



**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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание научной степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Теоретические основы электротехники и электротехнологии» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **ГОЛУБЕВ Александр Николаевич**

Официальные оппоненты:

**ТИТОВ Владимир Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, профессор кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика»

**МЕЩЕРЯКОВ Виктор Николаевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет», заведующий кафедрой «Электропривод»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»**, г.Нижний Новгород

Защита состоится 25 декабря 2015 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, ИГЭУ, Ученый совет. Тел.:(4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01.

E-mail: [uch\\_sovet@ispu.ru](mailto:uch_sovet@ispu.ru).

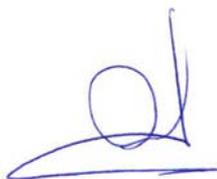
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Диссертация размещена: [http://ispu.ru/files/Dissertaciya\\_Savenko\\_A.E..pdf](http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Savenko_A.E..pdf).

Автореферат диссертации размещён на сайте ИГЭУ [www.ispu.ru](http://www.ispu.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.064.02  
кандидат технических наук



Сидоров Сергей Георгиевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Важная роль в инфраструктуре мировой экономики, в том числе и России, принадлежит морскому флоту. 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.

Организация эффективной параллельной работы генераторов является важным вопросом для любого электротехнического комплекса, но особенно для морского судна при соизмеримости мощностей источников и потребителей. Современные судовые электроэнергетические системы (СЭЭС) имеют большое количество систем автоматики, обеспечивающих параллельную работу судовых дизель-генераторных агрегатов (ДГА). Однако, очень часто возникают аварийные ситуации, связанные с неудовлетворительным качеством параллельной работы источников электроэнергии. Одной из малоизученных проблем параллельной работы ДГА на основе синхронных генераторов переменного тока, которые в основном применяются в судовых электротехнических комплексах, являются обменные колебания мощности.

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. Вишневецкий 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.

Исследования по разработке метода уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности при параллельной работе судовых синхронных генераторов являются актуальными и полезными 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.

тротехнического 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 СЭЭС 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 управления обменными колебаниями мощности;

– рекомендации по определению допустимого уровня колебаний мощности в СЭЭС.

**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 и приложений. Основная часть изложена на 176 страницах машинописного текста. Работа содержит 79 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, определена цель исследований,

представлены ее научная новизна и практическая значимость. Сформулированы основные результаты, выносимые на защиту. Показаны перспективы использования полученных результатов исследований и их развития по теме диссертации.

**В первой главе** рассмотрены особенности эксплуатационных режимов параллельной работы ДГА переменного тока в составе автономных СЭЭС и проведен анализ существующих методов и средств управления работой судовых синхронных генераторов.

Опыт эксплуатации морских судов свидетельствует о том, что даже при идентичности ДГА в составе многогенераторных судовых электротехнических комплексов ограниченной мощности возникают обменные колебания – явление своеобразного перехода мощности от одного ДГ к другому с частотой, измеряемой несколькими герцами. Из-за возникновения обменных колебаний мощности между параллельно работающими ДГА переменного тока имеет место проблема обеспечения устойчивой параллельной работы и требуемого качества электроэнергии.

Большинство известных методов и средств организации параллельной работы ДГА переменного тока в составе СЭЭС не учитывают существование обменных колебаний мощности между агрегатами. В требованиях классификационных обществ, морских Конвенций, международного стандарта ISO 8528 по обеспечению условий параллельной работы содержатся нормы показателей качества электрической энергии, но не регламентированы пределы допустимого уровня обменных колебаний мощности между ДГА при их параллельной работе. Однако практика эксплуатации современных морских судов подтверждает необходимость определения такого критерия и его учета для обеспечения надлежащего качества электрической энергии. На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена экспериментальной части работы, где описана трехгенераторная СЭЭС переменного тока действующего судна-парома “Ейск” Керченской паромной переправы, приведено описание экспериментальных исследований и натурных испытаний, их основные результаты в виде осциллограмм.

Основными потребителями СЭЭС парома “Ейск” (рис. 1) являются гребные

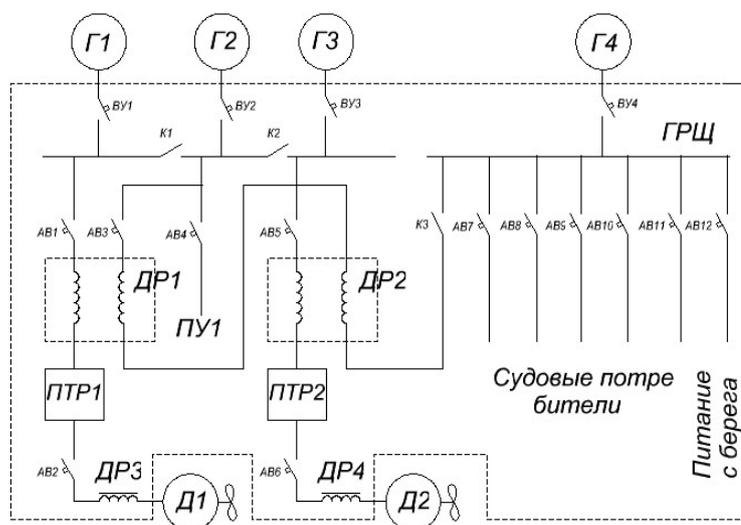


Рис. 1. Структурная схема СЭЭС парома “Ейск”

