal{A}d}, \\ \Psi_{\mathcal{A}d} = 1,1048i_d + 1,1048i_f + 1,225i_{\mathcal{A}d}, \\ \Psi_{\mathcal{A}q} = 0,576i_q + 0,699i_{\mathcal{A}q} \end{cases}$$

Приложение С. Расчет момента инерции ДГА паром "Ейск"

Рассмотрим определение момента инерции приводного дизеля и ротора дизель-генераторных агрегатов автомобильного паром "Ейск".

Момент инерции дизель-генераторного агрегата складывается из момента инерции дизеля J и ротора генератора

$$J_m = iJ_{\text{кшм}} + J_m + J_p,$$

где $J_{\text{кшм}}$, J_m приведенные моменты инерции одного КШМ и маховика, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; $i = 6$ – количество цилиндров.

Момент инерции $J_{\text{кшм}}$, $\text{кг}\cdot\text{м}$, может быть оценен по эмпирической формуле Терских В. П. [26]:

$$J_{\text{кшм}} = \frac{1,25 \cdot 10^4 R^3 D \sqrt{b}}{1,4 D \sqrt{b} + R} (k D \sqrt{b} + H d),$$

где $D = 0,2$ м, $d = 0,1495$ м – диаметры цилиндра и шейки коленчатого вала; $H = 0,32$ м – расстояние между цилиндрами; $b = 1$ – число полостей, приходящихся на одно колено; $R = 0,26$ м – радиус кривошипа коленчатого вала;

$k = 0,25L + 0,6D\sqrt{b}$ – для чугунных поршней;

$k = 0,38L - 0,17D\sqrt{b}$ – для поршней из алюминиевых сплавов,

где $L = 0,535$ м – длина шатуна.

$$k = 0,25 \cdot 0,535 + 0,6 \cdot 0,2 \sqrt{1} = 0,25375 = 0,25$$

$$J_{\text{кшм}} = \frac{1,25 \cdot 10^4 \cdot 0,26^3 \cdot 0,2 \cdot \sqrt{1}}{1,4 \cdot 0,2 \cdot \sqrt{1} + 0,26} \cdot (0,25 \cdot 0,2 \sqrt{1} + 0,32 \cdot 0,1495) = 3,06$$

Моменты инерции маховика дизеля J_m и ротора генератора оценим приближенно $J_m = \frac{1}{2} M R_m^2 = \frac{1}{2} \cdot 525 \cdot 0,92^2 = 222,18$ ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$),

$$J_p = \frac{1}{2} M R_p^2 = \frac{1}{2} \cdot 1500 \cdot 0,34^2 = 86,7$$
 ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$).

Таким образом $J_m = 6 \cdot 3,06 + 222,18 + 86,7 = 327,24$ ($\text{кг}\cdot\text{м}^2$).

