

На правах рукописи



ВАСИЛЬЕВ Алексей Сергеевич

**ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА
ВСЕРЕЖИМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
СТАТИЧЕСКИХ СИНХРОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетические системы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Боровиков Юрий Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Хрущев Юрий Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, профессор кафедры
электрических сетей и электротехники

Останин Андрей Юрьевич,
кандидат технических наук,
филиал ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири,
начальник службы перспективного развития

Ведущая организация:

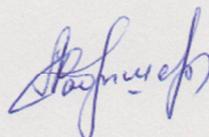
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Защита состоится 26 июня 2013 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» в ауд. 217 учебного корпуса 8 по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО НИ ТПУ по адресу 634050, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «24» мая 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.269.10
д.т.н., с.н.с.



А.В. Кабышев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В программе перспективного развития электроэнергетики на период до 2020 г., значительное внимание уделяется созданию активно-адаптивных электрических сетей, основой которых являются устройства FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System). Одним из устройств FACTS является статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ), содержащий статический преобразователь (СП) на полностью управляемых полупроводниковых вентилях. Применение СТАТКОМ позволяет решать задачи компенсации реактивной мощности, повышения пропускной способности линий электропередачи, быстродействующее непрерывное регулирование напряжения в нормальных и аномальных режимах работы сети, повышения устойчивости работы электроэнергетических систем (ЭЭС), оптимизации переходных режимов и другие задачи электроэнергетики. Кроме того, возможность осуществления СТАТКОМ векторного регулирования позволяет осуществлять симметрирование нагрузки, компенсацию высших гармоник и другие функции, влияющие на качество электроэнергии.

Различным аспектам решения этих задач посвящено множество работ отечественных и зарубежных ученых: Александров Г.Н., Бартоломей П.И., Воропай Н.И., Кочкин В.И., Мисриханов М.Ш., Розанов Ю.К., Ситников В.Ф., Шакарян Ю.Г., Akagi H., Hingorani N., Zhang X.-P. и др. При этом эксплуатируемые СТАТКОМ зачастую недоиспользуются по их функциональным возможностям по причине недостаточного анализа режимов и процессов в ЭЭС, определяющих условия работы силового оборудования и функционирования в этих условиях релейной защиты, технологической и противоаварийной автоматики. Для надежного и эффективного функционирования ЭЭС, содержащих СТАТКОМ, при проектировании, исследовании и эксплуатации необходимо решать множество задач требующих подробного моделирования этих устройств и ЭЭС в целом. Из этих задач можно выделить следующие: исследование устойчивости; разработка законов и алгоритмов локального и системного управления процессами и режимами их работы; тестирование устройств и систем автоматики в реальном времени.

Анализ режимов и процессов в ЭЭС при решении задач проектирования, исследования и эксплуатации осуществляется с помощью моделирования. С учетом непрерывности, высокого быстродействия и междофазного принципа действия СТАТКОМ, для решения указанных задач наиболее приемлемо осуществление трехфазного бездекомпозиционного моделирования, которое подразумевает исключение применяемых в средствах расчета режимов и процессов в ЭЭС упрощения и допущения: использование однолинейных схем замещения, разделение единого непрерывного спектра нормальных, аварийных и послеаварийных процессов на различные стадии и др.

Как показали многолетние исследования в Томском политехническом университете полное и достоверное воспроизведение процессов в трехфазном оборудовании и ЭЭС в целом обеспечивают гибридные (программно-технические) средства моделирования, сочетающие в себе достоинства цифрового, аналогового и физического способов моделирования.

Основной идеей в данной работе является моделирование функционирования СТАТКОМ и других устройств FACTS в составе ЭЭС гибридными средствами трехфазного бездекомпозиционного моделирования в реальном времени для решения задач проектирования, исследования и эксплуатации.

В связи с вышеизложенным **целью данной работы** является разработка и исследование программно-технических средств (ПТС) для непрерывного адекватного моделирования в реальном времени процессов в СТАТКОМ при их функционировании в составе энергосистемы в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

- разработка принципов и структуры построения ПТС бездекомпозиционного трехфазного непрерывного моделирования в реальном времени функционирования СТАТКОМ в составе ЭЭС;

- синтез физико-математической модели процессов в трехфазном силовом оборудовании и системы автоматического управления (САУ) СТАТКОМ, позволяющей осуществлять всережимное (без принципиально значимых упрощений и ограничений) бездекомпозиционное моделирование;

- разработка гибридного процессора СТАТКОМ (ГПС), обеспечивающего непрерывное и методически точное решение в реальном времени и на неограниченном интервале с гарантированной приемлемой инструментальной погрешностью жестких нелинейных систем дифференциальных уравнений трансформатора присоединения, сглаживающего реактора, фильтра, конденсаторной батареи и адекватное моделирование СП, а также всевозможные продольно-поперечные коммутации на выводах СТАТКОМ;

- разработка специализированного программного обеспечения для выполнения в реальном времени алгоритмов САУ, управления параметрами и структурами модели, наблюдения результатов моделирования и их преобразования с целью последующего анализа;

- проведение экспериментальных исследований разработанных ПТС моделирования СТАТКОМ в автономных режимах и в составе модели ЭЭС, подтверждающих достижение поставленной цели.

Объектом исследования являются процессы функционирования СТАТКОМ в составе ЭЭС.

Предметом исследования являются средства моделирования СТАТКОМ в составе ЭЭС.

Основные методы научных исследований: элементы дифференциального и интегрального исчислений, теория методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, линейная алгебра, теория линейных и нелинейных электрических цепей, теория автоматического регулирования и управления, методы математического моделирования, теория точности и чувствительности вычислительных устройств, схемотехника на интегральных микросхемах.

Научная новизна

1. Предложены принципы построения средств трехфазного всережимного моделирования в реальном времени СТАТКОМ и других устройств FACTS на их основе в ЭЭС.

2. Разработана структура специализированных ПТС реализации предложенных принципов моделирования СТАТКОМ в ЭЭС – гибридный процессор СТАТКОМ (ГПС).

3. Синтезирована универсальная бездекомпозиционная физико-математическая модель СТАТКОМ.

Практическая ценность

Разработаны функциональные схемы сопроцессоров ГПС, выполняющих непрерывное методически точное решение в реальном времени и на неограниченном интервале жестких нелинейных систем дифференциальных уравнений моделей трансформатора, реактора, фильтра, конденсаторной батареи (КБ) и физико-математическое взаимодействие с моделями СП, обеспечивающие возможность воспроизведения различных параметров, структур и режимов работы ПТС моделирования СТАТКОМ.

Разработанные ПТС моделирования СТАТКОМ позволяют:

- надежно и эффективно решать задачи проектирования, исследования и эксплуатации, связанные с определением мест установки и мощности СТАТКОМ в ЭЭС, с анализом режимов и процессов в них при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы этих устройств и ЭЭС в целом;

- разрабатывать и тестировать алгоритмы САУ СТАТКОМ и алгоритмы системного управления процессами и режимами, исследовать влияние СТАТКОМ на действие релейной защиты и автоматики ЭЭС;

- обеспечивать сопряжение с внешними устройствами для исследования их совместного функционирования, в том числе для решения задач тестирования в замкнутом цикле реальных станций управления СТАТКОМ, релейной защиты и автоматики энергосистем;

- осуществлять построение и разработку на базе ГПС программно-технических средств моделирования устройств FACTS, в том числе статических тиристорных компенсаторов, вставок и передач постоянного тока, объединенных регуляторов потоков мощности, для осуществления всережимного бездекомпозиционного моделирования в реальном времени процессов в этих устройствах и ЭЭС в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы в составе ЭЭС.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты анализа задачи и средств моделирования электроэнергетических систем, в состав которых входят СТАТКОМ и другие устройства FACTS.

2. Результаты разработки и обоснования принципов построения ПТС всережимного моделирования в реальном времени СТАТКОМ и реализующей их структуры.

3. Бездекомпозиционная модель СТАТКОМ и функциональные схемы средств реализации моделей трансформатора, реактора, фильтра и КБ.

4. Структура блока микропроцессоров и реализованное в нем программное обеспечение.

5. Результаты компьютерных и экспериментальных исследований разработанного ГПС, включая его функционирование в составе ЭЭС.

Достоверность полученных результатов подтверждается: использованием классических положений и законов теоретической электротехники и математики, приведенными результатами компьютерного моделирования ГПС и их сравнением с экспериментальными данными, корректностью выполнения теоретических построений и экспериментальных исследований.