двигатели постоянного тока (Д1, Д2) типа МП2-М-630-152-8М3, получающие электрическую энергию через тиристорные преобразователи ПТР1, ПТР2. Питание ПТР осуществляется от шин главного распределительного щита (ГРЩ) через сдвоенные реакторы ДР1 и ДР2, ограничивающие нелинейные искажения напряжения от коммутации силовых тиристоров. Питание Д1 и Д2, работающих на винт фиксированного шага с обслуживающими механизмами и оборудованием осуществляется от двух или трех генераторов переменного тока (Г1-Г3) через ПТР1 и ПТР2 и сглаживающие дроссели ДР3 и ДР4. От главных ДГА также осуществляется отбор электроэнергии для питания судовых потребителей. В качестве главных источников электроэнергии приняты три дизель-генератора 6VD26/20-AL-2 с генераторами S450M6 800кВА, 390В, 50Гц,  $\cos \varphi = 0.8$ , 1184А.

Осциллограммы токов, полученные в установившемся режиме работы, т.е. без изменения нагрузки судовой электростанции, имеют ярко выраженные обменные колебания (рис. 2), когда один из параллельно работающих генераторов сбрасывает

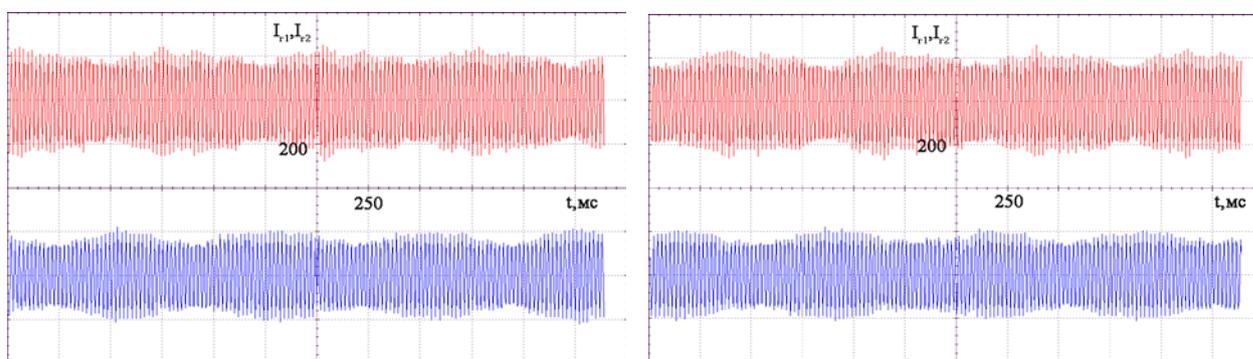


Рис. 2. Токи параллельно работающих генераторов в установившихся режимах

нагрузку, а другой ее принимает. В колебательном процессе максимуму тока одного генератора соответствует минимуму тока другого генератора и наоборот. Во время снятия этих осциллограмм включена судовая нагрузка за исключением гребных двигателей и не производится пусков и остановов каких либо мощных потребителей.

На осциллограммах (рис. 3) зафиксированы процессы запуска подруливающего устройства на основе асинхронного двигателя мощностью 135 кВт. 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

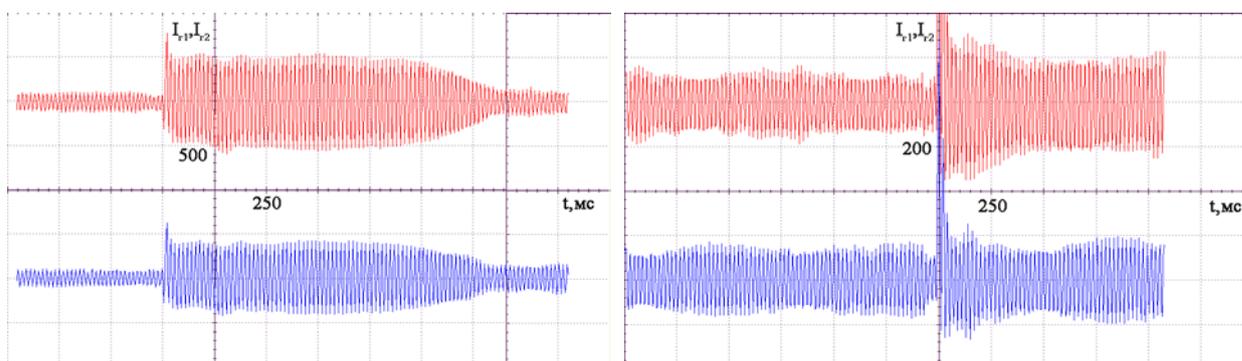


Рис. 3. Токи параллельно работающих генераторов при пуске подруливающего устройства

режимах пуска мощных судовых потребителей.

На осциллограммах токов при работающих гребных двигателях, получающих питание через тиристорные преобразователи (рис. 4), наблюдаются автоколебательные процессы, представляющие из себя синфазные колебания с разными амплитудами и периодами.