Приложение D. Результаты математического моделирования

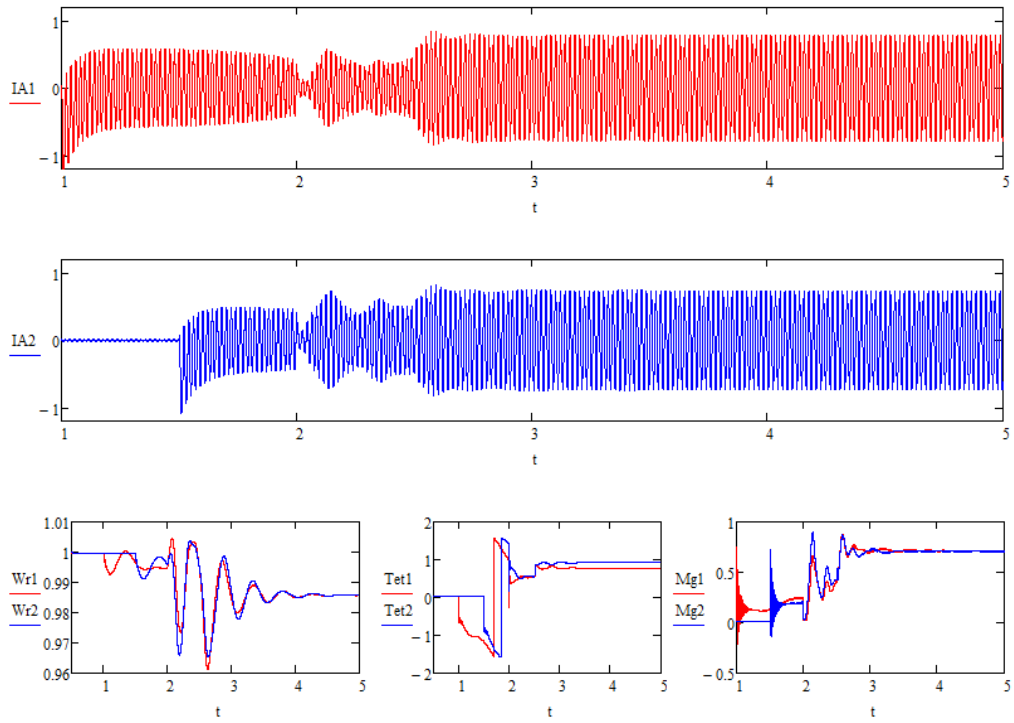


Рис. D.1. Результаты моделирования $D_{n1}=0$, $D_{n2}=0$, $K_{\omega1}=50$, $K_{\omega2}=50$, $\omega_{r01}=1$, $\omega_{r02}=1$. Конструктивные параметры ДГ 2 на 15% превышают параметры ДГ 1

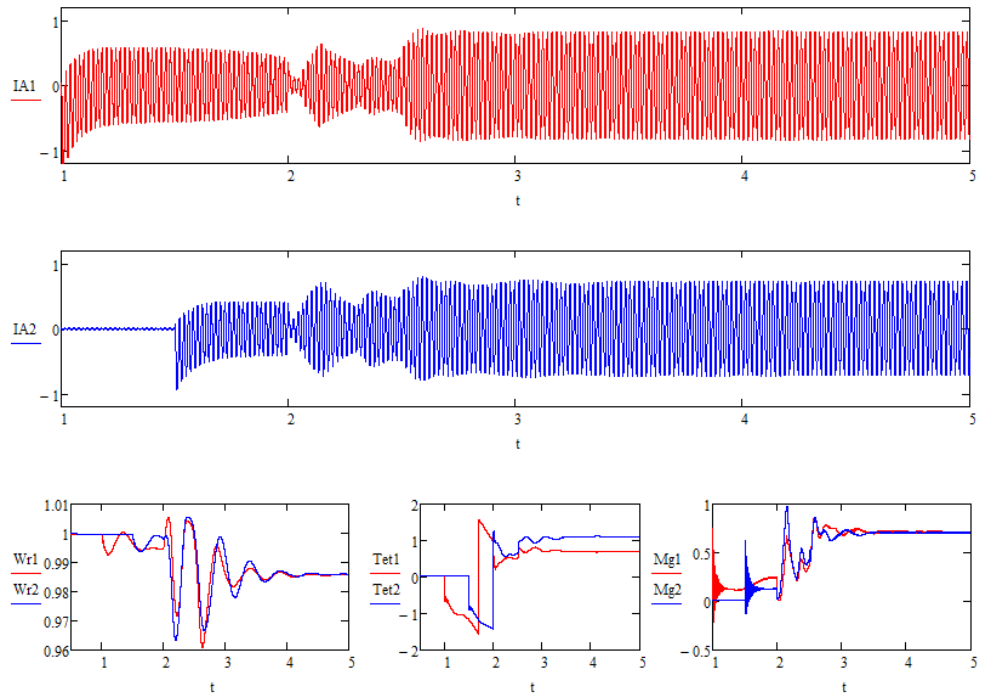


Рис. D.2. Результаты моделирования $D_{n1}=0$, $D_{n2}=0$, $K_{\omega1}=50$, $K_{\omega2}=50$, $\omega_{r01}=1$, $\omega_{r02}=1$. Конструктивные параметры ДГ 2 на 35% превышают параметры ДГ 1

