

На правах рукописи



Комлев Антон Владимирович

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
АКТИВНЫХ НАГРУЗОК СУДОВЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Владивосток - 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Дальневосточный федеральный университет».

Научный руководитель: **Кувшинов Геннадий Евграфович**,
доктор технических наук, профессор,
заслуженный энергетик РФ

Официальные оппоненты: **Веревкин Владимир Федорович**,
доктор технических наук, профессор, профес-
сор кафедры «Электрооборудование судов»
Морского государственного университета им.
адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток.

Кузьмин Роман Вячеславович, кандидат
технических наук, доцент, доцент кафедры
«Электромеханика» Комсомольского-на-
Амуре государственного технического уни-
верситета, г. Комсомольск-на-Амуре.

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государст-
венный университет путей сообщения», г. Ха-
баровск.

Защита состоится «17» октября 2014 г. в 14 часов 30 минут
на заседании диссертационного совета Д 212.092.04 при ФГБОУ ВПО «Комсо-
мольский-на-Амуре государственный технический университет» по адресу:
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, ауд. 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»
www.knastu.ru.

Автореферат разослан « » августа 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Суздорф Виктор Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Для рационального использования синхронных генераторов (СГ) при параллельной работе необходимо, чтобы общая активная нагрузка (мощность) распределялась между ними пропорционально их номинальным мощностям. В судовых электроэнергетических системах (СЭЭС) выполнение этого условия обеспечивают устройства распределения активных нагрузок (УРАН) или мощности.

Точность и быстродействие УРАН во многом зависят от входящих в их состав измерительных преобразователей активной мощности или тока (ИПАТ). Существующие ИПАТ в УРАН имеют ряд значимых недостатков, обусловленных применением в них трансформаторов тока (ТТ). Это большие массогабаритные характеристики ИПАТ, увеличивающиеся с ростом номинального тока и напряжения ТТ, большие погрешности измерения, связанные с влиянием насыщения, остаточной намагниченности, гистерезиса магнитного сердечника ТТ и апериодической составляющей измеряемого тока. Для согласования уровня сигнала 1-5 А, получаемого от ТТ, с параметрами УРАН необходимо применение вторичного измерительного преобразователя тока и других согласующих устройств, что усложняет схему УРАН. Использование ТТ в современных высокоточных микропроцессорных УРАН значительно снижает эффективность таких УРАН. Поэтому задача усовершенствования УРАН, путем замены ТТ другими измерительными преобразователями тока (ИПТ), в настоящее время является весьма актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Вопрос усовершенствования УРАН СГ рассматривался в отечественных работах следующих авторов: Н.В. Константинов, Н.И. Овчаренко, В.В. Миронов, Г.И. Китаенко, Л.Н. Дудченко и др. Имеется ряд зарубежных публикаций по этой теме следующих авторов: Г. Олсон, И. Болдея, М.М. Ислам, Хамди Ахмед Ашур и др. В большинстве этих работ рассматриваются способы оптимизации распределения активных нагрузок СГ, усовершенствование блоков обработки электрических сигналов УРАН, но не освещены вопросы, связанные с применением альтернативных первичных преобразователей тока в УРАН и разработкой новых ИПАТ на их основе.

В последнее десятилетие появились публикации авторов, которые опубликовали работы, касающиеся применения дифференцирующих индукционных преобразователей тока (ДИПТ) вместо ТТ в устройствах релейной защиты и автоматики: И.А. Богодайко, А.Г. Белов, А.Н. Козлов, Н.Н. Мазалева, Б.А. Морозов, Ю.В. Мясоедов, Л.А. Коджович, М.Т. Бишоп, Д.В. Шепард и др. В этих работах подчеркиваются преимущества ДИПТ: малые размеры и масса, высокая точность измерения и отсутствие насыщения сердечника. Отмечается существенное упрощение многих устройств релейной защиты и автоматики при использовании ДИПТ без интегрирующих фильтров, восстанавливающих форму измеряемого тока.

Публикаций по разработке ИПАТ с ДИПТ и исследованию УРАН СГ с такими ИПАТ не было.

Объектом исследования являются устройства распределения активных нагрузок судовых синхронных генераторов.

Предмет исследования – технико-экономические характеристики ИПАТ.

Цель и задачи диссертации. Цель диссертационной работы – разработка устройств для распределения активного тока между судовыми синхронными генераторами, которые, путем замены входящих в эти устройства трансформаторов тока на дифференцирующие индукционные преобразователи тока без использования интегрирующих фильтров, обеспечивают повышение точности, упрощение схемы и снижение массогабаритных характеристик этих устройств.

Достижение поставленной цели требует решения *следующих задач*:

- разработка структуры однофазного и трехфазного ИПАТ с ДИПТ;
- анализ работы и определение погрешностей этих ИПАТ;
- обоснование конструкции и создание методики расчета ДИПТ, обладающих высокой чувствительностью к измеряемому току, для работы в УРАН СГ с токами до 1 кА в сетях с напряжением до 1 кВ;
- разработка компьютерных моделей, учитывающих влияние внутренних сопротивлений элементов ИПАТ, и выполнение моделирования предложенных ИПАТ для подтверждения теоретических положений;
- изготовление макета УРАН с указанными ИПАТ и экспериментальная проверка результатов компьютерного моделирования на реальной системе.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем.

1. Предложена разновидность способа измерения активного тока источника, отличающаяся тем, что результат находится как разность выпрямленных суммы и разности двух напряжений, первое из которых пропорционально напряжению источника, а второе пропорционально производной тока нагрузки, что позволяет использовать ДИПТ вместо ТТ.

2. Разработана новая структура однофазного измерительного преобразователя активного тока, которая отличается от известных тем, что в ней реализуется указанный выше способ измерения активного тока, а в качестве ИПТ используются два ДИПТ, установленных в одной из фаз источника, и обеспечивает значительное уменьшение габаритных размеров и массы УРАН при увеличении его точности.

3. Разработана новая структура трёхфазного измерительного преобразователя активного тока, которая отличается от известных тем, что в ней используются шесть ДИПТ, установленных по два в каждую фазу, и один трехфазный трансформатор напряжения, первичная обмотка которого соединена в «звезду», а вторичная в «треугольник». При этом обеспечивается измерение активной мощности при несимметричной по фазам нагрузке источника, значительное уменьшение массогабаритных характеристик и увеличение точности трехфазного УРАН.

4. Предложена конструкция и методика расчета ДИПТ, основанная на использовании стандартного однофазного ленточного разрезного сердечника, что значительно упрощает изготовление таких ДИПТ и позволяет использовать их в сетях с номинальным током менее 1 кА и напряжением до 1 кВ.

5. Предложены компьютерные модели однофазного и трехфазного ИПАТ с ДИПТ, которые отличаются от известных упрощённых моделей учётом внутрен-

них сопротивлений обмоток ДИПТ и трансформатора, что обеспечивает повышение точности измерения выходного напряжения ИПАТ.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Внедрение предлагаемых ИПАТ с ДИПТ в УРАН способствует:

- более рациональному использованию СГ автономных электростанций при параллельной работе ввиду повышения точности УРАН;
- снижению конечной стоимости УРАН и более широкому применению на судах трехфазных УРАН, учитывающих несимметричность нагрузки СГ, ввиду значительного упрощения таких УРАН и уменьшению в несколько раз их массогабаритных характеристик.

Результаты работы, в том числе изготовленный макет УРАН с ДИПТ, используются в учебном процессе ДВФУ по магистерской программе 140400.68 «Автоматизированные электротехнические комплексы и системы в судовой энергетике», а также при подготовке аспирантов по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Методика расчёта ДИПТ, выполненных на основе стандартных маломощных трансформаторов с ленточным разрезным сердечником, и рекомендации по реализации ИПАТ и УРАН с применением таких ДИПТ переданы в ЗАО «Варяг-Техсервис» для внедрения в изделиях, создаваемых в этой организации.