Форма этих колебаний также имеет разный характер. Амплитуда колебаний достигает 100 %.

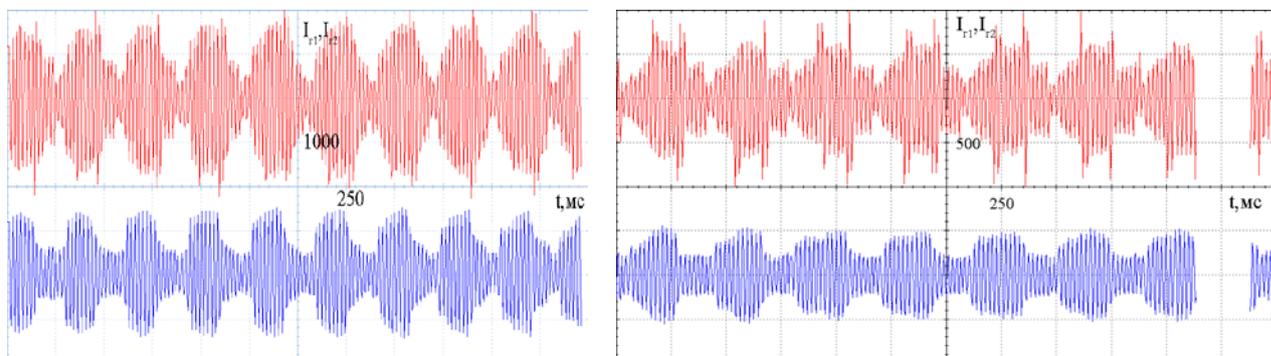


Рис. 4. Токи параллельно работающих генераторов при работающих гребных двигателях

При максимальной развертке (рис. 5) отчетливо видны искажения синусоидальных кривых электрических величин после включения в работу тиристорных преобразователей.

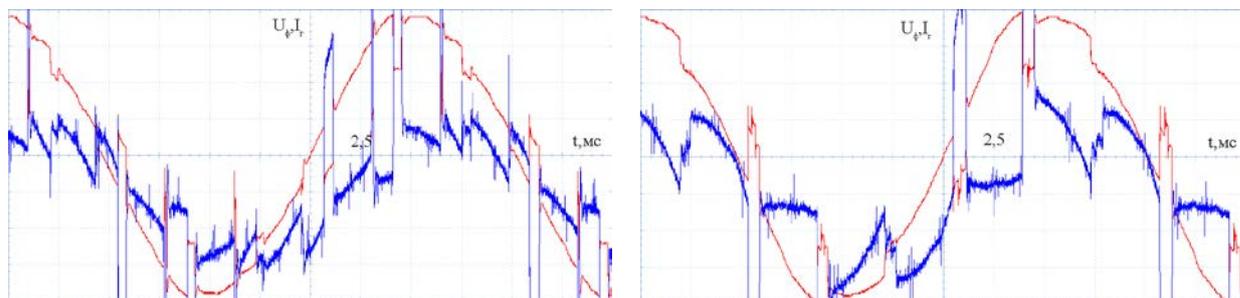


Рис. 5. Параллельная работа ДГ 1 и ДГ 2 на гребные двигатели

Несмотря на заявленные заводом-изготовителем судна максимальные 5% нелинейных искажений, эксперимент показал, что при включении в работу тиристорных преобразователей амплитуда выбросов в отдельных режимах работы достигает 80%.

Осциллограммы тока и активной мощности (рис. 6) одного из параллельно работающих генераторов, зафиксированные в различных режимах: при запуске подруливающего устройства, при его работе, при работе гребных двигателей, - изображенные в одной системе координат, показывают, что эти величины изменяются синфазно.

Этот факт дает право говорить о возникновении обменных колебаний мощности на основании возникновения обменных колебаний токов.

Таким образом, осциллограммы токов двух параллельно работающих генераторов во всех режимах работы судна могут достоверно свидетельствовать о существовании обменных колебаний мощности.

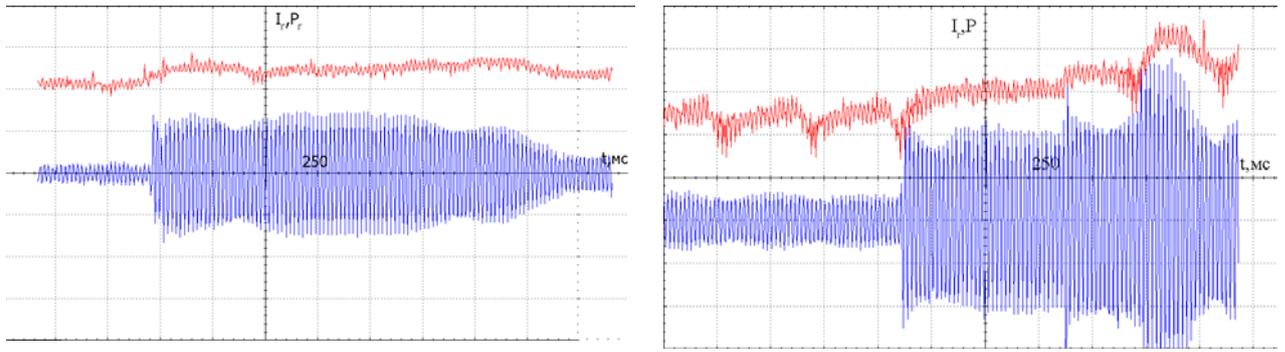


Рис. 6. Осциллограммы тока и активной мощности одного из параллельно работающих генераторов