Реализация результатов работы

- разработан экспериментальный образец ГПС и его специализированное программное обеспечение;

- проведены сопоставительные исследования режимов работы проектируемого энергокластера «Эльгауголь» в ОЭС Востока с управляемыми шунтирующими реакторами (УШР), КБ и СТАТКОМ согласно программе проверки проектных решений, выполненных в рамках договора между ЗАО «НОВИНТЕХ» и ТПУ № 2-496/2011у;

- выполнены исследования ПТС моделирования СТАТКОМ, предназначенные для использования при реализации проекта создания активно-адаптивной сети на территории МЭС Сибири в рамках инновационной программы ОАО «ФСК ЕЭС» в соответствии с договором между ОАО «НТЦ Электроэнергетики» и ТПУ № 7-584/10у;

- результаты исследований и разработки использованы при выполнении государственных контрактов: «Разработка методов и средств управления интеллектуальными энергосистемами на Всережимном моделирующем комплексе реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС)» №ГК 2.767С 2011; «Информационно-телекоммуникационная моделирующая система реального времени интеллектуальных энергосистем» № ГК 2.766С 2011.

Реализация результатов диссертационной работы подтверждена также актами внедрения.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах: всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (г. Томск, 2011 г.); международная научно-практическая конференция и выставка «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России». Релавэкспо-2012 (г. Чебоксары, 2012 г.); всероссийская молодежная конференция «Химическая физика и актуальные проблемы энергетики» (г. Томск, 2012 г.); международная научно-техническая конференция «Энергетика глазами молодежи» (г. Екатеринбург, 2012 г.); научно-практическая конференция «Актуальные

вопросы противоаварийного управления ОЭС Сибири» (г. Кемерово, 2012); научно-технические семинары кафедры ЭЭС 2011–2013 гг.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 6 печатных работ, в том числе две статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ. Получено положительное решение о выдаче патента на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 107 наименований и приложений. Объем работы – 149 страниц, включая 115 рисунков и 10 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цели и задачи исследований и разработок, отражена научная новизна, практическая ценность работы и другие основные характеристики работы.

В первой главе приведены результаты анализа возможных схем и особенностей работы СТАТКОМ с учетом САУ, на основе которых сформулированы требования к средствам их моделирования в составе ЭЭС.

Рассмотрены особенности численного моделирования, препятствующие адекватному воспроизведению процессов в ЭЭС, содержащих СТАТКОМ, а, следовательно, и успешному решению задач их проектирования, исследования и эксплуатации.

Отмечены ПТС моделирования: «Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем» (ВМК РВ ЭЭС), обеспечивающий, применительно к традиционным ЭЭС, требуемое трехфазное бездекомпозиционное моделирование в реальном времени и на неограниченном интервале всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных процессов в оборудовании и ЭЭС. Однако ВМК РВ ЭЭС не содержит аналогичных ПТС для моделирования СТАТКОМ и других устройств FACTS и поэтому не позволяют решать вышеназванные задачи.

На основе проведенного анализа предложены принципы построения средств трехфазного всережимного моделирования в реальном времени СТАТКОМ и других устройств FACTS на его основе в ЭЭС, удовлетворяющие предъявленным требованиям.

В соответствии с этими принципами основой ПТС моделирования СТАТКОМ является гибридный процессор. ГПС содержит цифро-аналоговые сопроцессоры трехфазного силового оборудования и цепи выпрямленного напряжения или тока (ЦВН), физические модели СП и продольно-поперечной коммутации, реализованные на цифруправляемых аналоговых ключах (ЦУАК). Воспроизведение потерь в СП осуществляется в сопроцессоре реактора или ЦВН путем управления их активными сопротивлениями. Гибридные сопроцессоры взаимодействуют между собой на математическом уровне или так же как со СП с помощью физико-математических связей посредством преобразователей напряжение-ток, в соответствии со схемой соединений конкретной установки СТАТКОМ. Кроме этого ГПС содержит

блок микропроцессоров (БМ) для осуществления информационно-управляющих функций, включающих алгоритмы САУ и алгоритмы коммутации, учитывающие, в частности, типы полупроводниковых (ПП) вентилялей.

В связи с ориентацией ПТС моделирования СТАТКОМ на применение в ВМК РВ ЭЭС, их реализация адаптирована для взаимодействия со структурой информационной системы данного комплекса, что позволяет в реальном времени осуществлять управление параметрами модели в составе ЭЭС, наблюдение за процессом моделирования и преобразование данных с целью их последующего анализа. Предложенные принципы применимы и для моделирования других устройств FACTS, основой которых является СП и быстродействующая САУ.

Во второй главе приведены результаты разработки и обоснования структуры ГПС, физико-математической модели и функциональных схем гибридных сопроцессоров силового оборудования СТАТКОМ. Основой для разработки послужили предложенные и рассмотренные в первой главе принципы построения средств моделирования СТАТКОМ, анализ нормальных и аномальных режимов его работы в ЭЭС и его базовая принципиальная схема, представленная на рисунке 1.

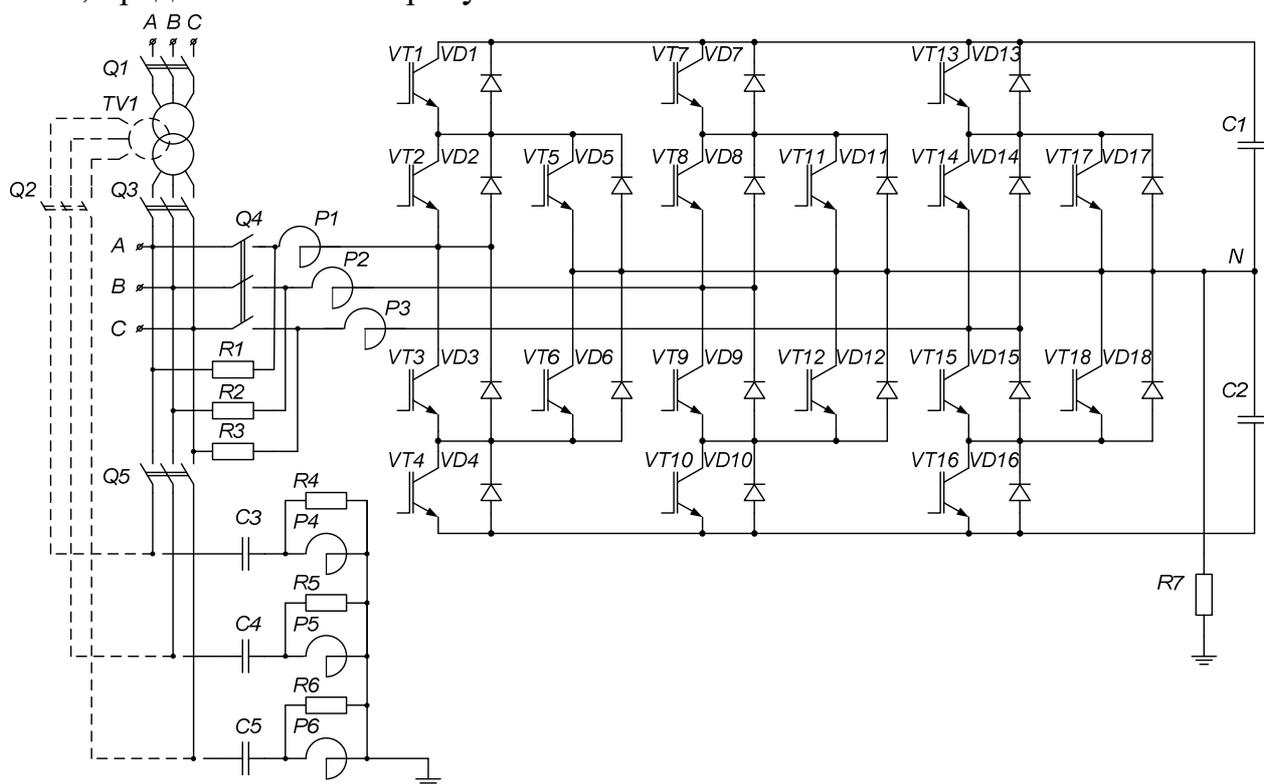


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема СТАТКОМ с трехуровневым СП на полностью управляемых ПП вентилях

Структура разработанного ГПС, представленная на рисунке 2, содержит гибридные сопроцессоры трансформатора (ГСТ), фильтра (ГСФ), реактора (ГСР), цепи выпрямленного напряжения (ГСЦВН) и физическую модель СП на ЦУАК, с помощью которых воспроизводятся и продольно-поперечные коммутации на выводах СТАТКОМ. Сопроцессоры обеспечивают непрерывное

Синтезированная универсальная физико-математическая модель включает в себя обозначенную ранее систему жестких нелинейных дифференциальных уравнений (1–4), идентичных для всех фаз, а также физические модели СП, ЦПрК и ЦПоК.