Личный вклад автора. При непосредственном участии автора разработаны схемы однофазного и трехфазного ИПАТ. Лично автором выполнен анализ современного состояния УРАН СГ и измерительных преобразователей переменного тока; исследована работа ИПАТ с ДИПТ; выполнено компьютерное моделирование предложенных ИПАТ; изготовлены составные части и выполнена сборка макета УРАН с ДИПТ; проведены экспериментальные исследования; обработаны и проанализированы полученные результаты.

Методология и методы научного исследования. Работа выполнена с применением методов анализа и синтеза, математической обработки результатов, математического и компьютерного моделирования и экспериментальных исследований. Теоретической и методологической базой диссертационной работы являются законы электротехники, электроники, электрических машин, автоматики электроэнергетических систем.

Положения, выносимые на защиту:

- структура и результаты анализа работы однофазного ИПАТ с ДИПТ без использования интегрирующих фильтров;
- структура и результаты анализа работы трехфазного ИПАТ с ДИПТ без использования интегрирующих фильтров;
- конструкция и методика расчета ДИПТ на основе стандартного однофазного ленточного разрезного сердечника;
- компьютерная модель и результаты моделирования работы однофазного и трехфазного ИПАТ с ДИПТ;
- результаты экспериментальных исследований предложенных ИПАТ и автоматического распределения активной нагрузки между СГ с УРАН, снабжёнными этими ИПАТ.

Степень достоверности полученных в работе результатов обеспечивается корректным использованием положений теоретической электротехники, теорий электроники и электрических машин, методов математического анализа; использованием оборудования и измерительных приборов, обеспечивающих достаточную точность измерения; обсуждением на научных конференциях результатов исследования с последующей их публикацией.

Апробация результатов научных исследований. Основные результаты диссертационного исследования были представлены на научно-технических конференциях «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов» (Благовещенск, 2013 г.), «Вологдинские чтения» (Владивосток, 2009-2012 гг.), «Молодежь и научно-технический прогресс» (Владивосток, 2010 г.), «Международный научный форум студентов, аспирантов и молодых ученых стран Азиатско-Тихоокеанского региона» (Владивосток, 2010 г., 2012 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано работ 11, из них две работы опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, получен один патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка условных сокращений, библиографического списка, включающего 102 наименования, и приложения. Работа изложена на 142 страницах машинописного текста, содержит 75 рисунков, 10 таблиц и 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость результатов исследования.

В первой главе рассмотрены способы распределения активных нагрузок, разновидности устройств автоматического распределения активных нагрузок СГ. Выявлены достоинства и недостатки существующих УРАН.

Анализ существующих отечественных и зарубежных УРАН СЭЭС показал, что наименее совершенной частью таких устройств является ИПАТ. В них в качестве измерительных преобразователей тока до сих пор используются ТТ. Особенностью работы ИПАТ в СЭЭС является измерение больших токов – от нескольких сотен ампер до нескольких тысяч ампер. При этом номинальное напряжение СЭЭС может достигать 11 кВ. Поэтому использование ТТ вносит в УРАН следующие недостатки:

- значительно ухудшаются массогабаритные характеристики УРАН за счет использования как самого ТТ, масса и размеры которого растут непропорционально быстро с увеличением номинального тока и напряжения СЭЭС, так и дополнительных элементов к ТТ: нагрузочного резистора ТТ, согласующего трансформатора. Масса и габариты ТТ могут в десять и более раз превышать массу и габариты УРАН;

- в процессе эксплуатации снижается точность УРАН, так как, при измерении больших токов, сердечник ТТ может входить в насыщение, искажая форму тока вторичной обмотки ТТ. Остаточное намагничивание сердечника создает дополнительные погрешности измерения. В таком режиме работы ТТ погрешность УРАН может превышать в два и более раз погрешность, установленную классом точности устройства;

- использование ТТ с современными микропроцессорными УРАН является мало оправданным, так как входная мощность последних значительно меньше значения выходной мощности ТТ.

Вторая глава посвящена анализу измерительных преобразователей переменного тока, способных заменить ТТ в судовых УРАН.

Выявлено, что среди рассмотренных разновидностей ИПТ (на основе эффекта Холла, оптические и др.) выявлено, что наилучшими показателями обладают ДИПТ без использования интегрирующих фильтров. ДИПТ имеет немагнитный сердечник, или магнитный сердечник с зазорами. Поэтому у таких преобразователей отсутствуют потери на гистерезис, насыщение и нелинейность. Кроме того, ДИПТ могут измерять очень большие токи без увеличения своих размеров, маломощны, обладают простой конструкцией. Отказ от использования интегрирующих фильтров позволит упростить ИПАТ с ДИПТ, увеличить его быстродействие и снизить погрешности ДИПТ, обусловленные влиянием интегрирующего фильтра. При этом необходима разработка новых схемных решений ИПАТ для УРАН.

ИПТ на основе эффекта Холла обладают меньшей надежностью за счет необходимости подключения к стабилизированному источнику питания постоянного тока, с ростом тока и напряжения СЭЭС масса и габариты таких ИПТ значительно возрастают из-за использования компенсационной обмотки с магнитным сердечником.

Оптические ИПТ обладают большой массой (от нескольких до десятков килограммов) и стоимостью за счет наличия сложного электронно-оптического блока, они также требуют подключения стабильного источника питания. В литературе отмечается, что качество работы оптических ИПТ ухудшается под действием механических напряжений и вибраций оптоволоконна, изменения температуры.

В третьей главе предложены новые структуры однофазного и трехфазного ИПАТ с ДИПТ для УРАН и выполнен анализ их работы.

На рисунке 1 представлены разработанные схемы однофазного (*а*) и трехфазного (*б*) ИПАТ с ДИПТ.

Однофазный ИПАТ состоит из двух ДИПТ $L1-L2$, установленных в фазе B СГ, трансформатора напряжения $TV1$, подключенного к линейному напряжению AC , с двумя вторичными обмотками 1 и 2, двух мостовых выпрямителей $VD1$, $VD2$ и резисторов $R1$, $R2$. Необходимо отметить, что схема такого ИПАТ является более простой, чем у аналогичных преобразователей, выполненных на основе ТТ: в сравнении с ИПАТ от УРАН типа УРМ-35 количество используемых элементов в схеме сократилось в два раза, а масса и габариты – более чем в десять раз. Такая оценка справедлива и для других разновидностей ИПАТ.