**Третья глава** посвящена изучению природы обменных колебаний мощности между параллельно работающими ДГА переменного тока, математическому описанию и разработке математической модели двухагрегатной судовой электростанции, которая позволяет получить в виде графиков мгновенные значения моментов  $M_{g1}, M_{g2}$ , токов  $I_{A1}, I_{A2}$ , частот вращения роторов  $\omega_{r1}, \omega_{r2}$ , углов нагрузки  $Tet_1, Tet_2$  параллельно работающих генераторов.

Синхронные генераторы описаны в жестко связанных с ротором  $d$  и  $q$  координатах с помощью уравнений Парка-Горева, отражающих переходные электромагнитные и электромеханические процессы

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

где  $\Psi_d, \Psi_q$  – проекции векторов потокосцеплений 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  $d, q$ ;  $\Psi_f, i_f, u_f, r_f$  – потокосцепление, ток, напряжение и сопротивление обмотки возбуждения;  $p$  – символ дифференцирования.

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

Здесь  $x_s$  – индуктивное сопротивление рассеяния статорной обмотки;  $x_{ad}, x_{aq}$  – индуктивные сопротивления главного контура намагничивания по осям  $d, q$ ;  $x_f$  – индуктивное сопротивление обмотки возбуждения.

Возбудитель бесщеточного синхронного генератора и пропорциональный регулятор напряжения описан следующим дифференциальным уравнением

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

где  $K_f$  – коэффициент передачи регулятора,  $u_m = \sqrt{u_d^2 + u_q^2}$ ;

$U_0$  – задание по напряжению;  $T_B$  – постоянная времени возбудителя.

Приводной двигатель, в качестве которого используется дизель, введен в систему уравнений в упрощенной форме:

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

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

где  $J_m$  – приведенный момент инерции вала дизеля и ротора генератора,  $M_d$  – механический момент дизеля,  $M_g$  – электромагнитный момент сопротивления, развиваемый генератором,  $h$  – положение топливной рейки,  $K_m$  – коэффициент усиления дизеля по частоте вращения.

Регулятор частоты вращения дизеля представлен уравнением

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

где  $T_\omega$  – постоянная времени исполнительного механизма,  $K_\omega$  – коэффициент усиления регулятора,  $\varepsilon$  – сигнал рассогласования между заданной  $\omega_{r0}$  и действительной  $\omega_r$  частотами вращения дизеля (выходной сигнал нелинейного элемента типа «люфт»).

Вследствие того, что контуры управления ДГА обладают нелинейностями типа «люфт», их уравнения введены в выражение регулятора частоты вращения.

В математической модели параллельно включенные синхронные генераторы работают на общую активно-индуктивную нагрузку, что позволяет исследовать природу обменных колебаний мощности, возникающих при параллельной работе генераторов в установившихся режимах.

Для преобразования токов статора синхронных генераторов из системы координат (d, q), жестко связанной с ротором, в неподвижную систему координат ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) введены уравнения связи

$$i_\alpha = i_d \cos \omega_r t - i_q \sin \omega_r t ; i_\beta = i_q \cos \omega_r t + i_d \sin \omega_r t .$$

Исследование характера изменения огибающих токов генераторов показало существование обменных колебаний мощности (рис. 7) между генераторами. Установлено, что их амплитуда зависит от значений зазора, который используется для описания люфтов в механических передачах. На графиках колебаний токов генераторов в установившемся режиме видно соответствие максимума тока одного генератора минимуму тока другого и наоборот. Обменные колебания мощности также видны на графиках моментов и углов нагрузки генератора и скорости вращения роторов.

Результаты моделирования показывают, что разброс конструктивных параметров на 15% однотипных параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов не приводит к возникновению и существованию как обменных, так и синфазных колебаний мощности. Аналогичные результаты получаются при различии параметров на 25%, 35%, 50%. По результатам исследования видно, что разброс параметров приводит к некоторому перераспределению мощностей, однако процессы имеют установившийся характер.

Таким образом, полностью подтверждаются результаты, полученные при экс-

периментальных исследованиях. При  $D_{n1}=0$  и  $D_{n2}=0$  обменные колебания отсутствуют, а при вводе коэффициентов  $D_{n1}=0,002$  и  $D_{n2}=0,02$ , определяющих зазоры, обменные колебания имеют ярко выраженную форму (рис. 7), что подтверждает корректность принятой математической модели и гипотезы о возможных причинах возникновения обменных колебаний.

