

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Обухов С.Г.** Метод моделирования механических характеристик ветротурбин малой мощности. — Альтернативная энергетика и экология, 2011, № 1.

2. **Обухов С.Г., Сурков М.А., Хошнау З.П.** Методика выбора ветроэнергетических установок малой мощности. — Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2011, № 2.

*Авторы: Лукутин Борис Владимирович окончил в 1971 г. ТПИ. Докторскую диссертацию «Режимы работы синхронных и асинхронных генераторов микрогидроэлектростанций» защитил в 1994 г. Заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий ТПУ.*

*Обухов Сергей Геннадьевич окончил в 1985 г. ТПИ. Кандидатскую диссертацию «Динамические режимы работы автономного машинно-вентильного источника питания для микроГЭС» защитил в 1989 г. Доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий ТПУ.*

*Шутов Евгений Алексеевич окончил в 1986 г. ТПИ. Кандидатскую диссертацию «Динамические режимы работы индукционной машины двойного питания» защитил в 1990 г. Доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий ТПУ.*

*Хошнау Зана Пешанг Халил окончил магистратуру ТПУ в 2008 г. Аспирант ТПУ.*

\* \* \*

## Программно-технические средства моделирования в реальном времени статического синхронного компенсатора<sup>1</sup>

БОРОВИКОВ Ю.С., ВАСИЛЬЕВ А.С., ГУСЕВ А.С.

*Приведены результаты разработки трехфазной динамической модели статического синхронного компенсатора и средств реализации модели, позволяющей непрерывно в реальном времени и на неограниченном интервале воспроизводить процессы в двухуровневом статическом синхронном компенсаторе.*

**Ключевые слова:** интеллектуальные энергосистемы, электрические сети, статический синхронный компенсатор, математическая модель

Одним из основных элементов планируемых активно-адаптивных электрических сетей (ААС) является статический синхронный компенсатор реактивной мощности (СТАТКОМ), который служит также базой для других устройств FACTS [1]. Масштабное внедрение в электрические сети технологий и быстродействующих устройств FACTS на основе силовой полупроводниковой (ПП) электроники, непрерывно функционирующих в нормальных аварийных и послеаварийных режимах работы энергосистем, существенно изменяет свойства электрических сетей и энергосистем, особенно динамические, и, соответственно, условия работы силового оборудования, средств релейной защиты (РЗ), технологической и противоаварийной автоматики (ПА). В результате значительно усложняются задачи проектирования, исследования и эксплуата-

*Results from development of a three-phase dynamic model of a static synchronous compensator and tools for implementing this model are presented. The developed model makes it possible to continuously simulate processes in a two-level static synchronous compensator in real time and on an unlimited interval of time.*

**Key words:** intellectual power systems, electric networks, static synchronous compensator, mathematical model

ции таких энергосистем, а в последующем и создаваемых на их основе интеллектуальных энергосистем (ИЭС). Для решения этих сложных и нетрадиционных задач необходимы отвечающие им средства расчета режимов и процессов в ИЭС с ААС.

С учетом отмеченной специфики устройств FACTS, ААС и ИЭС решение указанных задач при их проектировании, исследовании и эксплуатации необходимы средства, обеспечивающие трехфазное бездекомпозиционное непрерывное моделирование в реальном времени и на неограниченном интервале процессов, происходящих в оборудовании и ИЭС с ААС, при возможных режимах их работы. Средства всережимного моделирования в реальном времени традиционных энергосистем, представляющие собой специализированную многопроцессорную программно-техническую систему гибридного типа, рассмотрены в [2]. Для решения задач проектирования, исследования и эксплуатации устройств FACTS, ААС и ИЭС эта система должна быть дополнена соответствующими программ-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2013 годы» ГК № 07.514.11.4075.