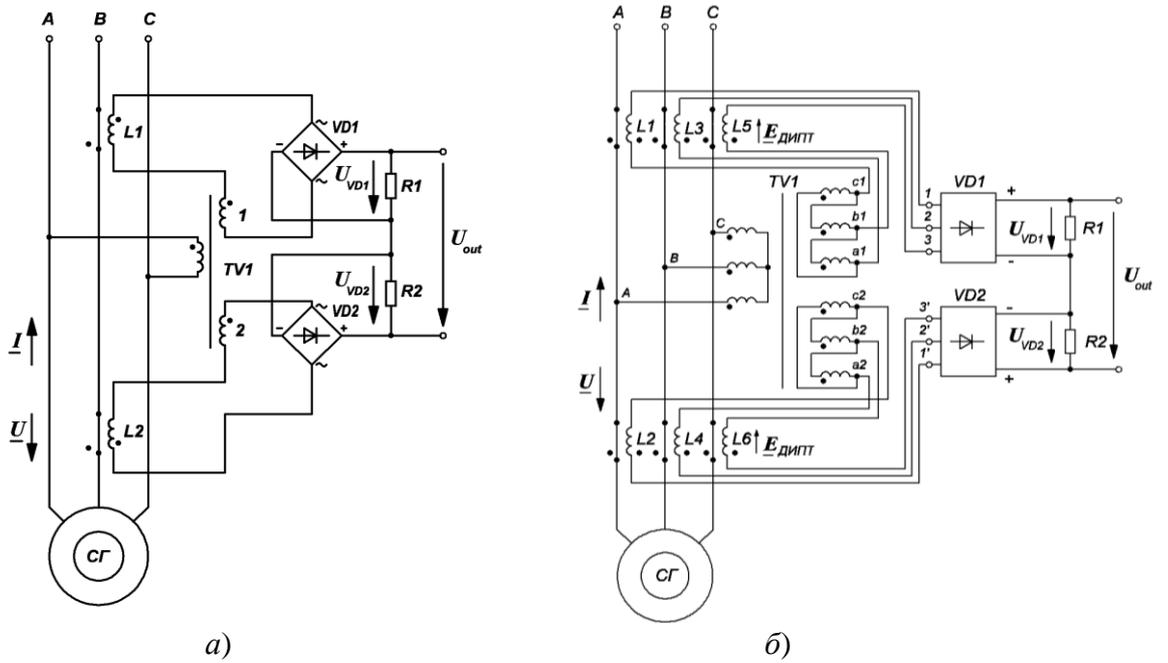


Рисунок 1 – Схема однофазного (а) и трехфазного (б) измерительных преобразователей активного тока

Принцип действия устройства поясняется векторными диаграммами, изображенными на рисунке 2.

ЭДС катушек ДИПТ на 90 электрических градусов опережает ток I_B фазы В СГ и определяется как:

$$\underline{E} = X_m I_B e^{-j\varphi}, \quad X_m = \omega M, \quad (1)$$

где j – мнимая единица; φ – угол, на который ток нагрузки отстает от фазного напряжения источника; X_m – взаимное индуктивное сопротивление; ω – угловая частота источника напряжения; M – взаимная индуктивность катушки ДИПТ и токопровода.

При активной нагрузке СГ векторы ЭДС катушек ДИПТ параллельны вектору линейного напряжения U_{AC} СГ, а при индуктивной нагрузке – перпендикулярны ему.



Рисунок 2 – Векторные диаграммы напряжений однофазного ИПАТ: а) – на входе выпрямителя VD1; б) – на входе выпрямителя VD2

Действующие значения напряжений на входе выпрямителей VD1 и VD2 на основании применения теоремы косинусов будут иметь вид:

$$\begin{aligned} U_5 &= \sqrt{(k_u U_{AC})^2 + 2k_u U_{AC} X_m I_B \cos \varphi + (X_m I_B)^2}, \\ U_6 &= \sqrt{(k_u U_{AC})^2 - 2k_u U_{AC} X_m I_B \cos \varphi + (X_m I_B)^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где k_u – коэффициент трансформации TV1.

Если ЭДС катушек ДИПТ составляют в установившихся режимах работы СГ не более 10% от напряжений $k_u U$, то членами $(X_m \cdot I)^2$ в выражениях (2) можно пренебречь. Далее, при разложении полученных выражений в ряд Маклорена можно ограничиться только двумя первыми членами ряда. Тогда входные напряжения мостовых выпрямителей $VD1$ и $VD2$ аппроксимируются достаточно точными выражениями:

$$U_5 \approx k_u U_{AC} + X_m I_B \cos \varphi, \quad U_6 \approx k_u U_{AC} - X_m I_B \cos \varphi \quad (3)$$

Выходное напряжение однофазного ИПАТ U_{out} , равное разности напряжений U_5 и U_6 , умноженных на коэффициент выпрямления $K_0 = 0,9$ для однофазного мостового выпрямителя, пропорционально активному току СГ:

$$U_{out} = K_0(U_5 - U_6) = 1,8X_m I_B \cos \varphi. \quad (4)$$

Высокую точность аппроксимации выражений (2) подтверждают графики относительной погрешности выходного напряжения ИПАТ δU_{out} , изображенные на рисунке 3 в относительных единицах (о.е.), где за единицу принято напряжение вторичной обмотки трансформатора $k_u U$.

Значение максимальной погрешности соответствует углу $\varphi = \pi/2$ и для ЭДС ДИПТ, равной 10% от напряжения вторичной обмотки $TV1$, составляет 0,5% (график 4). Поэтому, максимальное значение ЭДС ДИПТ в ИПАТ следует ограничить на этом уровне.

Для учета несимметричной нагрузки СГ был разработан трехфазный ИПАТ с ДИПТ, схема которого изображена на рисунке 1, б.

Трехфазный и однофазный ИПАТ аналогичны по принципу действия: вторичные обмотки трансформатора напряжения подключаются к ДИПТ таким образом, чтобы при активной нагрузке СГ векторы ЭДС катушек ДИПТ были параллельны векторам соответствующих напряжений вторичной обмотки $TV1$, а при индуктивной нагрузке – были перпендикулярны им.

При симметричной нагрузке действующие значения напряжений на входе выпрямителей $VD1$ и $VD2$ определяют только для одной фазы аналогично однофазному ИПАТ по выражениям (2) и (3). Выходное напряжение трехфазного ИПАТ U_{out} аналогично выражению (4) и также пропорционально активному току СГ:

$$U_{out} = K_0(U_{10} - U_{1'0}) = 4,68X_m I_A \cos \varphi. \quad (5)$$

где U_{10} и $U_{1'0}$ – входные фазные напряжения выпрямителей $VD1$ и $VD2$; K_0 – коэффициент выпрямления трехфазного мостового выпрямителя, который для напряжений U_{10} и $U_{1'0}$ равен 2,34.

При несимметричной нагрузке анализ работы трехфазного ИПАТ выполнялся по методу симметричных составляющих. Рассматривалась работа устройства при токах обратной последовательности, так как токи нулевой последователь-

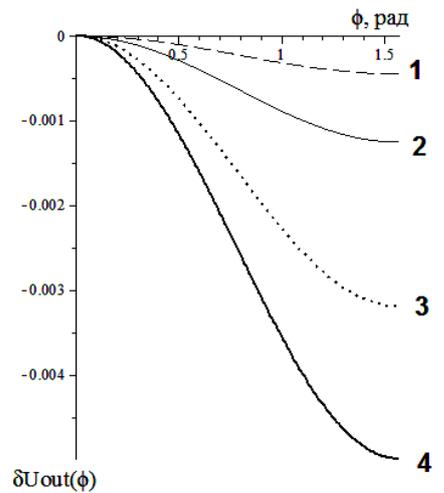


Рисунок 3 – графики $\delta U_{out} = f(\varphi)$ для различных значений напряжения U_{dipr} : 1 – 0,03 о.е., 2 – 0,05 о.е., 3 – 0,08 о.е., 4 – 0,1 о.е.

ности отсутствуют. При отсутствии обратной последовательности напряжений активная мощность от токов обратной последовательности тождественно равна нулю.

Выходное напряжение U_{d1} трехфазного выпрямителя $VD1$ в таком случае находилось как сумма интегралов от трех мгновенных линейных напряжений на входе выпрямителя u_{13}, u_{23}, u_{21} за период повторяемости π :

$$U_{d1} = \frac{1}{(a_4 - a_1)} \int_{a_1}^{a_4} \sqrt{2} \cdot U_{2л} \sin \theta d\theta = \frac{1}{\pi} \left(\int_{a_1}^{a_2} u_{13} d\theta + \int_{a_2}^{a_3} u_{23} d\theta + \int_{a_3}^{a_4} u_{21} d\theta \right), \quad (6)$$

где $U_{2л} \sin \theta$ – мгновенное линейное напряжение на входе выпрямителя $VD1$; a_1 - a_4 – пределы интегрирования, которые определялись из следующих уравнений:

$$u_{12}(a_1) = u_{13}(a_1), u_{13}(a_2) = u_{23}(a_2), u_{23}(a_3) = u_{21}(a_3), u_{21}(a_4) = u_{31}(a_4). \quad (7)$$

Выходное напряжение U_{d2} выпрямителя $VD2$ находилось аналогично выражениям (6) и (7).