**В четвертой главе** разработан метод управления параллельной работой судовых синхронных генераторных агрегатов, направленный на устранение обменных и синфазных колебаний мощности. Результат достигается за счет адаптивного изменения жесткости механических характеристик ДГ в зависимости от уровня обменных

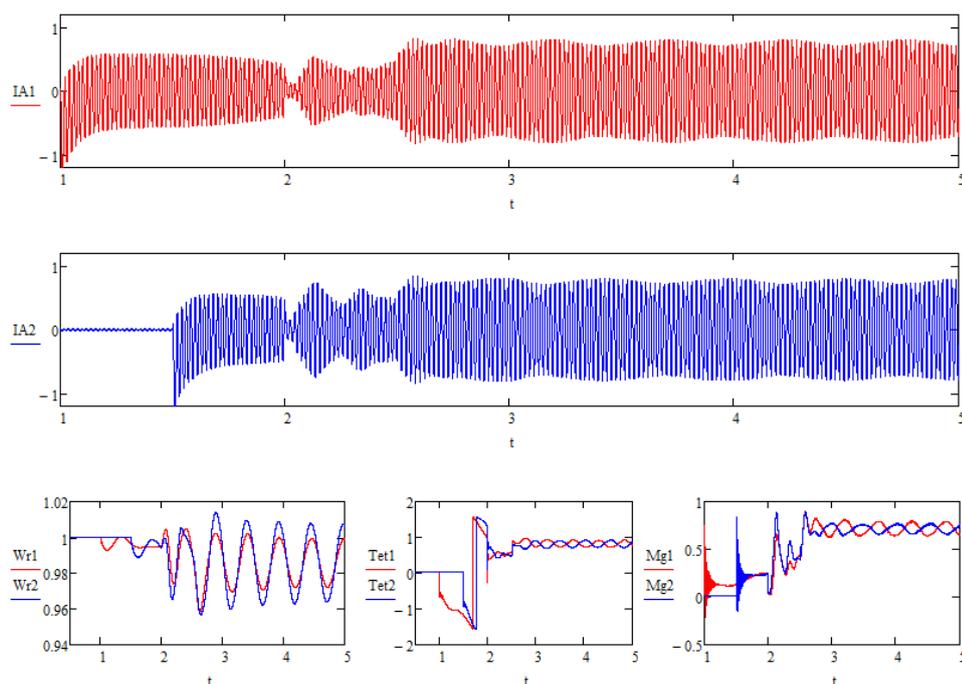


Рис. 7. Результаты моделирования,  $D_{n1}=0,002$ ,  $D_{n2}=0,01$ ,  $K_{\omega 1}=50$ ,  $K_{\omega 2}=50$ ,  $\omega_{r01}=1$ ,  $\omega_{r02}=1$ ,  $D_n$  – значение зазора люфта контура регулирования частоты,  $K_{\omega}$  – коэффициент усиления регулятора частоты,  $\omega_{r0}$  – заданная частота вращения дизеля

колебаний соответствующим изменением коэффициентов усиления их регуляторов частоты вращения.

Приёмники (П) получают электрическую энергию от ГРЩ. На все генераторы (СГ) подводится напряжение возбуждения  $u_f$ , а все дизели (Д) получают топливо с величиной расхода  $h$ . Генераторные агрегаты имеют в своем составе систему автоматического регулирования частоты вращения (АРЧ) и напряжения (АРН). Для реализации разработанного метода уменьшения амплитуды обменных колебаний предложено ввести в структуру автоматического управления электростанции блок УОКМ – устройство обменных колебаний мощности (рис. 8). Это адаптивная система, настроенная на обеспечение минимума критерия обменных колебаний мощности, получающая информацию от всех дизелей и генераторов, работающих в параллельном режиме и, в случае необходимости, осуществляющая автоматическую подстройку коэффициентов передачи и уставок регуляторов по частоте вращения. Необходимость поддержания скорости вращения на номинальном уровне очевидна, так как ее снижение приводит к снижению частоты вырабатываемой элек-

троэнергии, что ухудшает работу судового электрооборудования.

В соответствии с разработанным алгоритмом (рис. 9), после начала работы устанавливаются номинальные значения коэффициентов передачи  $K_\omega$  регуляторов скорости дизелей и уставок задания  $\omega_{r0}$  скоростей вращения дизелей. Затем измеряются параметры, которые используются для определения значения 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. При выявлении превышения амплитуды  $A_{\text{окм}}$  обменных колебаний выше допустимого значения  $A_{\text{доп}}$  блок УОКМ ступенчато с шагом  $\Delta K_\omega$  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 быстродействием,