Всерезимные математические модели трансформатора (1), фильтра (2), ректора (3), КБ в ЦВН (4) образуют системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{T1A}}{dt} = \frac{1}{L_{T1A}} \left(U_{T1A} - R_{T1A} \cdot i_{T1A} - \frac{d\Psi_{TA1}}{dt} \right); \\ \frac{di'_{T2A}}{dt} = \frac{1}{L'_{T2A}} \left(-U'_{T2A} - R'_{T2A} \cdot i'_{T2A} + \frac{d\Psi_{TA1}}{dt} \right); \\ \frac{di'_{T3A}}{dt} = \frac{1}{L'_{T3A}} \left(-U'_{T3A} - R'_{T3A} \cdot i'_{T3A} + \frac{d\Psi_{TA1}}{dt} \right); \\ i_{\mu_{A0.e.}} = i_{1A} - i'_{2A} - i'_{3A}; \\ \Psi_T(t) = \frac{k_1 i_{T\mu}(t)}{k_2 + k_3 |i_{T\mu}(t)|} + k_4 i_{T\mu}(t), \end{array} \right. (1) \left\{ \begin{array}{l} \frac{dU_{CFA}}{dt} = \frac{1}{C_{FA}} i_{CFA}; \\ i_{RFA} = i_{CFA} - i_{LFA}; \\ U_{RFA} = i_{RFA} R_{FA}; \\ \frac{di_{LFA}}{dt} = \frac{1}{L_{FA}} (U_{RFA} - i_{LFA} R_{LFA}); \\ U_{A2} = U_{RFA} + U_{FN} + U_{CFA}, \end{array} \right. (2)$$

$$\frac{di_{RA}}{dt} = \frac{1}{L_{RA}} (U_{TA2} - U_{SA} - i_{RA} R_{RA}) \quad (3) \quad \left\{ \begin{array}{l} i_{CSj} = \frac{1}{R_{Sj}} (U_{SN} - U_{CSj}); \\ \frac{dU_{CSj}}{dt} = \frac{1}{C_{Sj}} i_{CSj}, \end{array} \right. (4)$$

где i_{TiA} , i_{TAi} – ток i -тых обмотки и фазный ток трансформатора;
 U_{TAi} , U_{TiA} – фазные напряжения и напряжения на i -тых обмотках трансформатора;

R_{TAi} , L_{TAi} – сопротивления и индуктивности i -тых обмоток трансформатора;

W_{TiA} – число витков i -ой обмотки;

Ψ_{A1} – потокосцепление первичной обмотки трансформатора;

$i_{\mu A}$ – ток намагничивания трансформатора;

k_i – коэффициенты, определяющие форму характеристики намагничивания трансформатора;

R_{LFA} , L_{FA} – активное сопротивление и индуктивность реактора фильтра;

C_{FA} – емкости конденсаторных батарей фильтра;

R_{FA} – активные сопротивления резисторов фильтра;

i_{CFA} , i_{RFA} , i_{LFA} – ток КБ, резистора и индуктивности фильтра;

U_{CFA} , U_{RFA} – напряжения на конденсаторе и резисторе фильтра;

U_{SA} – фазное напряжение СП;

i_{RA} – ток реактора;

L_{RA} – индуктивность токоограничивающего реактора;

R_{RA} – суммарное сопротивление в фазах СТАТКОМ, равное сумме активных сопротивлений реактора, пускового токоограничивающего резистора и сопротивления, эквивалентирующего потери в вентильной фазе СП;

i_{CSj} – ток j -ой конденсаторной батареи;

R_{Sj} , C_{Sj} – эквивалентное сопротивление в цепи j -ой КБ и ее емкость;

U_{Sj} – напряжения на полюсах СП. Для моделирования источника напряжения или накопителя энергии большой емкости напряжение U_{Sj} формируется по алгоритмам, разрабатываемым для конкретных электрических установок.

На основе анализа возможных САУ определены их базовые алгоритмы. В общем случае САУ СТАКОМ содержат контур регулирования выпрямленного напряжения, контур регулирования реактивной мощности (PM) и контур регулирования напряжения в точке присоединения. Обычно регуляторы в контурах регулирования имеют пропорционально-интегральную структуру.

Синтезированная универсальная физико-математическая модель позволяет непрерывно и бездекомпозиционно воспроизводить в реальном времени и на неограниченном интервале реальный спектр процессов функционирования СТАКОМ.

Разработанные функциональные схемы сопроцессоров ГПС, иллюстрируемые для одной фазы, приведены на рисунках 3, 4,

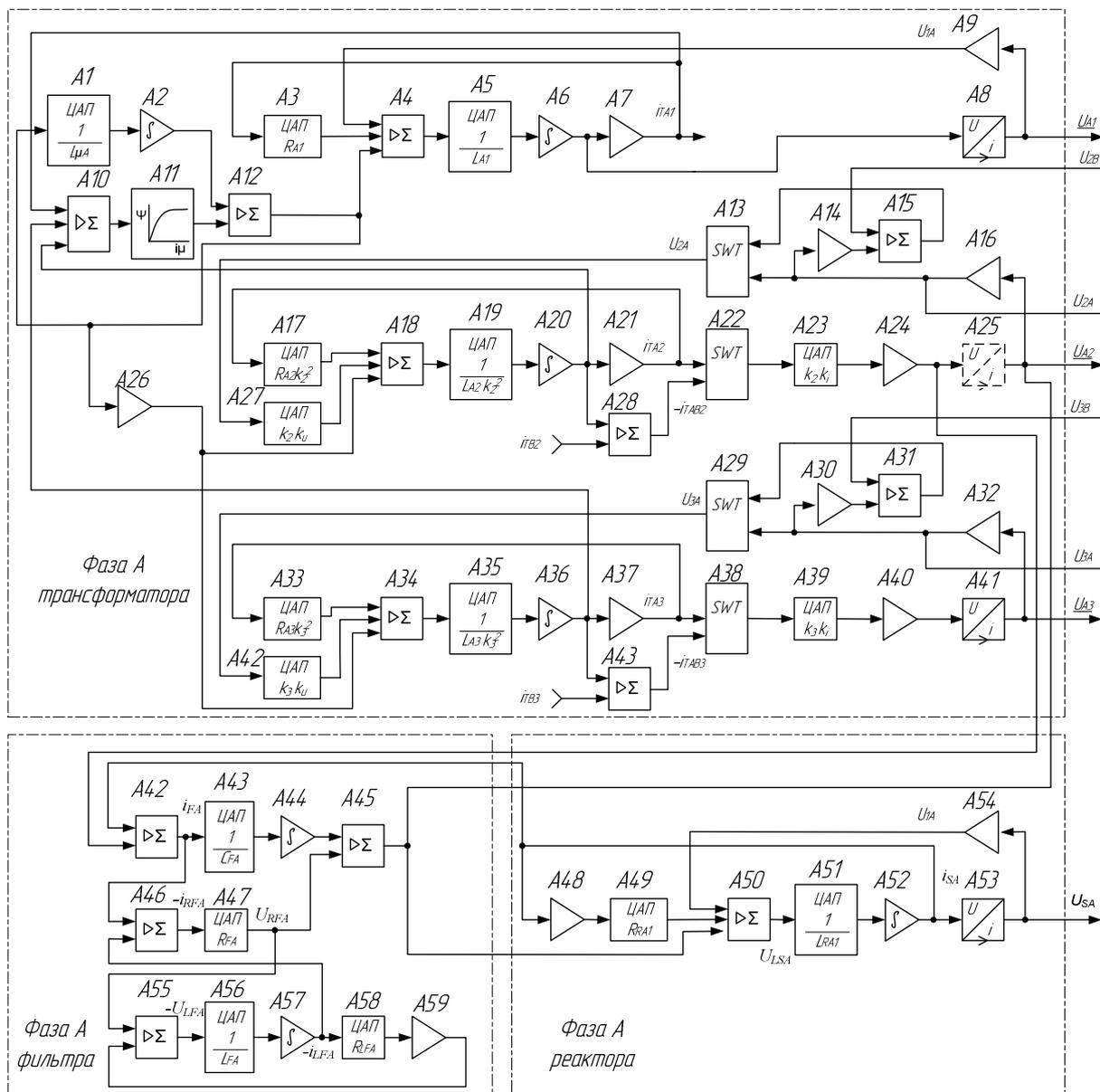


Рис. 3. Функциональная схема реализации моделей трансформатора, фильтра и реактора фазы А СТАКОМ

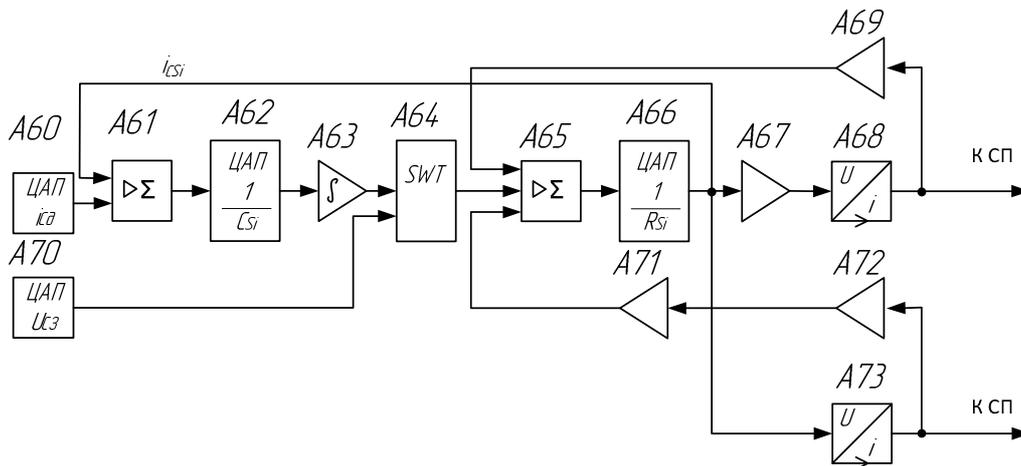


Рис. 4. Функциональная схема реализации модели цепи выпрямленного напряжения, содержащей конденсаторную батарею

где $k_{Ti} = \frac{W_{1A} W_{iA0}}{W_{iA} W_{1A0}}$ – коэффициент трансформации относительно нулевой отпайки;

W_{iA0} – число витков i -ой обмотки фазы А трансформатора на нулевой отпайке;
 L_{Ai}, R_{Ai} – приведенные к первичной стороне индуктивность и сопротивление i -ой обмотки трансформатора на нулевой отпайке;

k_u, k_i – коэффициенты изменения базисов по напряжению и по току;

$i_{сд}$ – добавочный ток КБ для решения исследовательских задач;

$U_{сз}$ – задание напряжения при моделировании различных накопителей энергии;

SWT – переключатель.