После определения пределов интегрирования, в программе Maple с помощью команды *piecewise*, определяющей кусочно-непрерывную функцию, были построены графики выходных напряжений трехфазного ИПАТ $U_{out} = U_{d1} - U_{d2}$ для разных значений угла нагрузки ψ между током обратной последовательности и одним из фазных напряжений вторичных обмоток трансформатора $TV1$. Эти графики представлены на рисунке 4.

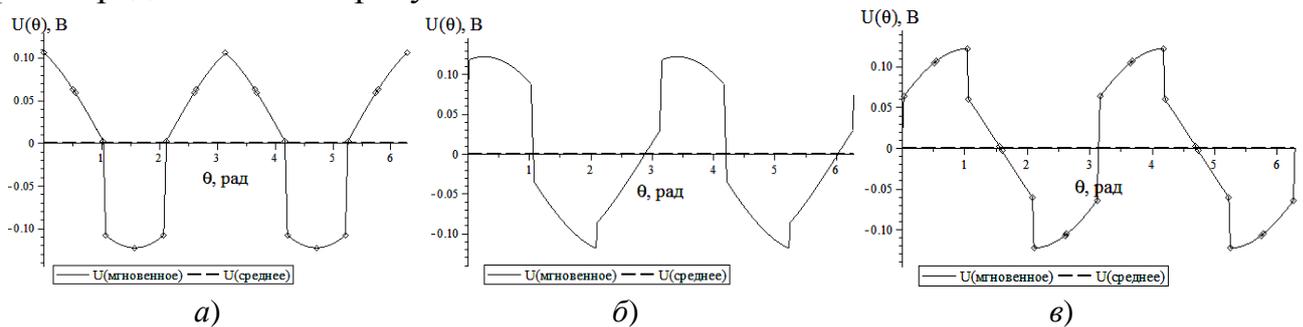


Рисунок 4 – Графики мгновенного и среднего напряжения на выходе трехфазного ИПАТ при нагрузке токами обратной последовательности фаз при $\psi/2 = 0$ (а), $\psi/2 = \pi/4$ (б), $\psi/2 = \pi/2$ (в)

Полученные осциллограммы свидетельствуют о том, что среднее напряжение на выходе ИПАТ (штриховая линия) при несимметричной нагрузке равно нулю. Максимальное отличие от нуля пренебрежимо мало и составляет не более $1 \cdot 10^{-5}$ (а именно $9.1355 \cdot 10^{-6}$) от значения фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора $TV1$, что является погрешностью расчёта.

Таким образом, по сравнению с однофазным ИПАТ с ДИПТ, трехфазный ИПАТ позволяет учитывать несимметричную нагрузку синхронного генератора. Выходное напряжение такого ИПАТ в 2,6 раз больше и содержит меньше пульсаций за счет использования трехфазных мостовых выпрямителей.

Так как разработанные ИПАТ содержат ДИПТ вместо ТТ, то в них практически полностью отсутствуют погрешности измерения, связанные с насыщением сердечника ТТ. Поэтому точность работы УРАН с разработанными ИПАТ также повышается.

Четвертая глава посвящена обоснованию конструкции и расчету параметров ДИПТ, обладающих высокой чувствительностью к измеряемому току, разработке компьютерных моделей представленных ИПАТ, учитывающих влияние сопротивлений обмоток ДИПТ и трансформатора напряжения, и моделированию ИПАТ в различных режимах нагрузки СГ.

Существующие конструкции ДИПТ обеспечивают максимальную чувствительность к измеряемому току не более 1-2 мВ/А, что ограничивает применение разработанных ИПАТ для УРАН СГ, если номинальные токи не превышают 1 кА. В диссертации предложена конструкция ДИПТ, при которой чувствительность может составлять от 10 до 100 мВ/А (и более), в виде трансреактора на основе стандартного однофазного ленточного разрезного сердечника (рисунок 5). Сердечник ДИПТ, благодаря наличию в нем воздушного зазора δ , не входит в насыщение, и его характеристика намагничивания $B = f(H)$ остается линейной.

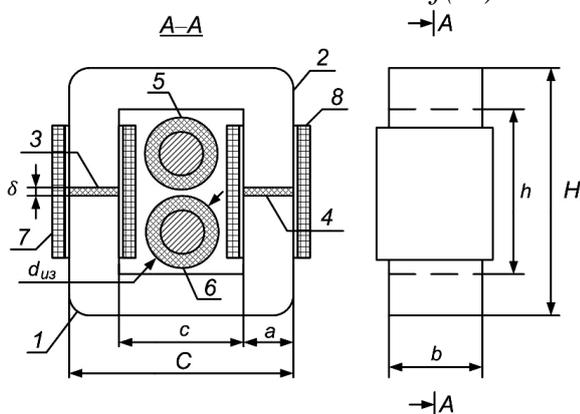


Рисунок 5 – Конструкция ДИПТ с разрезным ленточным сердечником:

1, 2 – половины сердечника; 3, 4 – прокладки из изоляционного материала, помещённые в зазорах сердечника; 5, 6 – провода измеряемого тока; 7, 8 – катушки вторичной обмотки

Другое важное достоинство такого ДИПТ – это возможность его выполнения на базе элементов выпускаемых промышленностью однофазных трансформаторов малой мощности. Недостатком ДИПТ такой конструкции является снижение преимущества над ТТ по массогабаритным характеристикам с ростом измеряемого тока и напряжения. Поэтому такой ДИПТ рекомендуется использовать для измерения токов не более 1 кА в сетях с напряжением до 1 кВ.

Расчет ДИПТ, обеспечивающий достижение минимума его массы, производился по разработанной методике, построенной на основе известных рекомендаций из справочной литературы.

Для выполнения моделирования ИПАТ и последующих экспериментальных исследований УРАН с ДИПТ был рассчитан ДИПТ со следующим параметрами: первичный и вторичный номинальные токи $I_1 = 50$ А и $I_2 = 0,02$ А, ЭДС ДИПТ $E_2 = 10$ В, предельная кратность измеряемого тока $K_I = 20$, номинальная магнитная индукция в магнитопроводе $B_n = 0,085$ Тл, толщина воздушного зазора $\delta = 0,52$ мм, число витков вторичной обмотки $W_2 = 1934$ (по $W_{2,1} = 967$ витков на одну секцию), индуктивность вторичной обмотки $L_2 = 1,56$ Гн, сопротивления вторичной обмотки: $R_2 = 260$ Ом, $X_2 = 490$ Ом, $Z_2 = 555$ Ом. Для ДИПТ был выбран сердеч-

ник типа ПЛ12,5х25х32 с сечением стали 2,74 см² и массой 300 г. Общая масса ДИПТ вместе с обмоткой составила 320 г.

На основе представленных схем однофазного и трехфазного ИПАТ в программе Micro-Cap были разработаны соответствующие схемы компьютерного моделирования ИПАТ, изображенные на рисунке 6, а и б.