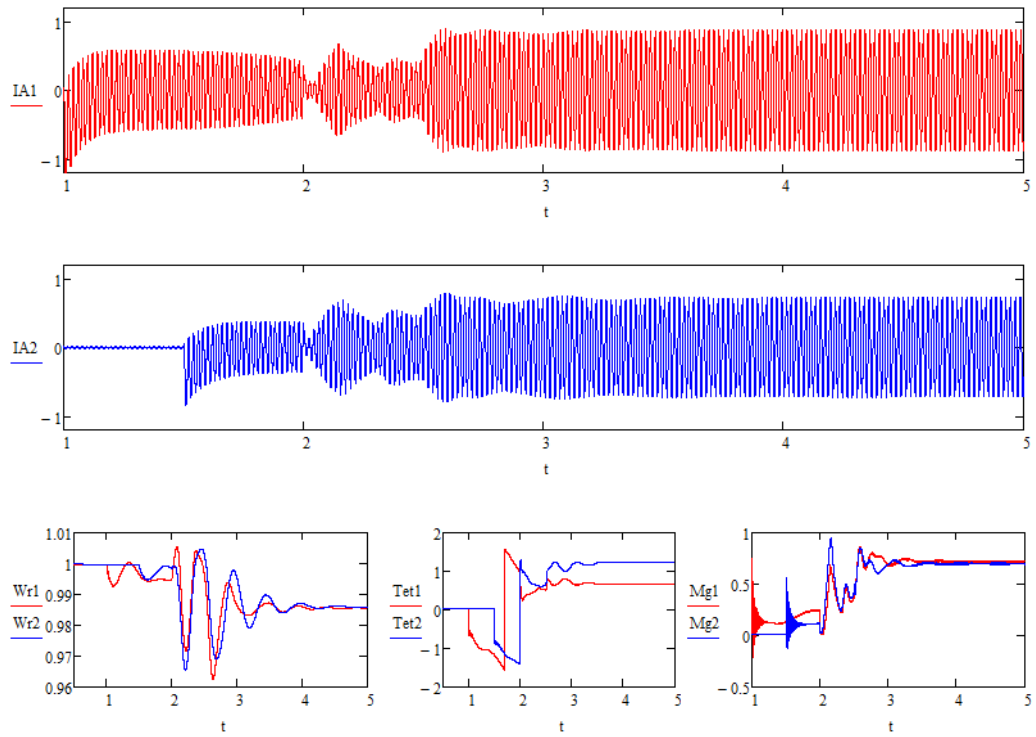


Рис. D.3. Результаты моделирования $D_{n1}=0$, $D_{n2}=0$, $K_{\omega1}=50$, $K_{\omega2}=50$, $\omega_{r01}=1$, $\omega_{r02}=1$. Конструктивные параметры ДГ 2 на 50% превышают параметры ДГ 1