Созданные на основе математического описания и структуры ГПС функциональные схемы сопроцессоров обеспечивают непрерывное методически точное решение в реальном времени на неограниченном интервале жестких нелинейных систем дифференциальных уравнений моделей трансформатора, реактора, фильтра и КБ или другого накопителя энергии в ЦВН и физико-математическое взаимодействие с моделями СП, а также возможность воспроизведения различных параметров, структур и режимов работы ПТС моделирования СТАТКОМ.

В третьей главе рассмотрена реализация ПТС моделирования СТАТКОМ: гибридных сопроцессоров, БМ, специализированного программного обеспечения и пользовательского интерфейса. Приведены результаты исследований ПТС моделирования на адекватность воспроизведения процессов в СТАТКОМ в широком диапазоне структур, параметров и частот.

Представлена также принципиальная схема функционального преобразователя А11 (рисунок 3), обеспечивающего непрерывное широкополосное воспроизведение нелинейной зависимости, реализующей характеристику кривой намагничивания трансформатора (рисунок 5) в соответствии с аппроксимирующим выражением

$$\Psi(t) = \frac{\frac{R_7}{R_5} i_\mu(t)}{\frac{1}{A} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} + \frac{i_\mu(t) \left(\frac{R_1}{R_1 + R_{VD1}} - \frac{R_2}{R_2 + R_{VD2}} \right)}{SF}} + \frac{R_7}{R_6} i_\mu(t), \quad (5)$$

где A – коэффициент усиления, SF – задаваемая величина масштабирования; R_1 – R_7 , R_{VD1} , R_{VD2} – варьируемые и задаваемые сопротивления в схеме функционального преобразователя.

При этом максимальное значение сигнала на выходе управляемо общим коэффициентом передачи схемы и соотношением сопротивлений R_7 и R_5 , наклон в области насыщения – соотношением R_7 и R_6 , а наклон на начальном участке – соотношением сопротивлений R_3 и R_4 .

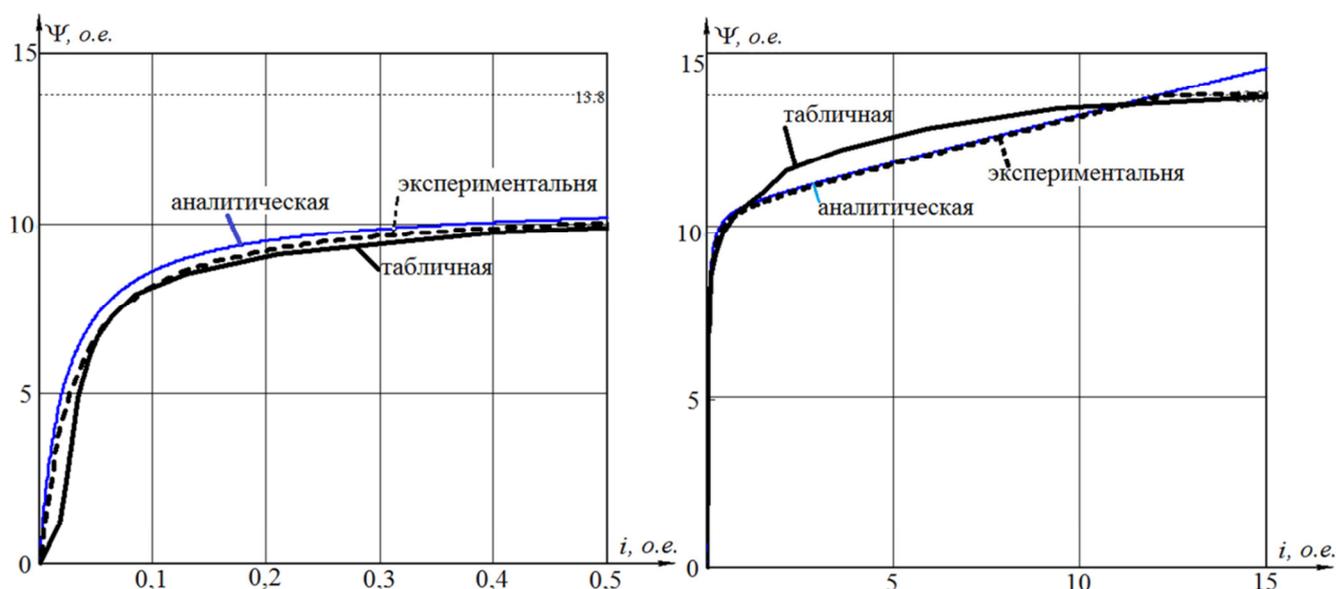


Рис. 5. Характеристики функционального преобразователя, воспроизводящего заданную таблично кривую намагничивая

Частотные свойства схемы ГСР иллюстрируют амплитудно-частотные (АЧХ) и фазо-частотные характеристики (ФЧХ), снятые при различных параметрах модельных индуктивностей L' реактора (рисунок 6). Характеристики сняты для сопротивления 11,8 Ом (2 о.е.) при различных индуктивностях реактора. Подъем ЛФЧХ на частотах выше 10 кГц обусловлен частотными свойствами применяемой интегральной микроэлектронной элементной базы.

Логарифмические частотные характеристики ГСР соответствуют аналитическим в диапазоне частот не менее 10 кГц. Аналогичные данные получены и представлены в данной главе для всех сопроцессоров ГПС.

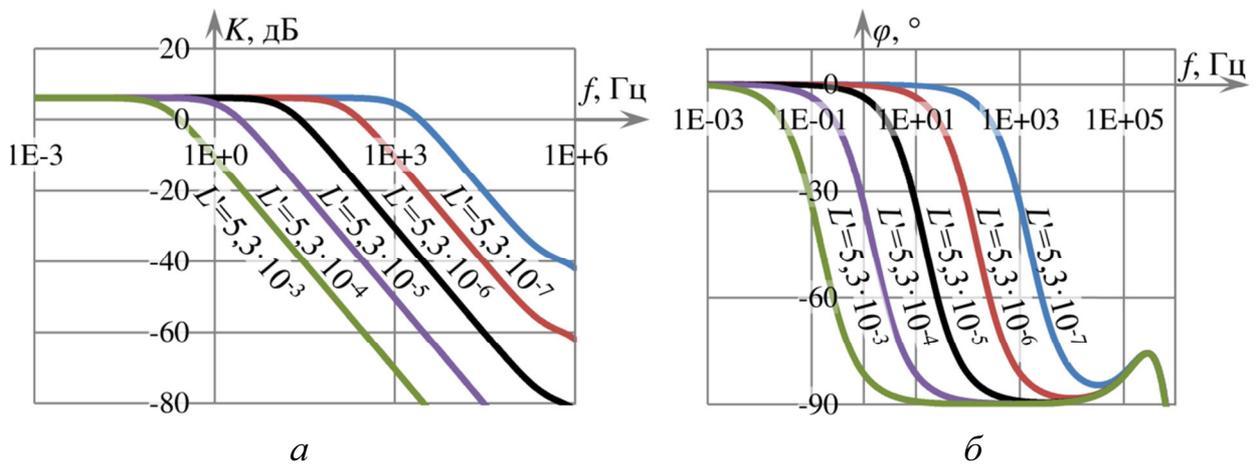


Рис. 6. АЧХ (а) и ФЧХ (б) сопроцессора реактора при изменении индуктивности

БМ разработанного ГПС имеет многопроцессорную структуру, между процессорами которой распределены информационно-управляющие функции. В частности БМ содержит процессор АЦП и САУ, а также процессор коммутации, в которых реализованы базовые алгоритмы САУ СТАТКОМ. Блок-схема алгоритмов разработанных программ приведены на рисунках 7, 8.