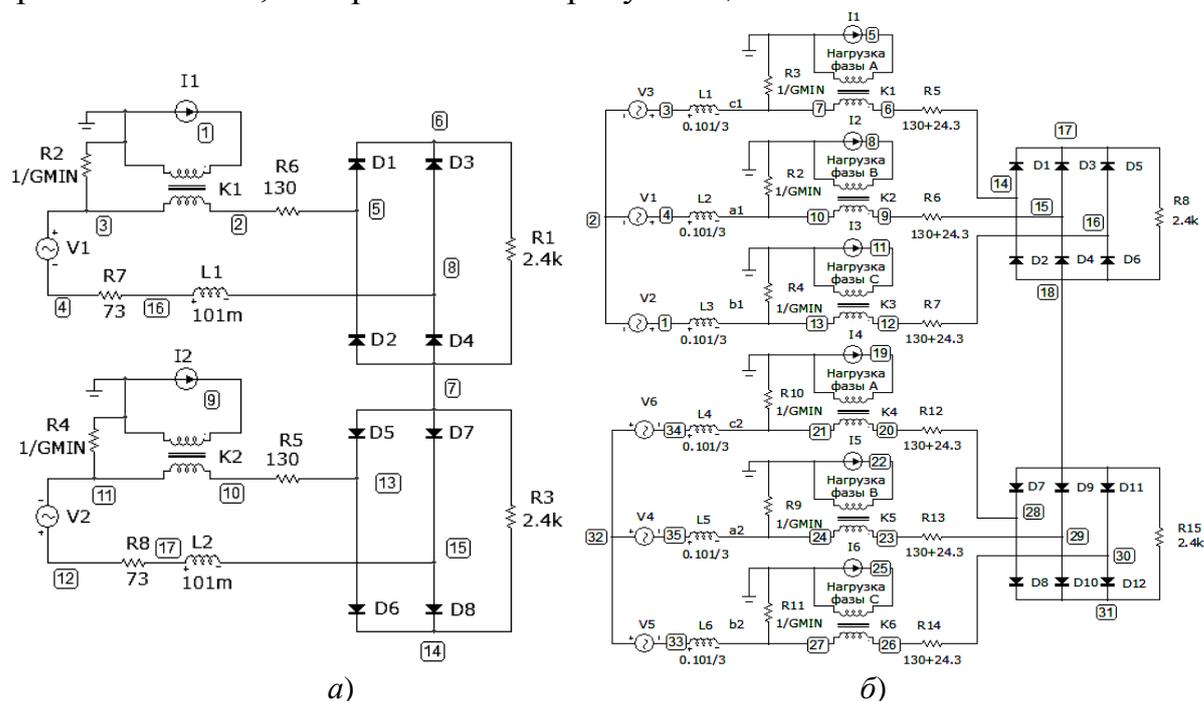


Рисунок 6 – Схемы моделирования однофазного (а) и трехфазного (б) ИПАТ

На схеме рисунка 6, а однофазные источники синусоидального напряжения $V1$, $V2$ моделируют напряжения вторичных обмоток трансформатора $TV1$. Нагрузка СГ, а именно ток фазы B , представлена источниками тока $I1$, $I2$. Для моделирования различной нагрузки элементам $I1$, $I2$ задается амплитуда и начальная фаза тока фазы B .

ДИПТ представлены линейными трансформаторами $K1$ и $K2$, для которых задаются индуктивности первичной $L1$ и вторичной $L2$ обмоток и коэффициент связи K . Для значений $W_1 = 1$, $W_2 = 967$, $L_2 = 391$ мГн из известных соотношений для трансформатора были определены $L_1 = 0,418$ мкГн и $K = 0,788$.

Резисторы $R5$, $R6$ и $R7$, $R8$ моделируют активные сопротивления вторичных обмоток ДИПТ и трансформатора $TV1$ соответственно, катушки индуктивности $L1$, $L2$ – индуктивности рассеяния вторичных обмоток трансформатора $TV1$. Резисторы $R1$ и $R3$ являются нагрузкой ИПАТ.

Модель трехфазного ИПАТ на рисунке 6, б составлена аналогично модели однофазного ИПАТ.

В результате моделирования однофазного и трехфазного ИПАТ были получены осциллограммы мгновенных и средних значений напряжений на выходе ИПАТ при симметричной нагрузке СГ током 50 А (рисунок 7). На рисунке видно, что среднее напряжение ИПАТ пропорционально активной нагрузке СГ, а при индуктивной нагрузке близко к нулю. При активной нагрузке выходные напряжения ИПАТ в среднем на 10% ниже рассчитанных по формулам (4) и (5), так как

часть напряжения падает на сопротивлениях обмоток ДИПТ и трансформатора $TU1$. Установлено, что для обеспечения незначительного падения (не более 2%) этого напряжения сопротивления нагрузки ИПАТ необходимо выбирать такими, чтобы они составляли 98% от общего сопротивления всех элементов ИПАТ.

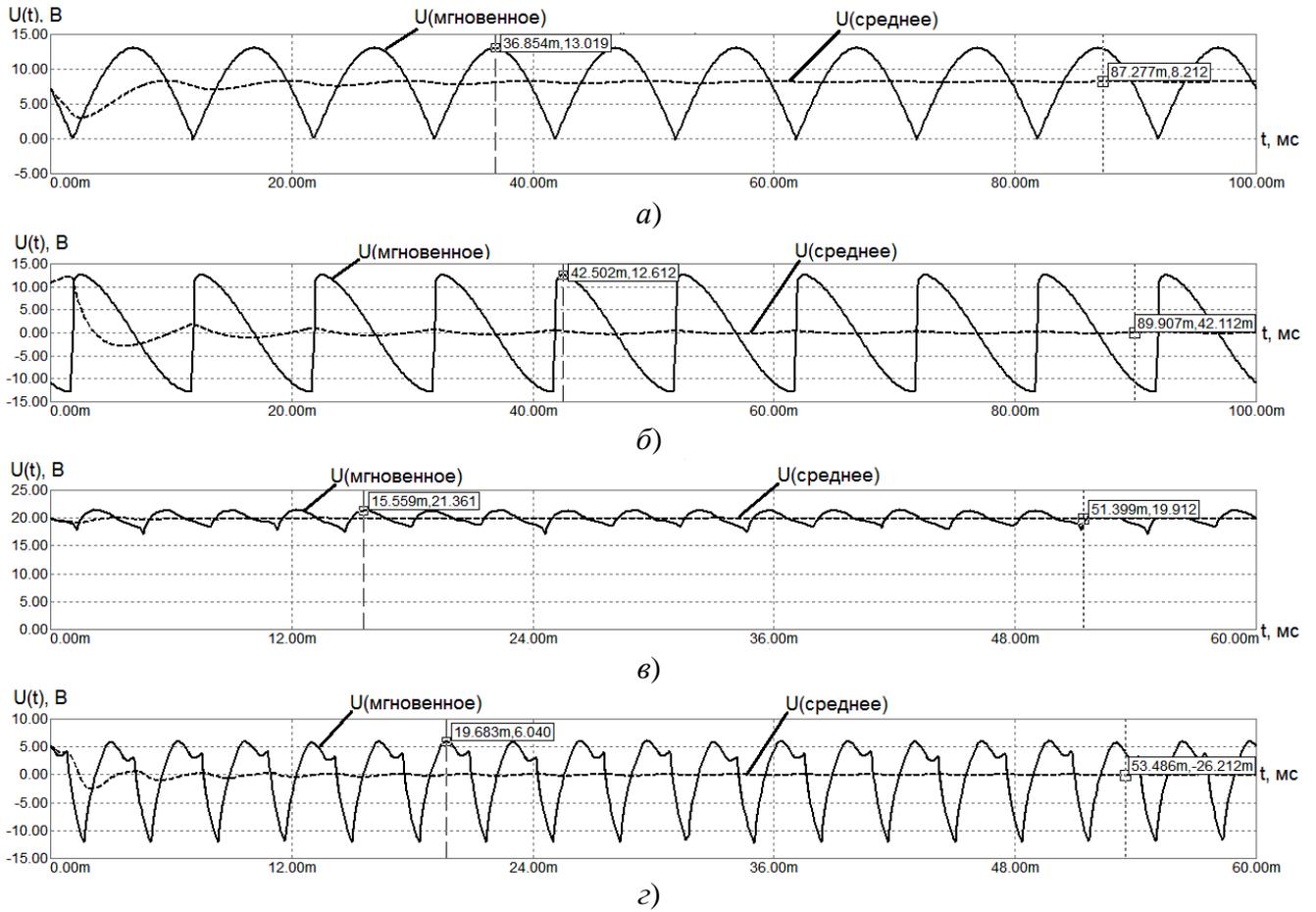


Рисунок 7 – Моделирование работы ИПАТ с ДИПТ в Micro-Cap 10 при симметричной нагрузке током $I = 50$ А: а) и б) – активная и индуктивная нагрузка однофазного ИПАТ соответственно; в) и г) – активная и индуктивная нагрузка трехфазного ИПАТ соответственно