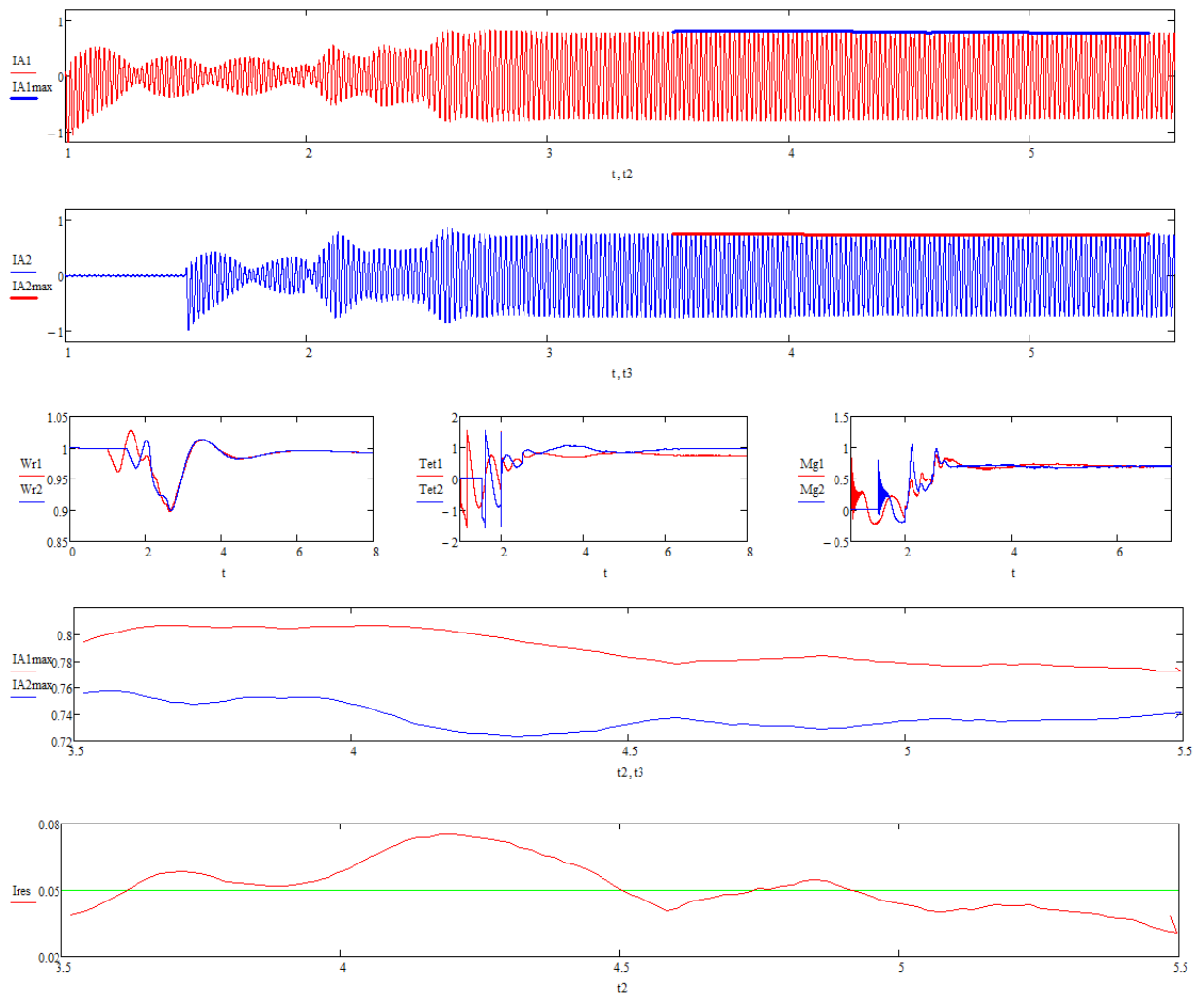


Рис. D.4. Результаты работы УОКМ, начальные условия

$D_{n1}=0,002$, $D_{n2}=0,01$, $K_{\omega 1}=50$, $K_{\omega 2}=50$, $\omega_{r01}=1$, $\omega_{r02}=1$. Конструктивные параметры ДГ 2 на 15% превышают параметры ДГ 1