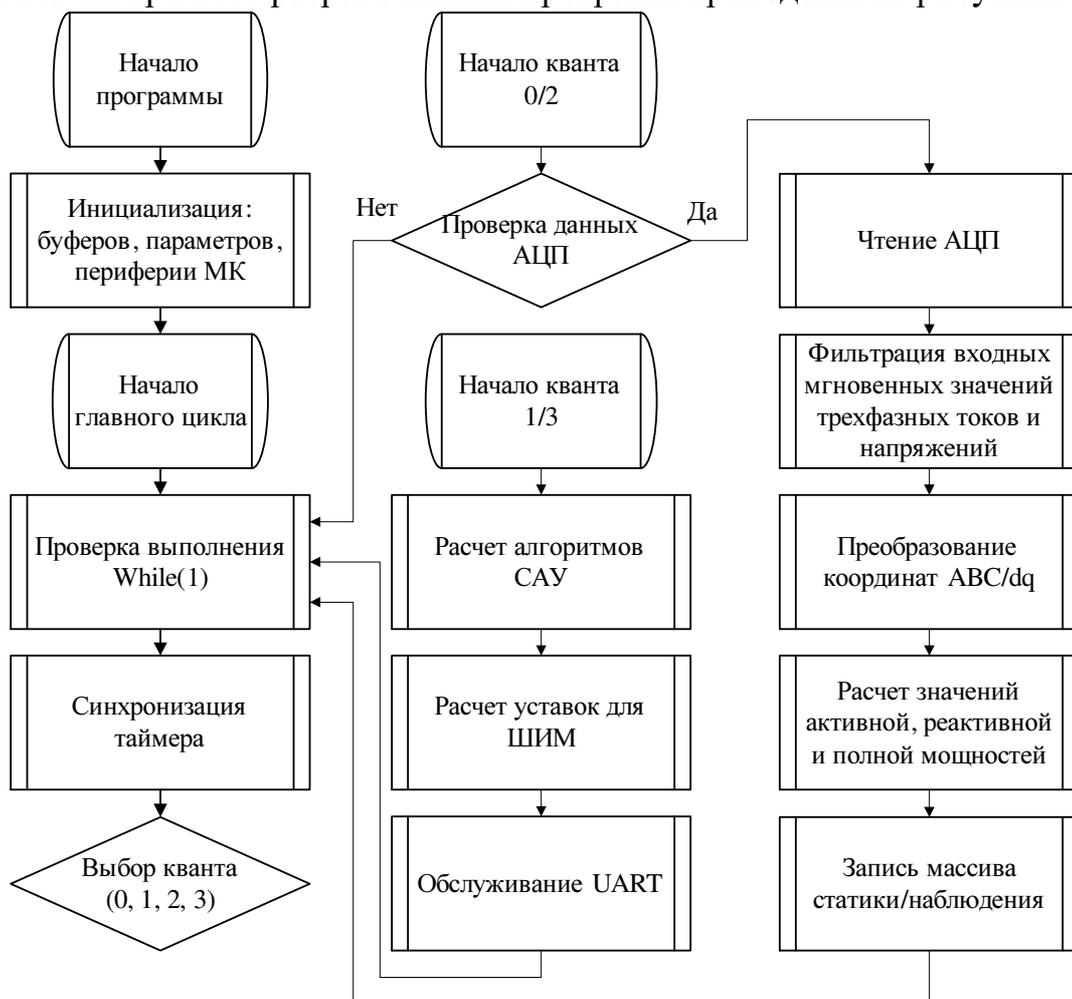


Рис. 7. Блок-схема алгоритма программы процессора АЦП и САУ

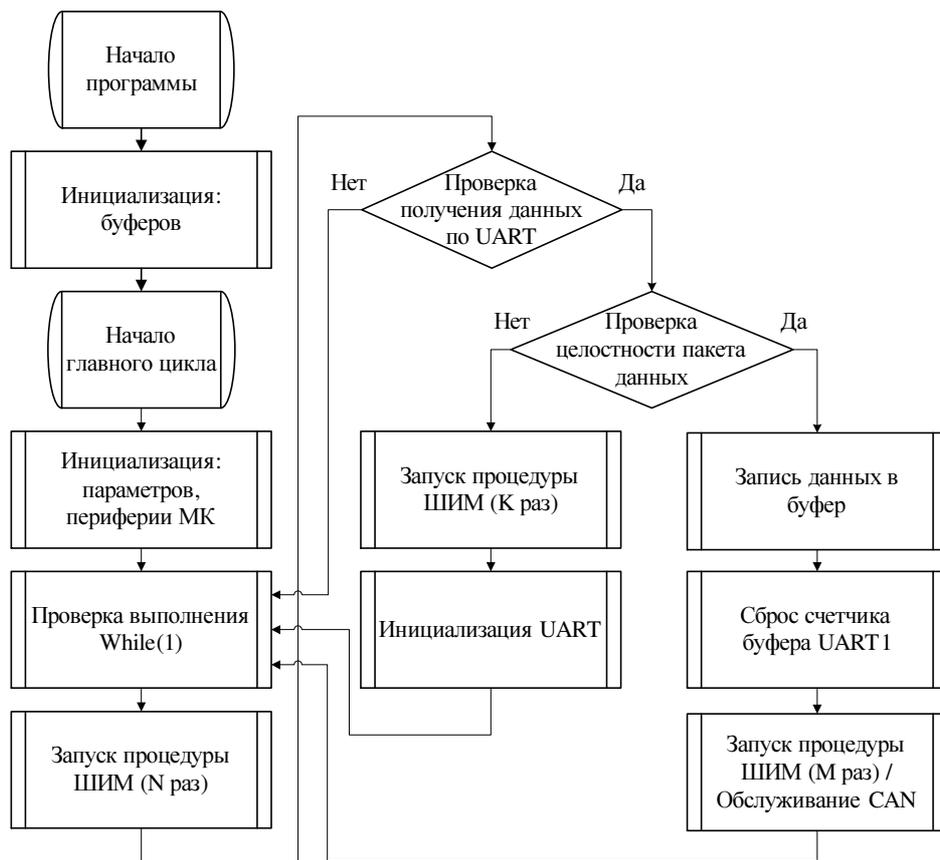


Рис. 8. Блок-схема алгоритма программы процессора коммутации

Для управления и наблюдения в реальном времени параметрами моделируемого СТАТКОМ разработан пользовательский интерфейс, содержащий формы представления модели для схемы силового оборудования (рисунок 9) и для САУ СТАТКОМ.

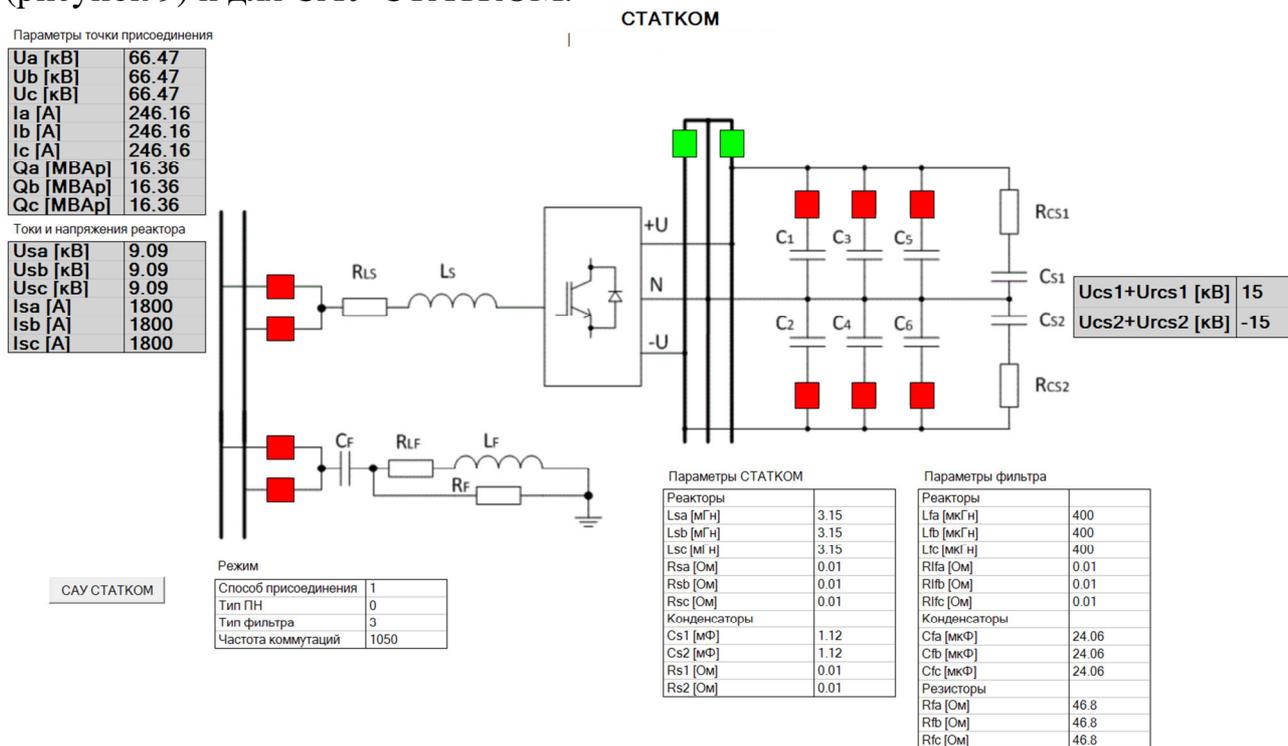


Рис. 9. Форма представления модели силовой схемы СТАТКОМ

В четвертой главе приведены результаты исследования модели СТАТКОМ в автономном режиме работы и в составе ЭЭС.