При моделировании режима несимметричной нагрузки трехфазного ИПАТ источникам тока I_1, I_2, I_3 и I_4, I_5, I_6 задавались значения токов обратной последовательности, равные $0,25 I_{ном}$. На рисунке 8 представлены графики мгновенного и среднего напряжения трехфазного ИПАТ. Форма осциллограммы мгновенного напряжения ИПАТ практически повторяет форму осциллограммы, изображенную на рисунке 4, а. Среднее напряжение U_{out} по результатам моделирования, как и по расчетам, практически равно нулю.

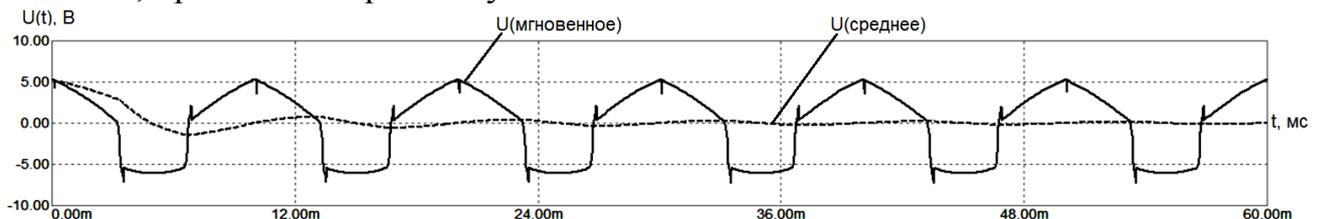


Рисунок 8 – Моделирование работы трехфазного ИПАТ с ДИПТ при нагрузке СГ током обратной последовательности $I_2 = 12,5$ А

В пятой главе представлен разработанный макет УРАН с ДИПТ и описаны его экспериментальные исследования.

Экспериментальные исследования выполнялись в лаборатории судовых электроэнергетических систем кафедры судовой энергетики и автоматики ДВФУ. В лаборатории имеются четыре электромеханических преобразователя, состоящих из двигателя постоянного тока типа ПМ-205 и синхронного генератора типа МС82-4.

Распределение нагрузки между генераторами осуществлялось по методу ведущего генератора в соответствии со схемой, изображенной на рисунке 9. В экспериментах использовались два генератора: Г1 (ведомый) и Г2 (ведущий) с приводными двигателями ПД1 и ПД2. Токи возбуждения этих двигателей изменялись с помощью УРАН и устройства поддержания частоты, система автоматического управления которыми, построенная на основе усилителей У1 и У2, воздействует через серводвигатели СД1 и СД2 на реостаты в цепях обмоток независимого возбуждения двигателей ПД1 и ПД2.

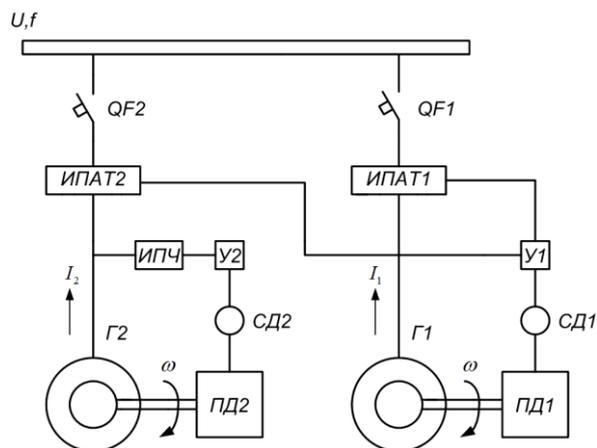
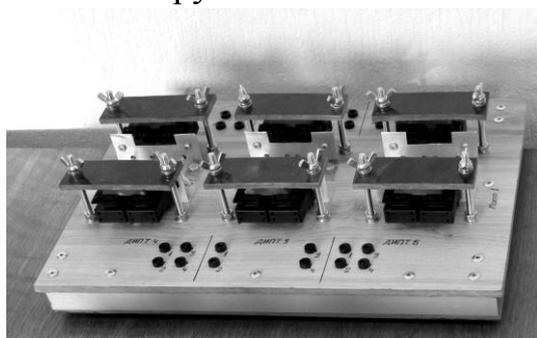


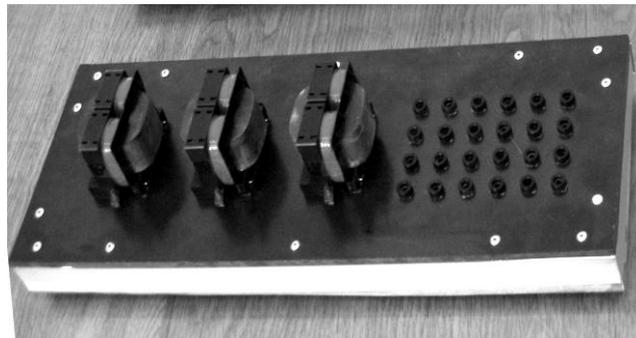
Рисунок 9 – Схема экспериментальной установки

Для эксперимента были подготовлены по два комплекта ДИПТ и трансформаторов напряжения на основе стандартного трансформатора ТП22 – ПЛ12,5х25х32. ДИПТ были выполнены по предлагаемой конструкции (рисунок 5) и методике расчета. На рисунке 10 изображены один комплект из шести таких ДИПТ (а) и трех трансформаторов напряжения (б).

Эксперимент проходил в два этапа. В первом этапе к каждому генератору был подключен однофазный и трехфазный ИПАТ, и оценивалась их работа при различной нагрузке СГ.



а)



б)

Рисунок 10 – Комплект ДИПТ (а) и трансформаторов напряжения (б)

Результаты измерений для первого этапа эксперимента представлены в таблице 1, где $I_{СГ}$ – ток статора СГ, $U_{ИПАТ}$ – выходное напряжение ИПАТ, $\cos\varphi$ – коэффициент нагрузки, γ – приведенная погрешность ИПАТ.