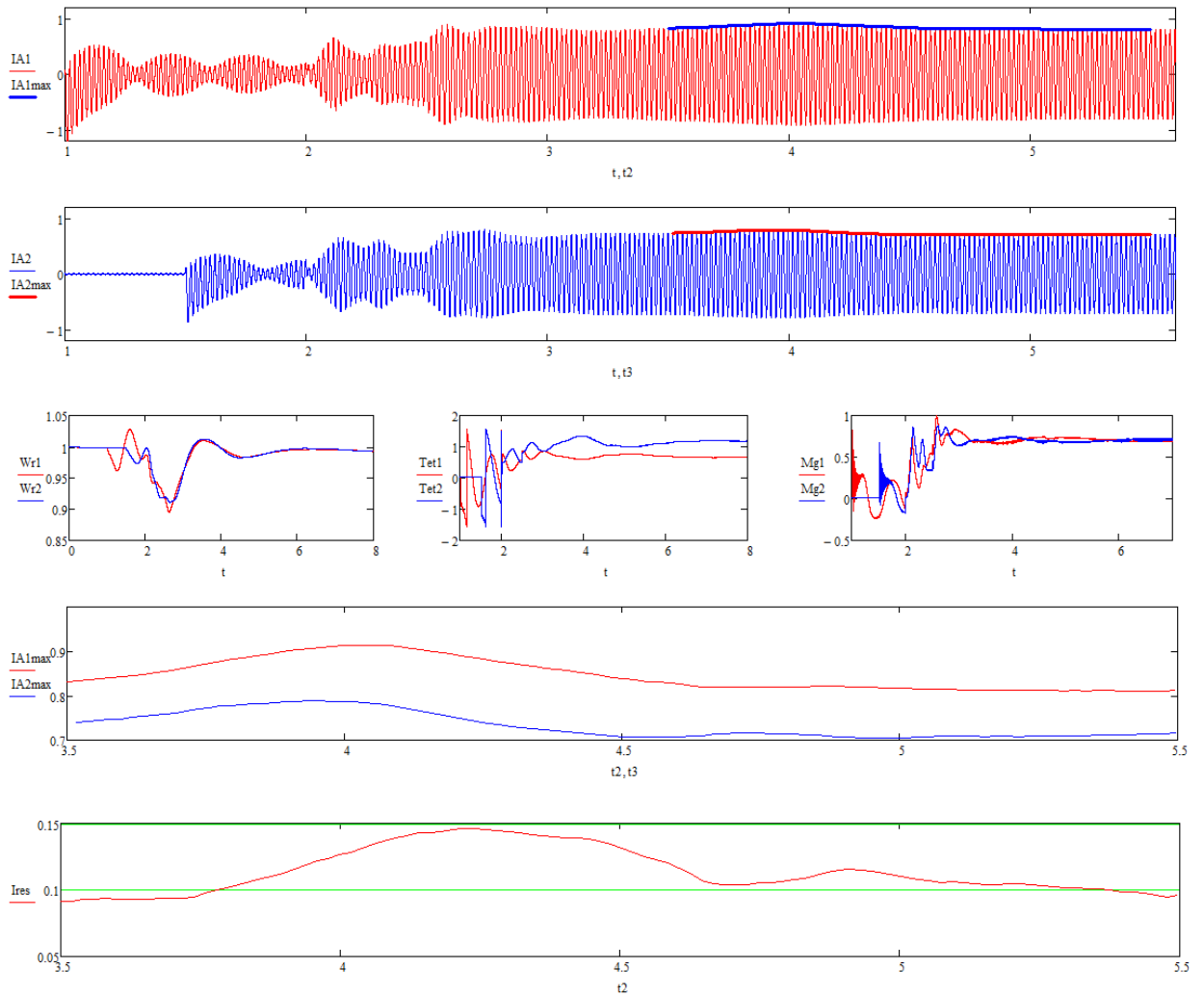


Рис. D.5. Результаты работы УОКМ, начальные условия $D_{n1}=0,002$, $D_{n2}=0,01$, $K_{\omega 1}=50$, $K_{\omega 2}=50$, $\omega_{r01}=1$, $\omega_{r02}=1$. Конструктивные параметры ДГ 2 на 35% превышают параметры ДГ 1