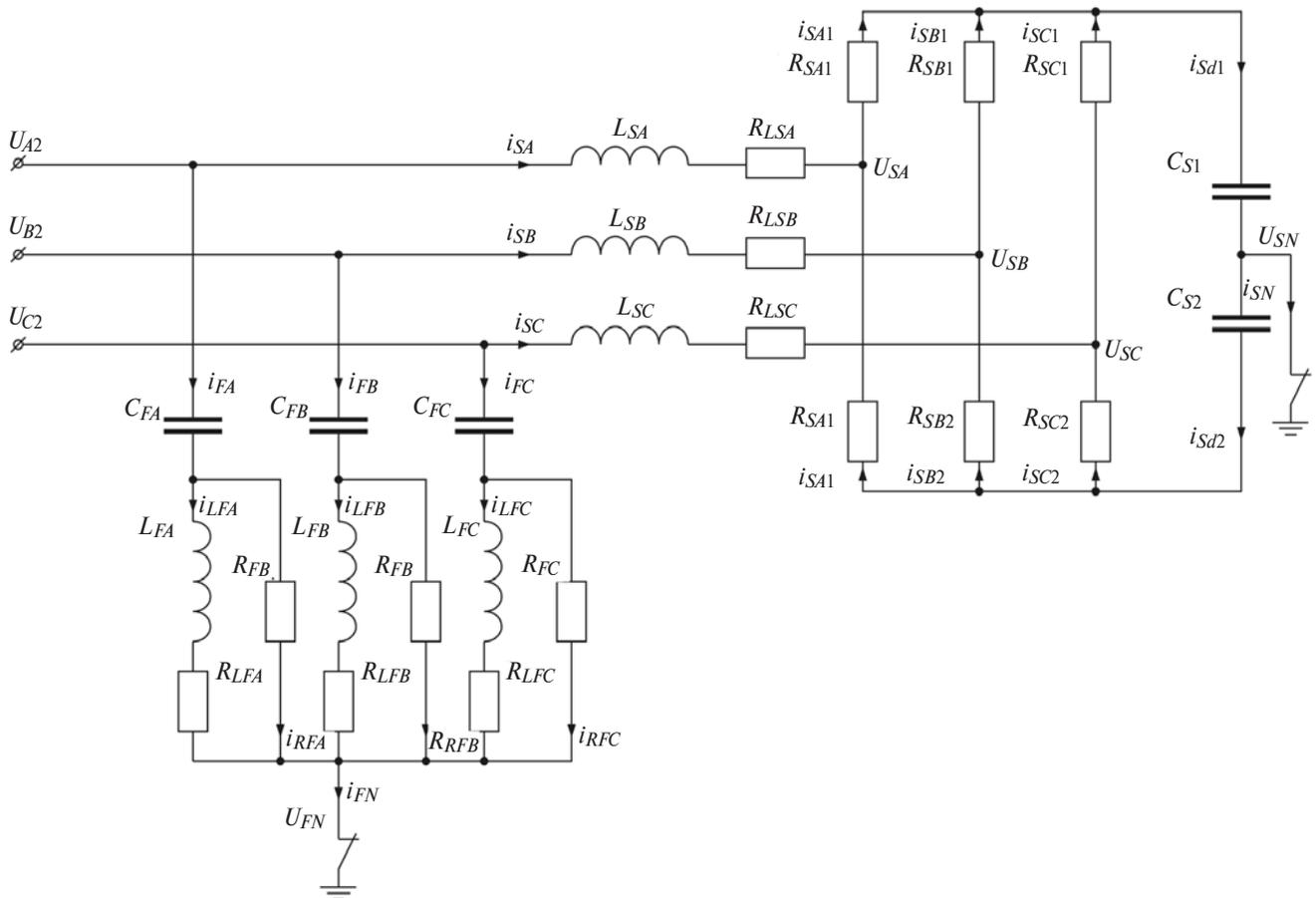


Рис. 1. Схема замещения двухуровневого статического синхронного компенсатора реактивной мощности с фильтром нижних частот

но-техническими средствами всережимного моделирования в реальном времени устройств FACTS.

В статье рассмотрены результаты разработки такого рода средств для моделирования СТАТКОМ с двухуровневым преобразователем напряжения (ПН) [3].

Его схема замещения представлена на рис. 1, на которой  $U_{x2}$  – напряжение соответствующей фазы  $x = A, B, C$  вторичной обмотки трансформатора присоединения;  $L_{Fx}, R_{LFx}$  – индуктивности и активные сопротивления реакторов фильтра нижних частот (ФНЧ);  $C_{Fx}, R_{Ffx}$  – емкости и активные сопротивления ФНЧ;  $L_{Sx}, R_{LSx}$  – индуктивности и активные сопротивления токоограничивающих реакторов;  $C_{S1}, C_{S2}$  – емкости конденсаторных батарей (КБ) на стороне выпрямленного напряжения;  $R_{Sx1}, R_{Sx2}$  – нелинейные сопротивления, которыми реализуются вольт-амперные характеристики (ВАХ) полупроводниковых ключей.