Результаты исследования однофазного и трехфазного ИПАТ с ДИПТ

Нагрузка СГ	$I_{СГ}$, А	Однофазный ИПАТ			Трехфазный ИПАТ		
		$U_{ИПАТ}$, В	$\cos\varphi$	γ , %	$U_{ИПАТ}$, В	$\cos\varphi$	γ , %
Холостой ход	0	-0,19	-	-	0,31	-	-
Активная	10	1,71	1	1,35	4,86	1	-0,3
	20	3,58	1	2,48	9,87	1	1,39
	30	5,1	1	-0,45	13,63	1	-2,6
	40	6,57	1	-3,83	18,62	1	-0,87
	50	8,87	1	2,03	23,76	1	1,3
Индуктивная	20	0,06	0,09	-2,91	0,94	0,09	0,47
	30	0,18	0,09	-3,35	1,2	0,09	-0,2
	50	0,42	0,1	-5,25	2,06	0,1	1,08
Активно-индуктивная	20	2,67	0,78	-1,1	7,02	0,73	1,2
	30	3,66	0,76	-4,4	10,41	0,78	-1,8
	50	6,75	0,79	-3	19,82	0,85	0,7

На рисунке 11, *а* и *б* сплошной линией изображены экспериментальные кривые $U_{ИПАТ} = f(I_{СГ})$ при активной нагрузке СГ для однофазного и трехфазного ИПАТ. Из-за погрешностей измерений, в частности тока статора СГ, определяемого с помощью штатного трехфазного амперметра с классом точности 2,5, наблюдается отклонение характеристик 1 от линейной зависимости.

С помощью метода наименьших квадратов были найдены усредненные прямые 2 (рисунок 11, *а* и *б*).

Коэффициент γ в таблице 2 характеризует приведенную погрешность ИПАТ относительно усредненной прямой 2, который определялся по формуле:

$$\gamma = \frac{U_{ИПАТ} - a \cdot I_{СГ} \cdot \cos\varphi}{a \cdot I_{СГ(Н)}} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где a – коэффициент усредненной прямой 2, определяемый по методу наименьших квадратов; $I_{СГ(Н)}$ – нормирующее значение тока статора, равное 50 А. Для однофазного ИПАТ коэффициент $a = 0,178$ Ом, а для трехфазного – $a = 0,462$ Ом.

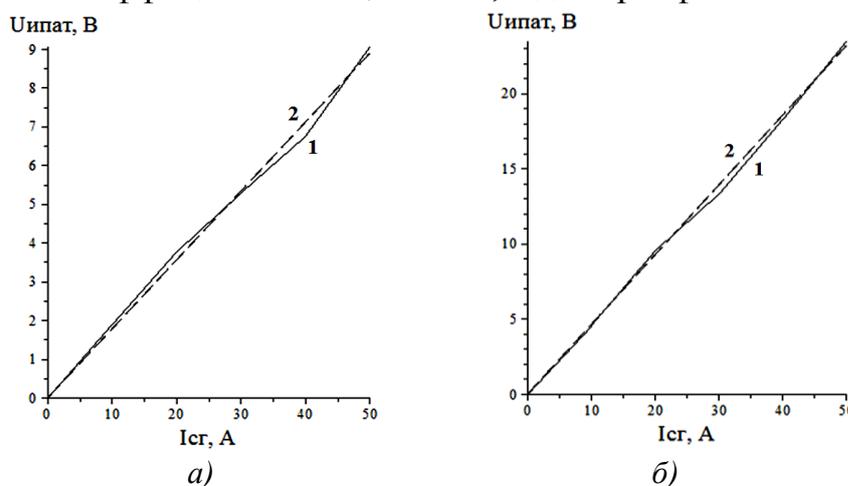


Рисунок 11 – Зависимость напряжений однофазного (*а*) и трехфазного (*б*) ИПАТ от тока статора СГ при активной нагрузке: 1 – экспериментальная кривая; 2 – усредненная прямая

Таким образом, полученные значения погрешности γ вполне согласуются с точностью штатных измерительных приборов, используемых в эксперименте.

На рисунке 12 и 13 представлены осциллограммы выходного напряжения однофазного и трехфазного ИПАТ ($U_{ИПАТ}$) соответственно.

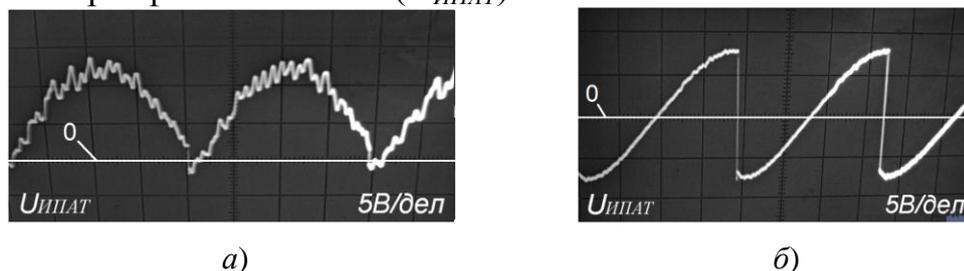


Рисунок 12 – Осциллограммы выходного напряжения однофазного ИПАТ при различной нагрузке СГ1: а) активная нагрузка $I = 45$ А; б) индуктивная нагрузка $I = 25$ А

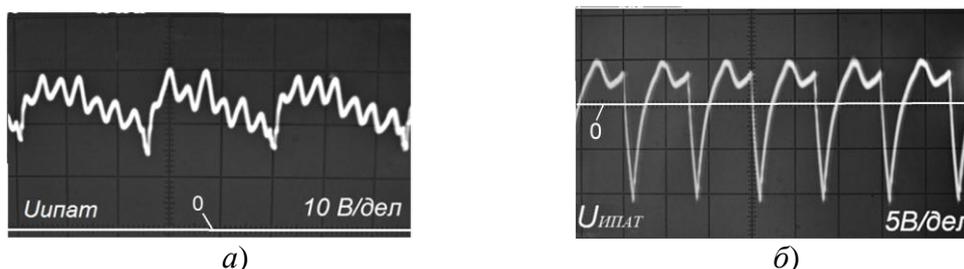


Рисунок 13 – Осциллограммы выходного напряжения трехфазного ИПАТ при различной нагрузке СГ1: а) активная нагрузка $I = 50$ А; б) индуктивная нагрузка $I = 25$ А

В целом, результаты эксперимента совпадают с теоретическими положениями о работе ИПАТ с ДИПТ и результатами их компьютерного моделирования. Наличие высокочастотных пульсаций напряжения $U_{ИПАТ}$ связано с неидеальной, отличной от синусоиды, формой вырабатываемого синхронным генератором напряжения, что влечёт за собой искажение формы и тока нагрузки СГ. В результате дифференцирования токов с помощью ДИПТ указанное искажение формы токов усиливается в кривой ЭДС ДИПТ. Полученные искажения сигнала и пульсации можно легко устранить с помощью фильтра нижних частот, подключенного к выходу ИПАТ.

Во втором этапе эксперимента был проделан ряд опытов по распределению активных нагрузок между параллельно работающими генераторами Г1 и Г2 с помощью однофазного и трехфазного УРАН с ДИПТ:

- перевод части нагрузки с одного нагруженного генератора на второй ненагруженный;
- включение (наброс) нагрузки на два ненагруженных генератора;
- отключение (сброс) нагрузки с двух нагруженных генераторов.

Графики переходных процессов этих опытов для трехфазного УРАН изображены на рисунке 15.

Осциллограммы переходных процессов на рисунке 15 носят аperiodический или колебательный, быстро затухающий характер. Наибольшее перерегулирование σ составляет около 40%, а длительность переходного процесса – около 4 секунд (рисунок 15, б). Все это говорит о достаточном запасе устойчивости и вы-

соком качестве переходных процессов в системе автоматического регулирования активной нагрузки СГ с ДИПТ.