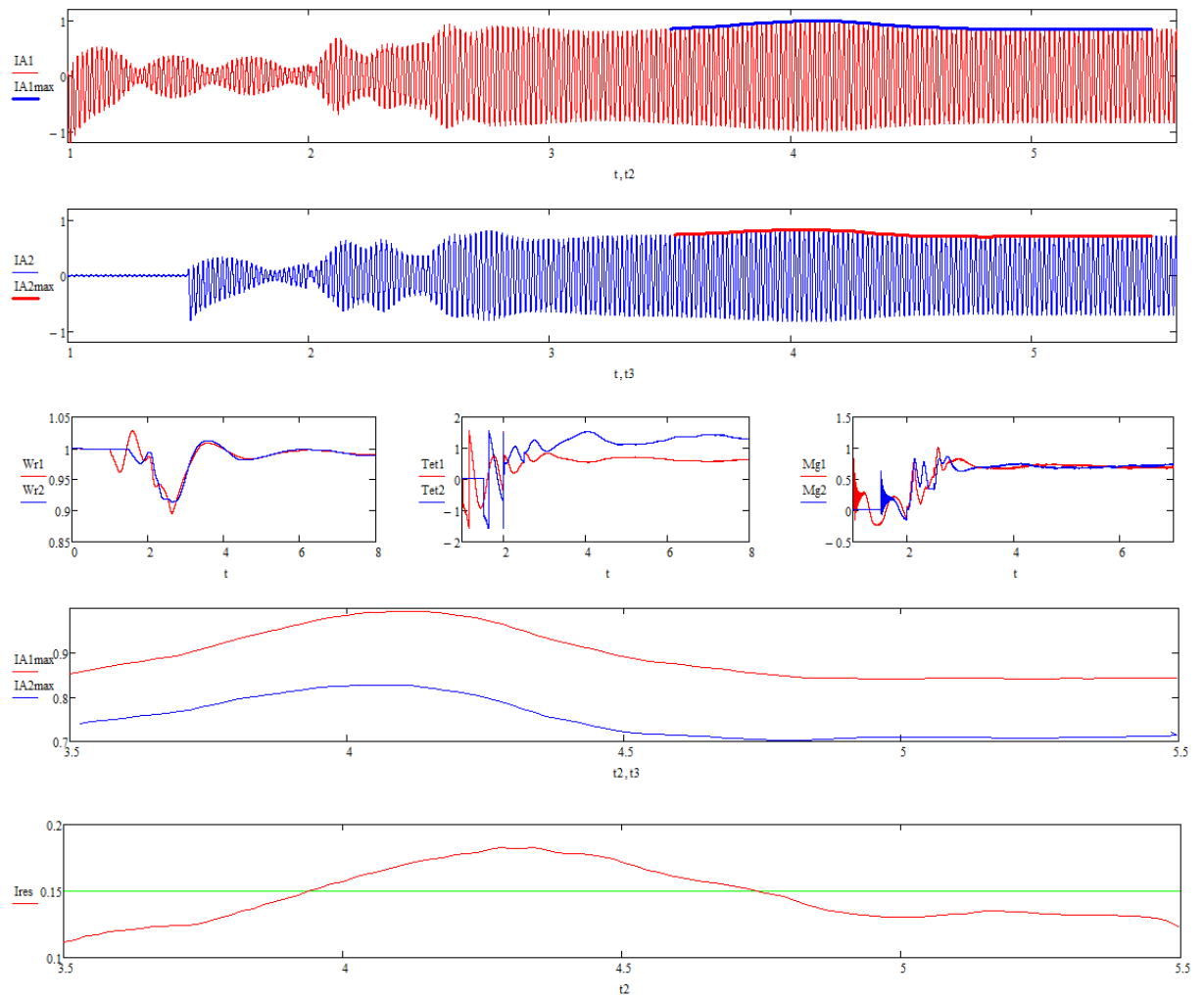


Рис. D.6. Результаты работы УОКМ, начальные условия $D_{n1}=0,002$, $D_{n2}=0,01$, $K_{\omega 1}=50$, $K_{\omega 2}=50$, $\omega_{r01}=1$, $\omega_{r02}=1$. Конструктивные параметры ДГ 2 на 50% превышают параметры ДГ 1

Приложение Е. Паспортные данные т/х «Ейск»

СВЕДЕНИЯ О СУДНЕ	
Название судна	ЕЙСК
Флаг	РФ
Порт приписки	Керчь
Находилось под надзором (предыдущее КО)	Российский Морской Регистр судоходства
Класс предыдущего КО	КМ ⚓ УЛ 1 III пассажирское накатное
Номер IMO	8725565
Радиопозывной сигнал	ENOTA
Тип и назначение	накатное / пассажирское бесконечное
Номер проекта	10380
Строительный номер	5
Год и место постройки	1988, г. Рига
Дата закладки киля	28. 05. 1987
Регистровый номер РУ	1-050187
Класс РУ	КМ ⚓ УЛ 1 III пассажирское накатное
Судовладелец (оператор)	ГСК «Керченская паромная переправа»
Владелец судна (собственник)	ГСК «Керченская паромная переправа»
ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
Длина наибольшая, м	49,92
Длина по пр. III/3.10 СОЛАС	46,11
Ширина наибольшая на миделе, м*	12,80
Осадка порожнем, м	2,40
Валовая вместимость	1028
Чистая вместимость	308
Пассажировместимость, чел*	120
Экипаж, чел	9
Высота борта, м	4,80
Надводный борт, мм	1709
Дедвейт, т	254
Водоизмещение полное, т	1031

ЯКОРНОЕ СНАБЖЕНИЕ	
К-во якорей	2
Тип якоря	Холла
Масса якоря, кг	900
Тип якорной цепи	Эл.сварная
Категория цепи	1
Калибр цепи, мм.	28
Длина цепи, м.	125
КОРПУС	
Материал корпуса	Сталь
Количество поперечных переборок	6
Система набора	Поперечная
МЕХАНИЗМЫ	
Тип главной двигательной установки (ГДУ)	ДВС
Количество главных двигателей (ГД), шт.	3
Марки ГД	6 VD 26/20AL-2
Год и место постройки ГД	1987, г. Магдебург
Мощность каждого ГД, кВт	662
К-во приводных двигателей электростанции, шт	4
Марки главных приводных двигателей электростанции	6 VD 26/20AL-2
Марка стояночного приводного двигателя электростанции	4 NVD 26-2
Год и место постройки приводных двигателей	1987, г. Магдебург
Мощность каждого приводного двигателя, кВт	3x662, 100
К-во приводных двигателей аварий. эл. станции (АЭ)	1
Марки приводных двигателей АЭ	4Ч 10,5/13
Год и место постройки приводных двигателей АЭ	1987, г. Токмак
Мощность каждого приводного двигателя АЭ, кВт	29,2
ДВИЖИТЕЛИ	
Количество	2
Тип	ВФШ

ПОДРУЛИВАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО	
Место расположения	Нос
Количество	1
РУЛЕВОЕ УСТРОЙСТВО	
К-во рулевых машин, шт	1
Типы рулевых машин	Эл. гидравл.
Марки рулевых машин	Р 11
ЯКОРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ	
Место расположения	Нос, левый борт, правый борт
Количество	2
Тип якорного механизма	шпиль
Марка якорного механизма	ЯЩ-3
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ	
Электропривод главной двигательной установки	
Количество генераторов	3
Марки генераторов	SS EE569-6V
Год и место постройки генераторов	1987, г. Дессау
Мощность каждого генератора, кВт	600
К-во гребных электродвигателей	2
Марки гребных электродвигателей	МП2-М-630-152-8М3
Год и место постройки гребных электродвигателей	1987, г. Ленинград
Мощность каждого гребного эл. двигателя, кВт	710
Электростанция судна	
Количество генераторов электростанции	4
Марки генераторов электростанции судна	SS EE569-6V, S 375 S8
Год и место постройки генераторов	1987, г. Дессау
Мощность каждого генератора, кВт	600, 88
Количество генераторов аварийной электростанции (АЭ)	1
Марки генераторов АЭ	MCC 82-4
Год и место постройки генераторов АЭ	1987, г. Токмак
Мощность каждого генератора АЭ, кВт	30
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ	
От главных дизель-генераторов также осуществляется отбор электроэнергии для питания судовых потребителей.	

**Республиканский комитет Республики Крым по транспорту и связи
Филиал Государственного унитарного предприятия Республики Крым
«Крымские морские порты» «Керченская паромная переправа»**

298307, Республика Крым, г.Керчь; ул. Целимберная, 16. Тел. (06561) 6-95-13, 6-95-07, Факс (06561) 6-95-04
e-mail: pereprava_inform@mail.ru

24/244 от 05.11 2014 г.

СОГЛАСОВАНО:
Начальник Керченского участка ООО
«Югрематоматика»
И.В. Анищенко
« » 2014 г.

УТВЕРЖДАЮ:
Главный инженер
филиала государственного унитарного
предприятия Республики Крым
«Крымские морские порты»
«Керченская паромная переправа»
В.А. Акименко
2014 г.

Акт

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Савенко Александра Евгеньевича

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Савенко А.Е. внедрены в производственную деятельность филиала государственного унитарного предприятия Республики Крым «Крымские морские порты» «Керченская паромная переправа»

В мае 2013 г. при ремонте автомобильного паромов «Ейск» на класс Регистра специалистами Керченского участка ООО «Югрематоматика» с целью совершенствования процесса оптимизации режимов работы электроэнергетической системы использованы и внедрены результаты научных исследований:

- осциллограммы экспериментальных исследований существующих недостатков электрической энергии при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов паромов «Ейск», приводящих к систематическому существованию обменных и синфазных колебаний мощности во всех режимах работы,
- устранение явления «люфта» с зонами нечувствительности во всех элементах системы регулирования частоты вращения дизелей генераторных агрегатов, являющегося основной причиной возникновения и существования обменных колебаний мощности,
- алгоритм совместной работы контуров регулирования частоты вращения дизелей, который характеризуется минимально возможными для данных эксплуатационных условий потерями.

Эти результаты получены в диссертационной работе Савенко Александра Евгеньевича, которая посвящена разработке и исследованию методов и средств устранения обменных колебаний мощности в судовых электротехнических комплексах.

Данные об экономичном режиме, как об эталонном, к которому необходимо приближать текущие режимы электроэнергетической системы, позволяют определиться с наиболее рациональными методами уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности во время параллельной работы судовых генераторных агрегатов и повысить ее эффективность за счет учета физических особенностей системы. Ожидается, что дополнение системы управления судовым электротехническим комплексом адаптивным самонастраивающимся блоком устраняющим обменные колебания мощности, работающим по предложенному алгоритму, с учетом стойких закономерностей между параметрами режима судовой электроэнергетической системы, позволит повысить эффективность использования систем регулирования частоты и распределения мощностей, источников электроэнергии, повысить безопасность мореплавания и дополнительно снизить потери энергии в пределах энергосистемы на 0,6-0,8%.