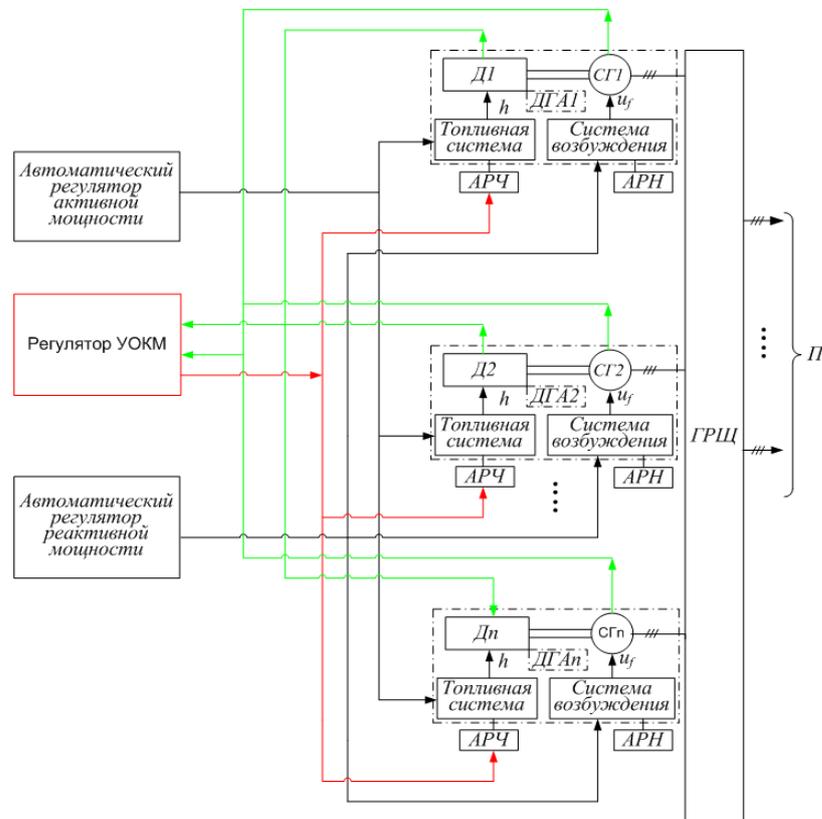


Рис. 8. Новая структура судового электротехнического комплекса

намного превышающим изменение коэффициента ведущего генераторного агрегата. Одновременно контролируются значения частоты вращения  $\omega_r$  роторов генераторов, которые снижаются вследствие смягчения характеристик дизель-генераторных агрегатов. При снижении значений  $\omega_r$  ниже допустимой величины  $\omega_{r\text{дон}}$  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

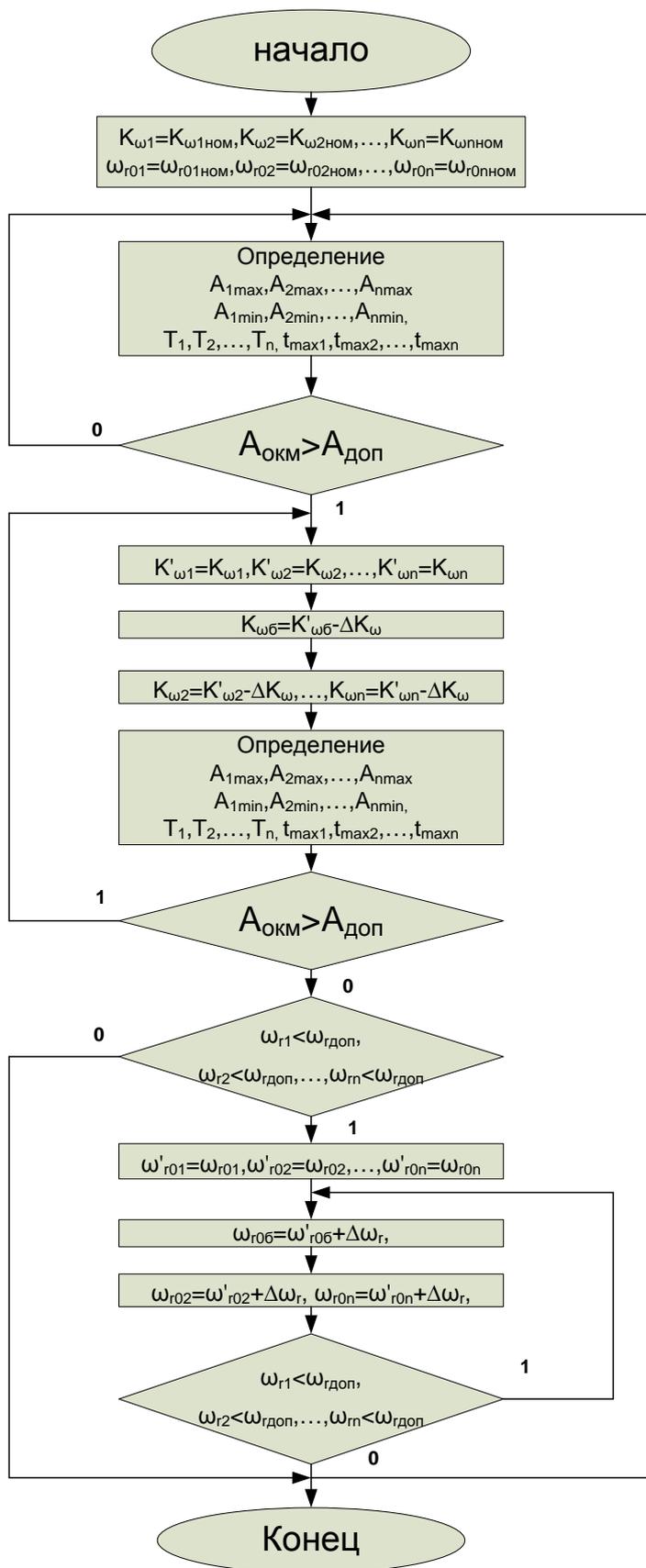


Рис. 9. Алгоритм работы блока УОКМ

ведомых агрегатов изменяются одновременно с быстроедействием намного превышающим изменение уставки ведущего генераторного агрегата. Значения коэффициентов передачи  $K'_{\omega}$  регуляторов скорости дизелей и уставок задания  $\omega'_{r0}$  скорости

вращения дизелей используются для сохранения текущих значений соответствующих параметров перед их изменением.