Первичная обмотка трансформатора, от которого СТАТКОМ подключается к сети, обычно соединена в звезду, а обмотка низкого напряжения в звезду или треугольник. При использовании СТАТКОМ в качестве последовательного компенсатора или в составе объединенного регулятора потоков мощности первичная обмотка включается в

сеть последовательно. Третья обмотка (при ее наличии) чаще всего соединяется в треугольник и является компенсирующей. С учетом возможных вариантов схем соединения обмоток уравнения для всережимной математической модели трансформатора имеют вид:

$$\frac{di_{T1x}}{dt} = \frac{1}{L_{T1x}} \frac{\partial}{\partial i} U_{1x} - R_{T1x} i_{T1x} - W_{T1x} \frac{d\Phi_x}{dt} \frac{\partial}{\partial i}$$

$$\frac{di_{Tix}}{dt} \Big|_{i=2, \dots, n} = \frac{1}{L_{Tix}} \frac{\partial}{\partial i} U_{ix} - R_{Tix} i_{Tix} + W_{Tix} \frac{d\Phi_x}{dt} \frac{\partial}{\partial i}$$

$$F_{Tx} = \sum_{i=1}^n W_{Tix} i_{Tix};$$

$$\Phi_x = k_n F_{Tx},$$

где  $i_{Tix}$  – ток в  $i$ -й обмотке фазы  $x$ ;  $L_{Tix}$  – индуктивность  $i$ -й обмотки фазы  $x$ ;  $U_{ix}$  – напряжение на  $i$ -й обмотке фазы  $x$ , равное фазному при соединении обмоток в звезду, линейному при соединении в треугольник или разности напряжений на концах обмоток при последовательном включении в сеть;  $R_{Tix}$  – сопротивление  $i$ -й обмотки фазы  $x$ ;  $W_{Tix}$  – число витков  $i$ -й обмотки соответствующей фазы  $x$ ;  $\Phi_x$  – поток, обусловленный токами фазы  $x$ ;  $F_{Tx}$  – результирующая МДС электромагнитной системы

трансформатора;  $n$  – число обмоток трансформатора;  $k_H$  – нелинейный коэффициент взаимосвязи  $\Phi_X$  и  $F_{TX}$ , определяемый кривой намагничивания.

Фильтр нижних частот может быть выполнен или только на конденсаторах, или содержать последовательно соединенные реакторы и конденсаторы, настраиваемые в резонанс на частоту коммутации ПП ключей; реакторы могут шунтироваться сопротивлениями. С учетом этого процессы, протекающие в фильтре, могут быть описаны системой уравнений:

$$i_{FX} = i_{TX2} - i_{SX}; \quad \frac{dU_{CFX}}{dt} = \frac{I}{C_{FX}} i_{FX};$$

$$i_{RFX} = i_{FX} - i_{LFX}; \quad U_{RFX} = i_{RFX} R_{FX};$$

$$U_{LFX} = U_{RFX} - U_{RLFX}; \quad \frac{di_{LFX}}{dt} = \frac{1}{L_{FX}} U_{LFX};$$

$$U_{RLFX} = i_{LFX} R_{LFX}; \quad U_{X2} = U_{FN} + U_{CFX} + U_{RFX},$$

где  $i_{TX2}$  – фазный ток трансформатора;  $U_{CFX}$  – напряжения на конденсаторах;  $U_{LFX}$ ,  $U_{RLFX}$  – напряжения на индуктивностях и активных сопротивлениях реакторов ФНЧ;  $U_{RFX}$  – напряжения на активных сопротивлениях ФНЧ.

Совокупная всережимная математическая модель рассмотренного СТАТКОМ соответствует системе уравнений:

$$U_{LSX} = U_{X2} - U_{SN} - U_{RLSX} - U_{SX1} - U_{Sd1};$$

$$\frac{di_{SX}}{dt} = \frac{1}{L_{SX}} U_{LSX};$$

$$U_{RLSX} = i_{SX} R_{LSX};$$

$$i_{SX1} = i_{SX} + i_{SX2};$$

$$U_{SX1} = i_{SX1} R_{SX1};$$

$$U_{SX2} = -U_{Sd1} - U_{Sd2} - U_{SX1};$$

$$i_{SX2} = \frac{U_{SX2}}{R_{SX2}};$$

$$i_{Sdj} = i_{SAj} + i_{SBj} + i_{SCj};$$

$$\frac{dU_{Sdj}}{dt} = \frac{1}{C_{Sj}} i_{Sdj},$$

где  $U_{RLSX}$ ,  $U_{LSX}$  – напряжения на активных сопротивлениях и индуктивностях токоограничивающих реакторов;  $U_{Sxj}$  – напряжения на ПП ключах ПН, соединенных с положительной клеммой КБ при  $j=1$ , с отрицательной при  $j=2$ ;  $U_{Sdj}$  – напряжения на КБ.