Старший электромеханик т/х «Ейск»

Старший механик т/х «Ейск»

Инженер-наладчик

И.Г. Белокуров

А.Б. Вихарев

А.С. Боровский



ООО «ТИС - КРЫМ»

«Комплекс морской железнодорожной паромной переправы»
в порту Крым

Юридический адрес: 298320, Республика Крым, г. Керчь, ул. Марата, 9 оф. 108;
Фактический адрес: 298307, Республика Крым, г. Керчь, ул. Красная, 45
ОГРН 1149102084020

Тел. +38(06561) 697-32, 697-33
Факс (06561) 697-33.

www.tis-krim.com
e-mail: tis-krim.@tis-krim.com

Исх.от № 10-311 от 31.03. 2015г

УТВЕРЖДАЮ:
Директор ООО «ТИС-Крым»
С.П. Ходько
«31» марта 2015г

Акт

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Савенко Александра Евгеньевича

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Савенко А.Е. внедрены в производственную деятельность ООО «ТИС-Крым».

Предложенные Савенко А.Е. методы и алгоритмы управления параллельной работой судовых дизель-генераторных агрегатов позволяют улучшить качество электроэнергии, вырабатываемой на судах, повысить экономическую эффективность их эксплуатации и безопасность мореплавания. Указанные результаты достигаются за счет уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности в судовых электроэнергетических системах. Компьютерные программы и разработанный критерий позволяют определить допустимый уровень обменных колебаний мощности. Большое значение имеют осциллограммы экспериментальных исследований, наглядно демонстрирующие проблемы судовой электроэнергетической системы в различных режимах ее работы.

Результаты получены в диссертационной работе Савенко Александра Евгеньевича, которая посвящена разработке и исследованию методов и средств устранения обменных колебаний мощности в судовых электротехнических комплексах.

Главный энергетик

Старший механик

Г.Н. Вахницкий

Ю.К. Самсонов

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КЕРЧЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КГМУ»)

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«KERCH STATE MARITIME TECHNOLOGICAL UNIVERSITY»

ул. Орджоникидзе, 82, г. Керчь, Республика Крым, 298309, тел./факс (06561) 6-35-85, e-mail: kmti@aironet.com.ua
 ОГРН 1159102037940 ИНН 9111013097

30.03.2015 № 204

На _____ от _____



УТВЕРЖДАЮ:
 учебной работе

С.П. Голиков
 2015 г.

Акт

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы Савенко Александра Евгеньевича в учебный процесс кафедры "Электрооборудование судов и автоматизация производства" ФГБОУ ВО "Керченский государственный морской технологический университет"

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Савенко А.Е. использованы в учебном процессе кафедры "Электрооборудование судов и автоматизация производства" ФГБОУ ВО "Керченский государственный морской технологический университет" для студентов направления подготовки 13.03.02 "Электроэнергетика и электротехника", специальностей 26.05.07 "Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики", 26.05.06 "Эксплуатация судовых энергетических установок".

Понятие, причины возникновения, проблемы обменных колебаний мощности при параллельной работе, результаты экспериментальных исследований на судне, метод, алгоритм и программы определения оптимального режима работы судовой электроэнергетической системы при параллельной работе синхронных дизель-генераторных агрегатов используются в дисциплинах "Системы управления общесудовыми и энергетическими установками" и "Теория автоматического управления".

Включение результатов исследования в разделы, в которых изучаются методы оптимизации и меры улучшения показателей качества электроэнергии и увеличения ресурса работы оборудования судовой электроэнергетической системы, существенно дополняет знания студентов об оптимальном управлении технологическими процессами на этапах анализа и практической реализации оптимальных решений. Изучение этих материалов ориентирует студентов на достижение реального конечного результата, расширяет их знания об особенностях методов оптимизации и области их применения.

Результаты получены в диссертационной работе Савенко Александра Евгеньевича, которая посвящена разработке и исследованию методов и средств устранения обменных колебаний в судовых электротехнических комплексах.

Декан морского факультета
 кандидат технических наук, доцент

Н.В. Ивановский

Заведующий кафедрой ЭСиАП
 кандидат технических наук, доцент

С.Г. Черный

Заведующий кафедрой СЭУ
 кандидат технических наук, доцент

В.Л. Конюков