В алгоритме работы блока УОКМ (рис. 9) 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  $A_{\text{окм}}$  является применение интегрального критерия площади разности огибающих токов нормированной по времени. Рассмотрим подробнее предлагаемый метод для случая параллельной работы двух генераторов (рис. 10).

Полученные осциллограммы свидетельствуют о том, что при возникновении обменных колебаний мощности наблюдается пульсирующий характер огибающих токов, то есть амплитуда синусоидального тока постоянно изменяется с частотой порядка нескольких Герц.

При реализации данного критерия в предложенном методе используются оги-

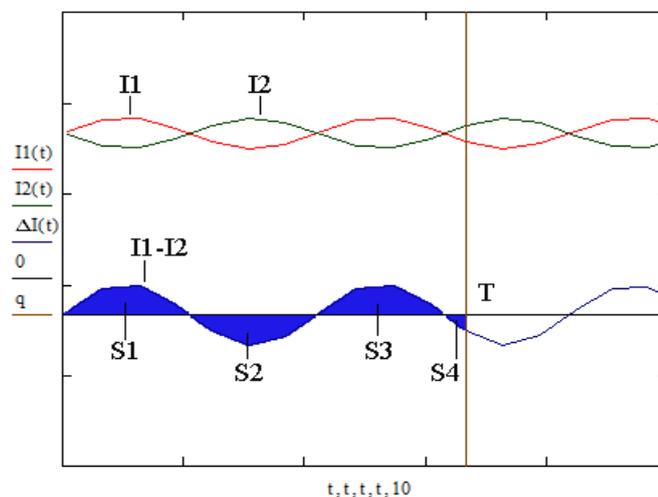


Рис. 10. Определение критерия  $A_{\text{доп}}$  для двух генераторов

бающие  $I_1$  и  $I_2$ , которые соединяют максимумы токовых синусоид. Точки максимумов и минимумов могут быть найдены как экспериментально, так и с использованием эталонной математической модели. Разностью таких огибающих всех генераторов, работающих параллельно в составе СЭЭС, является синусоидальная линия  $I_1 - I_2$ , которая колеблется вокруг горизонтальной линии с той же частотой, что и исходные огибающие. Линия  $I_1 - I_2$ , пересекаясь с осью, отсекает площади  $S_1, S_2 \dots S_n$ , которые при суммировании позволяют определить истинное значение амплитуды обменных колебаний мощности.

Для эффективной работы системы автоматического управления при определении уровня обменных колебаний суммарная площадь нормируется по времени, то есть относится к некоторому промежутку  $T$ . Значения  $T$  и  $A_{\text{доп}}$  определяются экспертно для каждого ДГА судового электротехнического комплекса, а в некоторых случаях и для отдельных режимов его работы.

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

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

Блок УОКМ обеспечивает работу системы управления ДГА по предложенному алгоритму в установившихся режимах и является дополнением ко всем уже существующим системам автоматики судовой электростанции. При изменении числа работающих генераторов и значительном изменении нагрузки судовой электростанции, его работа автоматически прерывается на время переходных процессов, а затем возобновляется сначала.

Предлагаемый метод и структурная схема его реализации требуют одновременного изменения коэффициентов передачи регуляторов частоты вращения дизелей и заданий по частотам вращения у всех параллельно работающих в составе СЭЭС дизель-генераторных агрегатов, иначе возникают синфазные автоколебания мощности, которые суммируются с обменными колебаниями. Быстродействие локальных каналов подстройки параметров регуляторов частоты вращения ведомых дизель-генераторных агрегатов должно намного превышать быстродействие смены настроек базового агрегата.

Наибольший эффект может быть достигнут в системах управления работой ДГА с электронными регуляторами частоты вращения, в которых возможность изменения настроек в процессе работы не вызывает сложностей.

Для проверки метода уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности разработана компьютерная программа, моделирующая параллельную работу ДГА в соответствии с алгоритмом работы блока УОКМ с применением интегрального критерия определения допустимого уровня обменных колебаний мощности. Программа реализует адаптивную работу блока УОКМ в автоматическом режиме.

В качестве примера на рис. 11 приведены результаты работы блока УОКМ для начальных условий моделирования изображенных на рис. 8. В программе задан нормировочный диапазон по времени от 3,5 с до 5,5 с, таким образом огибающие токов строятся в течение 2 с. Шаг поиска коэффициента усиления  $K_{\omega}$  задан равным 4, а шаг поиска уставки по частоте вращения – 0,01. Программа реализует работу алгоритма адаптации до момента уменьшения амплитуды обменных колебаний токов до значения, соответствующего  $S=0,025$ . На графиках токов  $I_{A1}$ ,  $I_{A2}$  параллельно работающих генераторов биения отсутствуют, амплитуда токов практически постоянная, что видно по линиям огибающих, которые нанесены по верхней границе токов на интервале от 3,5 с до 5,5 с. На нижнем графике представлена линия разности токовых огибающих  $I_{\text{res}} = I_{A1\text{max}} - I_{A2\text{max}}$ , по расположению которой определяется площадь, характеризующая текущее значение амплитуды обменных колебаний мощности.