Совокупность вышеуказанных свойств и возможностей, которыми должны обладать программ-

но-технические средства для реализации модели, определяется следующими принципами ее построения:

для методически точного непрерывного решения в реальном времени и на неограниченном интервале жесткой нелинейной системы дифференциальных уравнений применяется непрерывное неявное их интегрирование;

для обеспечения возможных видов автоматизированного и автоматического изменения и управления параметрами и коэффициентами математической модели, а также представления, преобразования и отображения управлений и результатов моделирования используется цифроаналоговое и аналогово-цифровое преобразование информации;

для исключения принципиальных ограничений наращивания размерности моделируемых ИЭС, адекватного осуществления всевозможных трехфазных продольно-поперечных коммутаций, обеспечения возможности подключения при необходимости различных модельных элементов и др. входные-выходные трехфазные математические переменные преобразуются в соответствующие им модельные токи (соответственно, напряжения), а всережимные математические модели всех элементов, включая СТАТКОМ, объединяются на модельном физическом уровне согласно топологии моделируемой ИЭС;

для реализации алгоритмов управления ПП ключами ПН и законов управления СТАТКОМ, а также различных функциональных преобразований информации и др. используется современная микропроцессорная техника и IT-технологии.

Структура разработанных в соответствии с этими принципами программно-технических средств всережимного моделирования в реальном времени СТАТКОМ представлена на рис. 2.

Система дифференциальных уравнений решается в вычислительном блоке (ВБ), который включает: вычислительный блок решения уравнений трансформатора (ВБТ), фильтра нижних частот (ВБФНЧ), токоограничивающих реакторов (ВБР) и СТАТКОМ (ВБС). Полученные в результате решения непрерывные математические переменные токов и напряжений оцифровываются в блоке многоканального аналого-цифрового преобразования (БМАЦП) для их программного осциллографирования, осуществления алгоритмов и законов управления СТАТКОМ, а также различных функциональных преобразований и представлений.

Все эти программные функции реализуются в блоке микропроцессоров (БМ), состоящем из центрального микропроцессора и периферийных микроконтроллеров. Центральный микропроцессор