Автономные экспериментальные исследования ПТС моделирования СТАТКОМ проведены при следующих условиях и упрощениях:

- 1) напряжение сети синусоидальное, симметричное и не зависит от нагрузки;
- 2) в модели силового оборудования заданы симметричные по трем фазам и по плечам СП параметры;
- 3) цепь выпрямленного напряжения замещена двумя идеальными источниками напряжения с одинаковыми параметрами.

Установка режима работы СП проводилась замещением выходных сигналов САУ величинами ортогональных составляющих желаемого результирующего вектора напряжения СП, представленных во вращающейся dq -системе координат. Ортогональные составляющие подвергались преобразованию из dq -системы координат в ABC с последующим применением алгоритмов обратного преобразования координат для осуществления ШИМ.

На рисунке 10 приведены осциллограммы фрагмента исследования, подтверждающие адекватность работы ГПС в режиме генерации РМ.

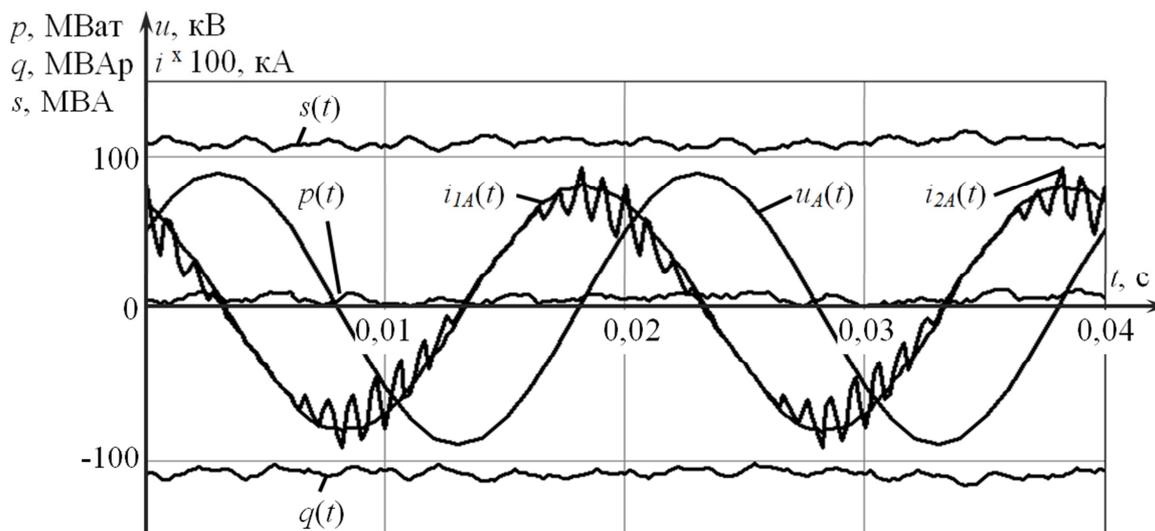


Рис. 10. Осциллограммы сигналов ПТС моделирования СТАТКОМ в режиме генерации реактивной мощности

Полученные для ряда фиксированных значений амплитуды вектора напряжения СП статические диаграммы мощности приведены на рисунке 11. Пунктирной линией изображена диаграмма мощности, рассчитанная аналитически по выражению

$$S = 3 \frac{U_C U_S}{X_{LS}} \sin(\alpha) - j3 \left(\frac{U_C U_S}{X_{LS}} \cos(\alpha) - \frac{U_C^2}{X_{LS}} \right) = P - jQ.$$

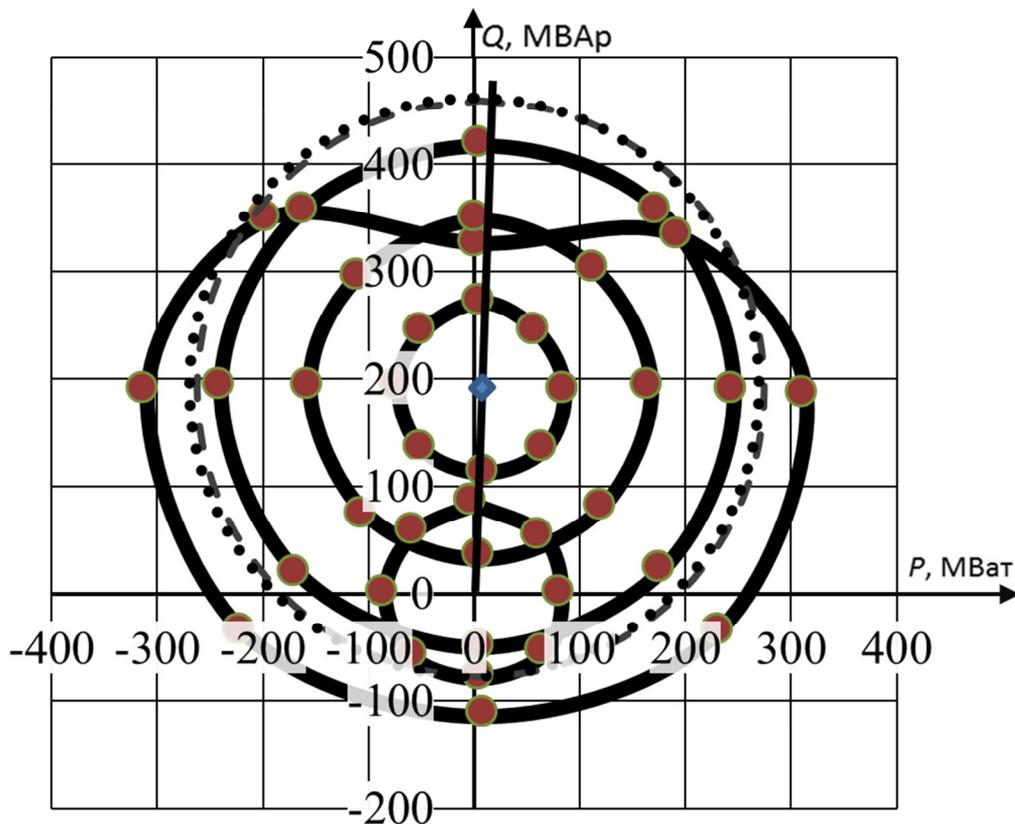


Рис. 11. Диаграммы мощности СП

Центр диаграмм мощности соответствует мощности короткого замыкания на землю на выводах реактора со стороны СП. Характеристика с наибольшим радиусом соответствует предельному значению задаваемой амплитуды напряжения на стороне переменного тока СП.

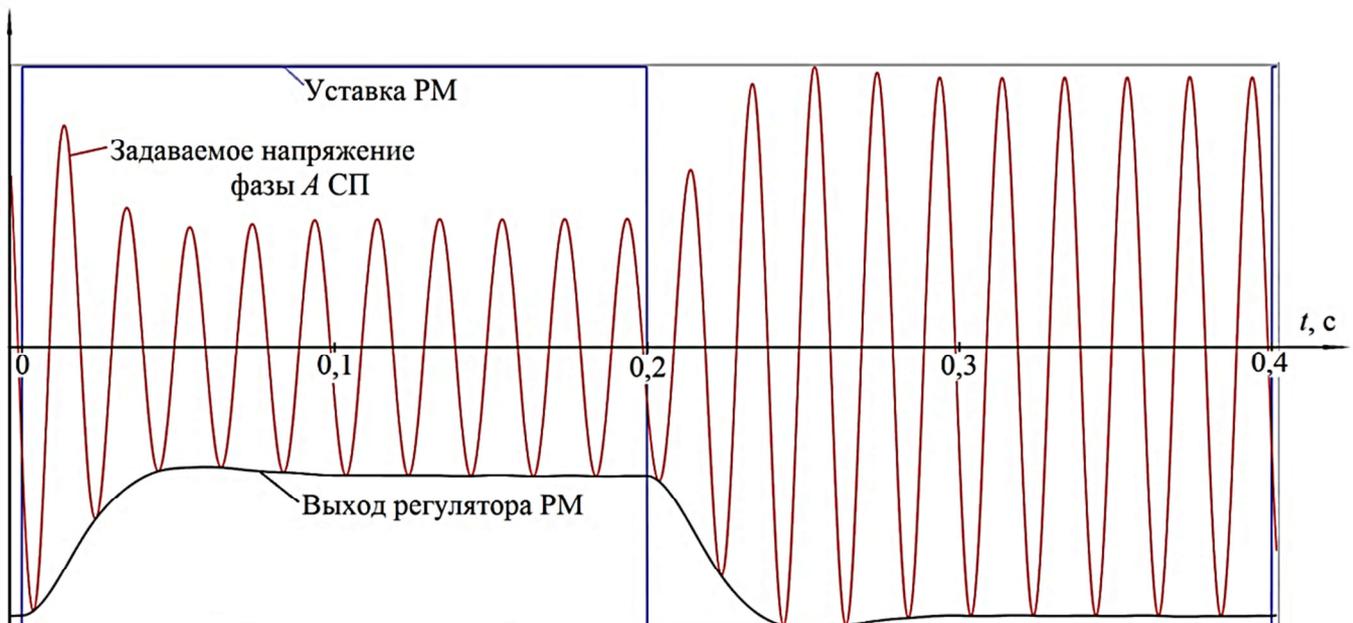


Рис. 12. Сигналы в контуре регулирования реактивной мощности

Результаты экспериментальных исследований в составе тестовой трехфазной модели ЭЭС подтверждают адекватность работы базовых алгоритмов САУ. При этом минимальное время реверса РМ ГПС составило два периода сетевой частоты (рисунок 12), что позволяет исследовать влияние