Полученные результаты подтвердили эффективность и работоспособность разработанных методов и средств по уменьшению амплитуды обменных колебаний мощности при параллельной работе ДГА в составе судового электротехнического комплекса.

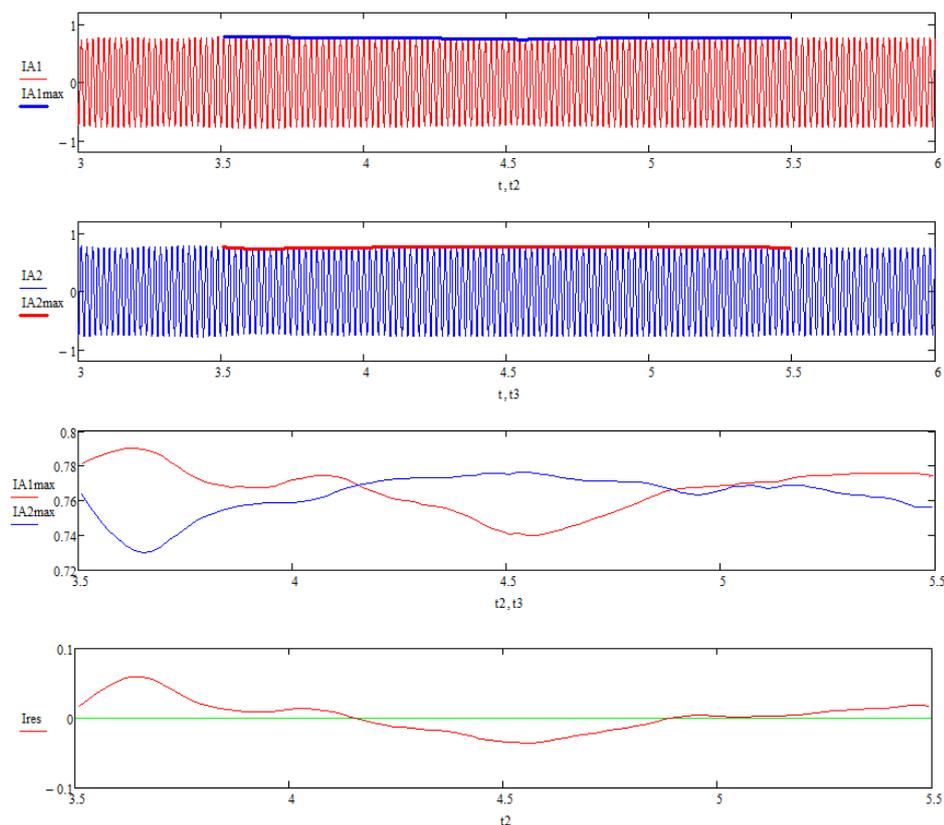


Рис. 11. Результаты работы блока адаптации, начальные условия  $D_{n1}=0,002$ ,  $D_{n2}=0,01$ ,  $K_{\omega 1}=50$ ,  $K_{\omega 2}=50$ ,  $\omega_{r01}=1$ ,  $\omega_{r02}=1$

## РЕЗУЛЬТАТЫ

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 снижения 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 “Югрематоматика”, 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 мер по снижению 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.

## РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. 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.

2. Савенко А. Е. Результаты экспериментального исследования режимов работы судовой электроэнергетической системы парома “Ейск”/ А. Е. Савенко // Судовые энергетические установки. – 2010. – № 26. – С.30–36.

3. Савенко О. Є. Теоретичне та експериментальне дослідження роботи

багатогенераторної суднової електроенергетичної системи / О. Є. Савенко // Вістник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 3. – С. 58–62.

4. Савенко О. Є. Оптимізація роботи багатогенераторної суднової електроенергетичної системи / О. Є. Савенко // Вістник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1. – С. 131–134.

5. Савенко О. Є. Дослідження суднової електроенергетичної системи парому “Єйськ” / О. Є. Савенко // Вістник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 1. – С. 85–89.

6. Савенко О. Є. Оптимізація роботи суднової електростанції з метою підвищення якості електроенергії / О. Є. Савенко // Вістник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 6. – С. 74–78.

7. 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.

8. Савенко А. Е. Математическая модель судового электротехнического комплекса / А. Е. Савенко // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 5. – С. 54–59.

#### **Другие публикации по теме диссертационных исследований**

9. Савенко А. Е. Применение синхронного индукторного двигателя в винторулевых колонках с аzipодом / А. Е. Савенко // Рыбне господарство України. – 2005. – № 7. – С. 51–52.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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, НТУУ КПИ, 2014 – С. 142-143.

19. Савенко О. Є. 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.

20. 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.

**САВЕНКО Александр Евгеньевич**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Подписано в печать 20.10.2015. Формат 60x84<sup>1</sup>/16

Печать плоская. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 15.

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»,  
298309, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, д. 82  
Отпечатано в издательстве ФГБОУ ВО «КГМТУ»