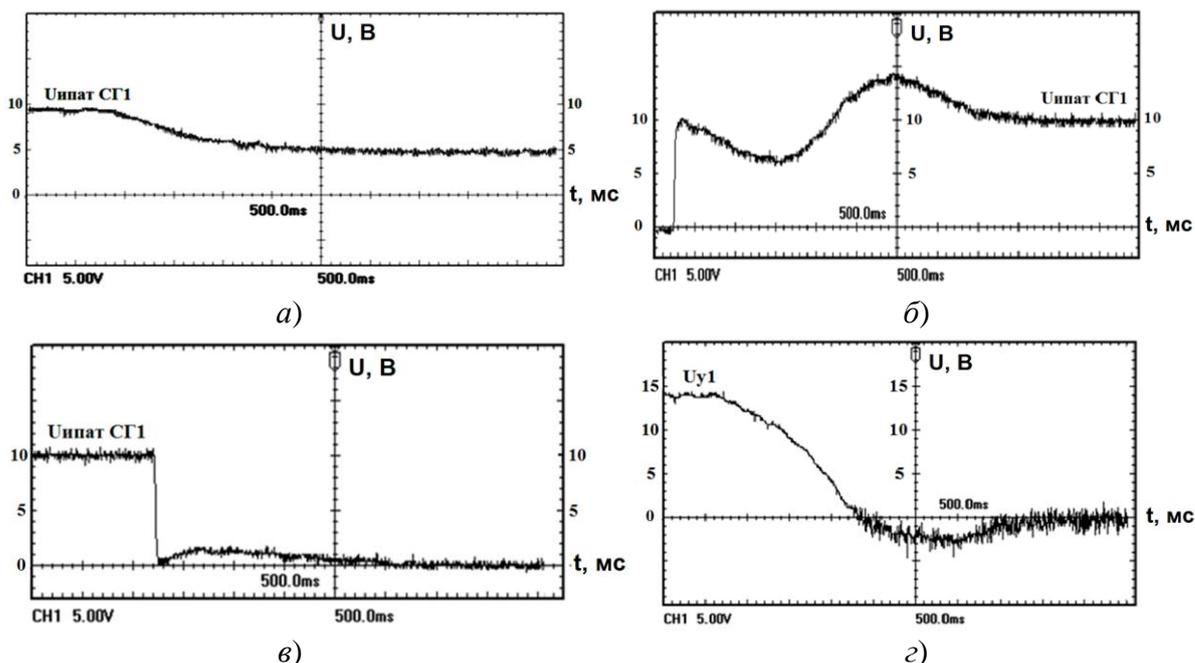


Рисунок 15 – Графики переходных процессов распределения активной нагрузки между СГ1 и СГ2 с трехфазным УРАН: выходное напряжения ИПАТ СГ1 при переводе нагрузки 7,5 кВт (а), набросе нагрузки 15 кВт (б) и сбросе нагрузки 15 кВт (в); выходное напряжение U1 при переводе нагрузки 12 кВт (г)

Проделанные опыты подтверждают работоспособность и достаточную точность однофазного и трехфазного УРАН с ДИПТ. Ошибка распределения нагрузок не превысила 10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационных исследований получены следующие основные результаты, имеющие научную новизну, научное и практическое значение и отличные от результатов, полученных другими авторами при использовании ТТ:

1. Разработаны электрические схемы однофазного и трехфазного измерительного преобразователя активного тока на основе ДИПТ без использования интегрирующих фильтров для УРАН судовых СГ. Предложенные ИПАТ с ДИПТ по сравнению с аналогичными ИПАТ, выполненными на основе ТТ, реализуют новую разновидность способа измерения активного тока источника и обеспечивают:

- снижение количества используемых элементов в схеме УРАН до двух раз;
- снижение массогабаритных характеристик элементов УРАН от двух до десяти и более раз, в зависимости от параметров тока и напряжения СЭЭС.
- снижение в десять и более раз погрешностей измерения, связанных с насыщением сердечника ТТ, которые могут привести к ухудшению в два и более раз точности работы ИПАТ и УРАН в целом.

Схема однофазного ИПАТ запатентована.

2. На основании проведенного анализа работы предложенных ИПАТ с ДИПТ при симметричной и несимметричной нагрузке СГ теоретически доказана способность ИПАТ с высокой точностью измерять активную составляющую тока нагрузки СГ, а также несимметричную нагрузку для трехфазного ИПАТ с ДИПТ. Максимально возможная теоретическая относительная погрешность таких ИПАТ может не превышать 0,1%.

3. Предложена конструкция и методика расчета ДИПТ на основе стандартного однофазного ленточного разрезного сердечника, которая значительно упрощает изготовление таких ДИПТ и позволяет использовать их в сетях с номинальным током менее 1 кА и напряжением до 1 кВ.

4. На основе разработанных схем ИПАТ с ДИПТ составлены компьютерные модели однофазного и трехфазного ИПАТ с ДИПТ, которые учитывают влияние внутренних сопротивлений обмоток ДИПТ и трансформатора напряжения. Результаты моделирования подтверждают теоретические положения о работе указанных ИПАТ с ДИПТ.

5. Изготовлен макет УРАН с ДИПТ и проведены экспериментальные исследования разработанных однофазного и трехфазного ИПАТ с ДИПТ, а также УРАН с ДИПТ при параллельной работе СГ. Результаты экспериментов подтверждают работоспособность и высокую точность однофазного и трехфазного УРАН с ДИПТ. Ошибка распределения нагрузок не превысила 10%, что вполне удовлетворяет требованиям Морского Регистра судоходства.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Рецензируемые научные журналы и издания перечня ВАК:

1. Комлев, А.В. Исследование однофазного измерительного преобразователя активного тока, выполненного на основе трансреакторов / А.В. Комлев, Г.Е. Кувшинов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность – 2013. – № 3. – С. 13-18. ISSN 1995-5685.

2. Комлев, А.В. Дифференцирующие измерительные преобразователи тока для релейной защиты и автоматики в сетях с напряжением до 1 кВ / А.В. Комлев, Д.Б. Соловьев // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2011. – № 4. – С. 65-69. ISSN 1990-5246.

Авторские свидетельства и патенты:

1. Патент РФ № 2518846. Комлев А.В., Кувшинов Г.Е., Мазалева Н.Н., Соловьев Д.Б. Устройство для измерения активного тока. Зарегистрировано в гос. реестре изобретений 09.04.2014; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.

Остальные наиболее значимые публикации:

1. Комлев, А.В. Выбор параметров и результаты экспериментального исследования измерительного преобразователя активного тока / И.А. Богодайко, М.А. Вертков, А.В. Комлев, Г.Е. Кувшинов // Материалы науч.-техн. конф. Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов. – Благовещенск: 2013.

2. Комлев, А.В. Расчет параметров дифференцирующих измерительных преобразователей тока для релейной защиты и автоматики в сетях с напряжением

до 1 кВ / А.В. Комлев, Г.Е. Кувшинов // Электрика. – 2011. – № 7. – С. 13-18. ISSN 1684-2472.

3. Комлев, А.В. Экспериментальное исследование однофазного измерительного преобразователя активного тока с дифференцирующими индукционными преобразователями тока / А.В. Комлев // Сб. материалов Международного научного форума студентов, аспирантов и молодых ученых стран Азиатско-Тихоокеанского региона, Ч. 1. – Владивосток: ДВФУ, 2012. – С. 324-328.

4. Комлев, А.В. Однофазный измерительный преобразователь активного тока / М.А. Вертков, А.В. Комлев, Г.Е. Кувшинов // Материалы науч. конф. Вологодские чтения, Вып. 81. – Владивосток: ДВФУ, 2012. – С. 150-153.

5. Комлев, А.В. Усовершенствование устройств распределения активных нагрузок синхронных генераторов / А.В. Комлев // сб. научных трудов Итоги диссертационных исследований, Т. 4. – Москва: РАН, 2012.

Комлев Антон Владимирович

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
АКТИВНЫХ НАГРУЗОК СУДОВЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Подписано в печать .08.2014. Формат 60×84 1/16

Усл. печ. л. Уч.-изд. л.

Тираж 120 экз. Заказ

Отпечатано в Дирекции публикационной деятельности ДВФУ

690990, г. Владивосток, ул. Пушкинская, 10