СТАТКОМ на процессы и режимы в ЭЭС и соответствует натурным данным. Кроме этого приведены результаты исследования контура регулирования напряжения в точке присоединения.

Экспериментальные исследования ПТС моделирования СТАТКОМ в составе модели ЭЭС (модели энергокластера «Эльгауголь» с прилегающей частью ОЭС Востока) проведены для режимов: непрерывного изменения нагрузки; наброса и сброса нагрузки (рисунок 13); короткого замыкания (КЗ) на нагрузке с последующим ее отключением (рисунки 14–16).

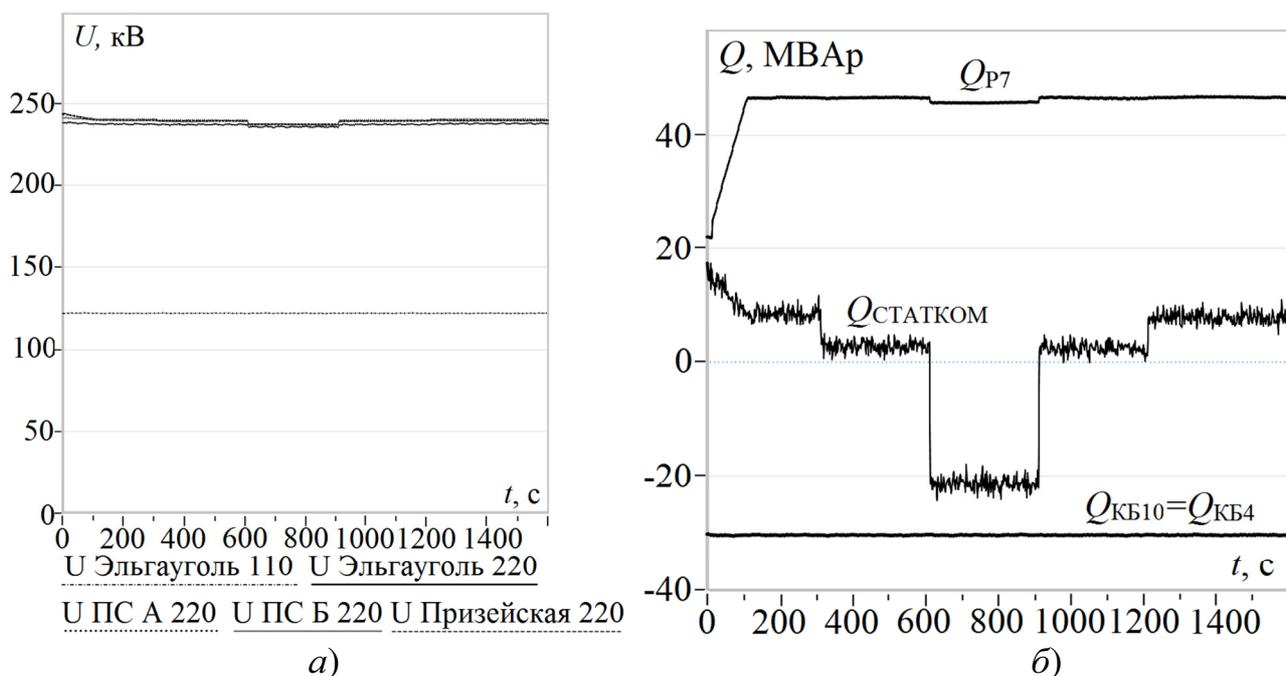


Рис. 13. Напряжения на шинах 110 и 220 кВ (а) и мощности средств компенсации РМ в ЭЭС (б) в режиме ступенчатого изменения мощности нагрузки

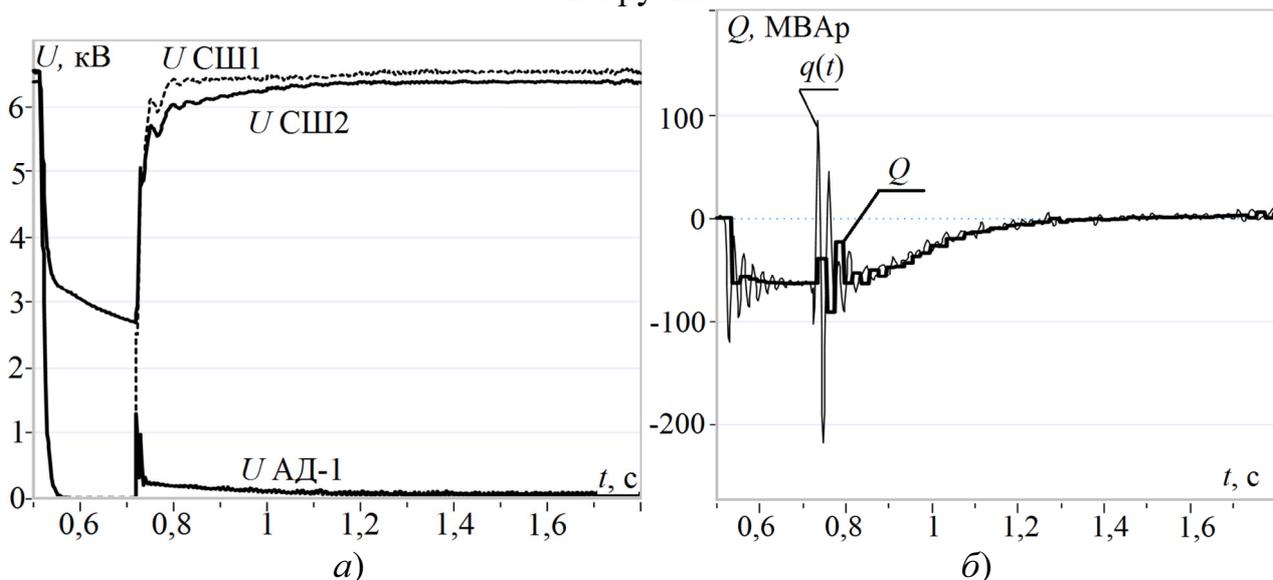


Рис. 14. Осциллограммы напряжений на шинах ПС Промплощадка (а) и мощность СТАТКОМ (б) в режиме КЗ на нагрузке

При использовании СТАТКОМ в режиме наброса и сброса нагрузки не возникает длительных провалов напряжений и перенапряжений. Высокое быстродействие СТАТКОМ позволяет в режиме КЗ снижать провалы напряжения, а в послеаварийном режиме позволяет быстрее восстановить напряжение на шинах, что повышает устойчивость работы двигательной нагрузки.