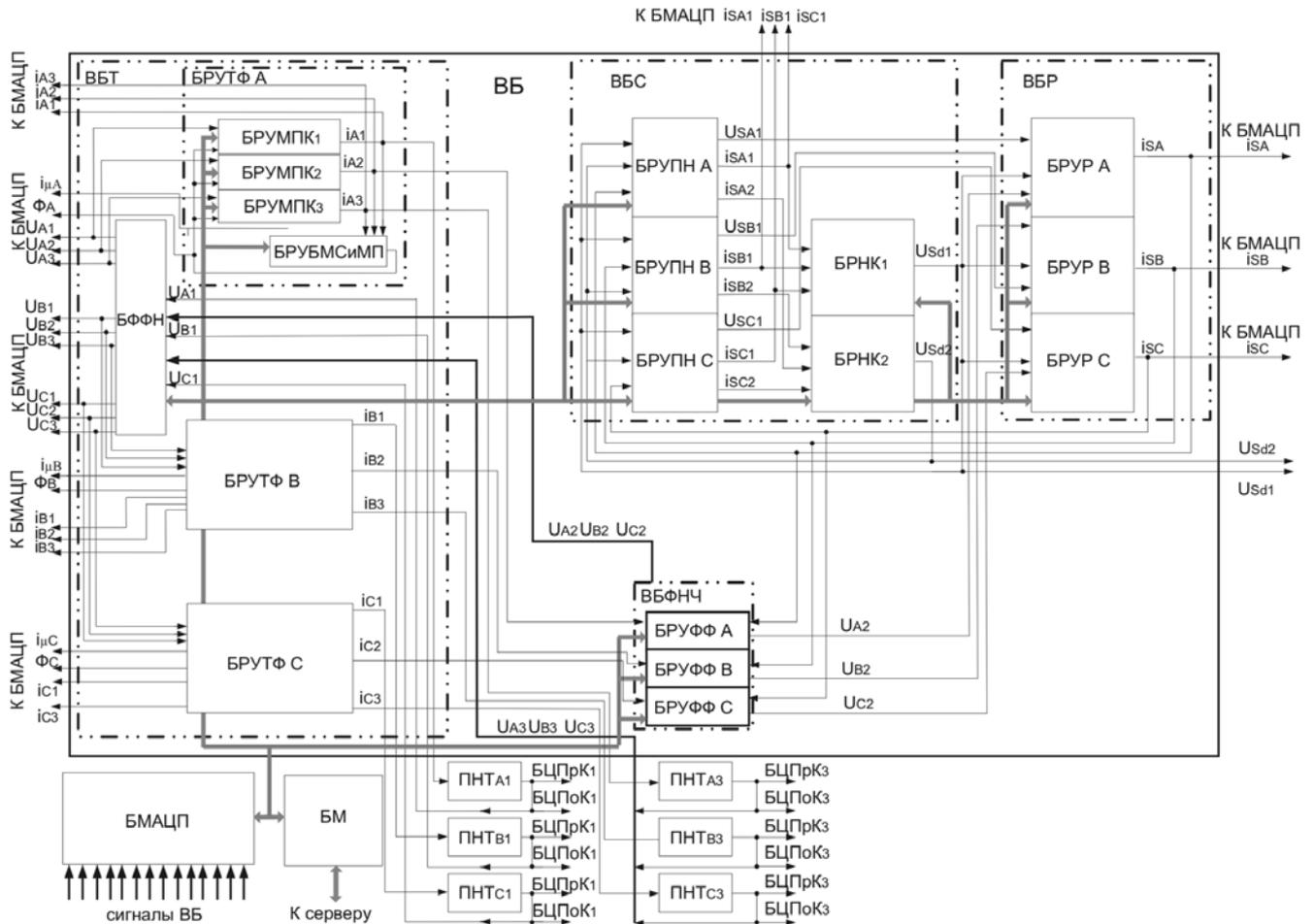


Рис. 2. Структурная схема программно-технических средств всережимного моделирования статического синхронного компенсатора реактивной мощности

служит для связи с сервером ранее указанной многопроцессорной системы, синхронизации работы периферийных микроконтроллеров, управления параметрами ВБТ, моделирования технологической и ПА и др. Периферийные микроконтроллеры реализуют системы регулирования и РЗ, а также управления параметрами ВБС, ВБР, ВБФНЧ и состояниями блоков цифруправляемой продольной (БЦПрК) и поперечной (БЦПоК) трехфазной коммутации. Преобразование трехфазных математических переменных в соответствующие им модельные токи (соответственно, напряжения) осуществляется интегральными микроэлектронными преобразователями «напряжение—ток» (ПНТ).

Блоки решения уравнений, входящие в состав вычислительных блоков структурной схемы (рис. 2), обозначены: БРУР — блоки решения уравнений реакторов; БРУПН — блоки решения уравнений ПН; БРНК — блоки решения напряжений конденсаторов; БРУФФ — блоки решения уравнений ФНЧ; БФФН — блок формирования фазных напряжений; БРУБМС и МП — блоки решения уравнений баланса МДС и расчета магнитного по-

тока; БРУМПК — блоки решения уравнений магнитосвязанных потоком контуров; блоки БРУБМС и МП, БРУМПК объединены в блоки расчета уравнений трансформатора (БРУТ).

Разработанные программно-технические средства, помимо решения указанных выше задач моделирования, полностью адаптивны для использования в составе обозначенной многопроцессорной системы всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика оценки технико-экономической эффективности применения устройств FACTS в ЕНЭС России // Прил. 1 к распоряжению от 22.01.2009 №22р. — М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2009.
2. Гусев А.С., Хрушев Ю.В., Гуринов С.В. и др. Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем. — Электричество, 2009, №12.
3. Шейко П.А., Балыбердин Л.Л., Мазуров М.И., Николаев А.В. СТАТКОМ как средство компенсации реактивной мощности в сетях высокого напряжения. — Новое в российской энергетике, 2003, №5.

Авторы: Боровиков Юрий Сергеевич окончил факультет автоматики и электромеханики ТПУ в

2000 г. В 2003 г. защитил кандидатскую диссертацию «Программно-аппаратные средства для оценки коммутационной напряженности коллекторных электрических машин» в ТПУ. Заведующий кафедрой «Электроэнергетические системы» ТПУ.

**Васильев Алексей Сергеевич** окончил магистратуру электротехнического института ТПУ в 2009 г. Аспирант, ассистент кафедры «Электроэнергетические системы» ТПУ.

**Гусев Александр Сергеевич** окончил электроэнергетический факультет ТПИ в 1973 г. В 2008 г. защитил докторскую диссертацию «Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем» в ТПУ. Профессор кафедры «Электроэнергетические системы» ТПУ.