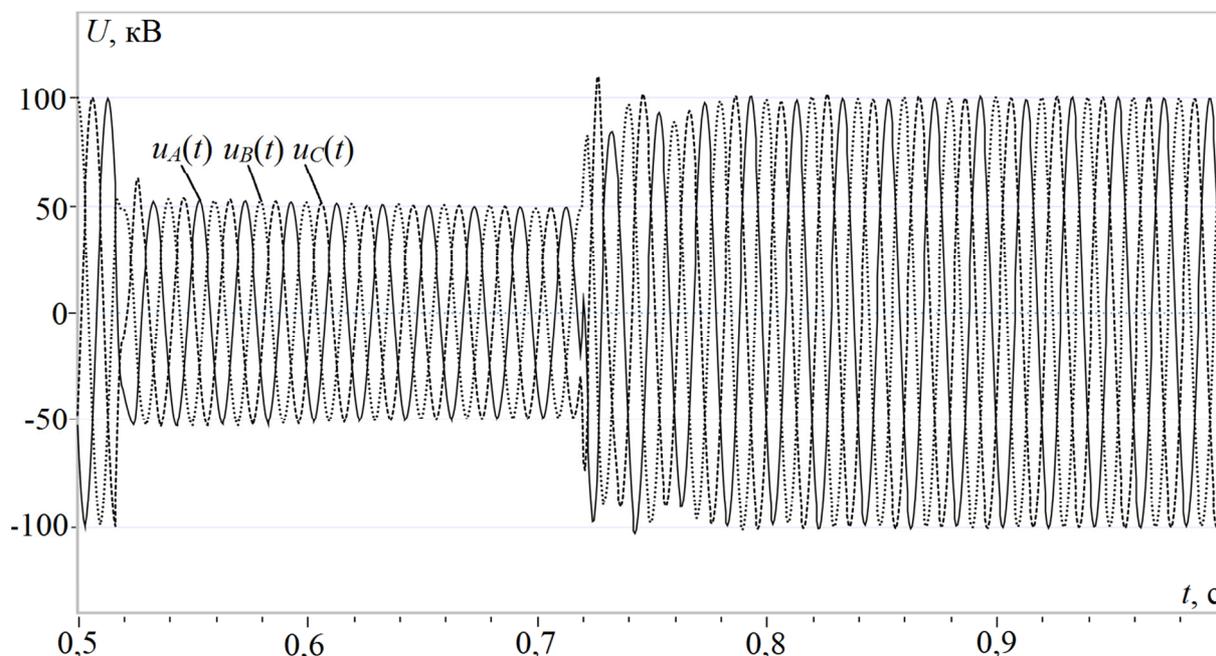


Рис. 15. Осциллограммы напряжений в точке присоединения СТАТКОМ в режиме КЗ

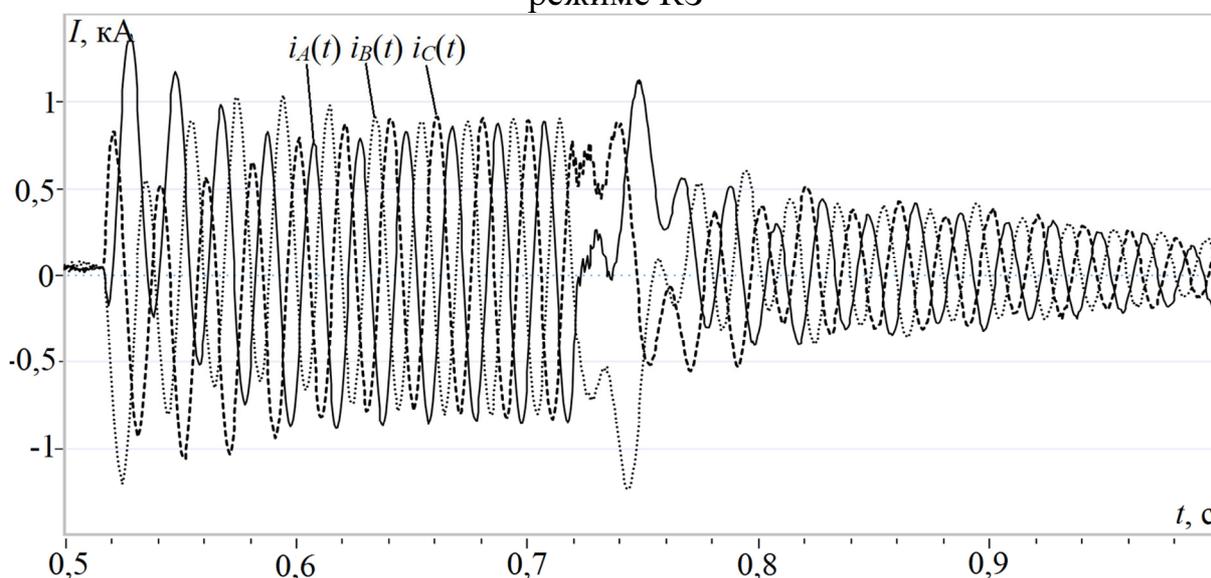


Рис. 16. Осциллограммы токов СТАТКОМ в режиме КЗ

Результаты экспериментальных исследований показывают, что разработанные ПТС моделирования СТАТКОМ обеспечивают адекватное бездекомпозиционное моделирование в составе трехфазной модели ЭЭС функционирования СТАТКОМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты выполненной работы, обеспечившие достижение поставленной в диссертационной работе цели – создание программно-технических средств всережимного бездекомпозиционного моделирования в реальном времени статических синхронных компенсаторов в составе реальных энергосистем при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы, заключаются в следующем:

1. Предложены принципы построения средств трехфазного всережимного моделирования в реальном времени статических синхронных компенсаторов и других устройств FACTS на его основе в ЭЭС.

2. Разработана структура реализации предложенных принципов построения программно-технических средств всережимного непрерывного моделирования в реальном времени СТАТКОМ, образующая гибридный процессор.

3. Синтезирована универсальная физико-математическая модель СТАТКОМ, достаточно полно и достоверно отражающая весь значимый спектр процессов в оборудовании СТАТКОМ и его функционирование в ЭЭС.

4. Разработаны функциональные схемы гибридных сопроцессоров трансформатора присоединения, сглаживающего реактора, фильтра и накопителя энергии, а также модельных физических реализаций статического преобразователя и продольно-поперечных коммутаторов трехфазных выходов СТАТКОМ. Гибридный процессор, реализованный по функциональным схемам, обеспечивает непрерывное и методически точное решение в реальном времени и на неограниченном интервале с гарантированной приемлемой инструментальной погрешностью жестких нелинейных систем дифференциальных уравнений, трансформатора, реактора, фильтра и конденсаторной батареи, а также адекватное воспроизведение коммутационных процессов СП и продольно-поперечного коммутатора.

5. Разработано специализированное программное обеспечение для БМ ГПС, Сервера ВМК ВР ЭЭС и пользовательский интерфейс, позволяющие осуществлять моделирование в реальном времени САУ СТАТКОМ, управление параметрами и структурами модели, наблюдение результатов моделирования и функциональные преобразования данных.

6. Выполнено компьютерное моделирование работы принципиальных схем всех сопроцессоров и СП ГПС, а также экспериментальные исследования автономного режима работы СТАТКОМ, результаты которых, в целом, подтверждают адекватность моделирования процессов в силовом оборудовании.

7. Проведены экспериментальные исследования разработанных ПТС моделирования СТАТКОМ в составе ВМК ВР ЭЭС, результаты которых свидетельствуют о достижении полноты и достоверности моделирования, а также наличии свойств и возможностей, необходимых для надежного и эффективного решения задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС, содержащих СТАТКОМ.

8. Проведенные дополнительные сопоставительные исследования моделирования ЭЭС с сетью электроснабжения, содержащей СТАТКОМ или УШР, КБ, иллюстрируют адекватность моделирования СТАТКОМ в ЭЭС и возможность обеспечения при его использовании более высоких показателей качества электроэнергии и устойчивости работы двигательной нагрузки.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ (2 шт):

1. Боровиков Ю.С., Васильев А.С., Гусев А.С. Программно-технические средства всережимного моделирования в реальном времени статического синхронного компенсатора // *Электричество*, 2012. – №. 6 – С. 29-33;
2. Васильев А.С., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О. Специализированный гибридный процессор для всережимного моделирования в реальном времени статического синхронного компенсатора // *Известия ТПУ*, 2012. –Т. 321, №4 – С. 101–106.

Материалы трудов конференций (5 шт):

3. Васильев А.С. Разработка модели статического синхронного компенсатора реактивной мощности для всережимного моделирования в реальном масштабе времени / *Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: Материалы трудов XVII Всероссийской научно-технической конференции – Томск, 7–9 декабря 2011. – Томск: СПБ Графикс, 2011. – с. 14–17;*
4. Боровиков Ю.С., Прохоров А.В., Васильев А.С., Лутовинов С.В. Инженерно-исследовательская платформа средств построения, анализа и эксплуатации интеллектуальных энергосистем / *Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России: Сборник тезисов докладов. Релавэкспо-2012, международная научно-практическая конференция и выставка – Чебоксары, 17-20 апреля 2012. – с. 102–108;*
5. Васильев А.С. Программно-технические средства всережимного моделирования устройств FACTS / *Химическая физика и актуальные проблемы энергетики: материалы Всероссийской молодежной конференции – Томск, 4–6 сентября 2012 г. – с. 61–62;*
6. Васильев А.С., Боровиков Ю.С., Прохоров А.В. Специализированные гибридные процессоры для всережимного моделирования в реальном времени устройств FACTS / *Энергетика глазами молодежи: Научные труды III международной научно-технической конференции – Екатеринбург, 22-26 октября 2012 г. – Т. 1 – с. 156–161.*

Заявка на изобретение: Устройство для моделирования статического синхронного компенсатора. МПК (2012) G06G7/62 № 2012124175.

Личное участие автора. Основные результаты работы, связанные с разработкой и исследованием моделей и средств их реализации, получены лично автором. В части программного обеспечения участие автора ограничено разработкой алгоритмов и программ периферийных процессоров, включая систему автоматического управления и пользовательский интерфейс.