

*В конце прошлого года кафедра электропривода и электрооборудования Томского политехнического университета отметила 60-летний юбилей. В этом номере редакция публикует ряд статей сотрудников кафедры, отражающих научную деятельность одного из старейших в стране педагогических коллективов, и желает им успехов в деле подготовки квалифицированных специалистов и дальнейшего развития отечественной науки в области энергетики и электротехники.*

## **Принципы построения средств моделирования в реальном времени интеллектуальных энергосистем<sup>1</sup>**

**БОРОВИКОВ Ю.С., ГУСЕВ А.С., СУЛАЙМАНОВ А.О.**

*Рассмотрены и сформулированы принципы построения средств всережимного моделирования в реальном времени интеллектуальных энергосистем с активно-адаптивными электрическими сетями. Приведены фрагменты экспериментальных испытаний практических реализаций разработанных средств, иллюстрирующие их свойства и возможности.*

**Ключевые слова:** интеллектуальные энергосистемы, моделирование, реальное время, информационно-управляющая система, принципы построения

Для надежного и эффективного решения широкого спектра задач проектирования, исследования и последующей эксплуатации планируемых интеллектуальных энергосистем (ИЭС) с активно-адаптивными электрическими сетями (ААС) необходимы соответствующие средства их адекватного моделирования. Особенности этих задач обусловлены применением технологий и современных быстродействующих устройств FACTS, непрерывно функционирующих в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы ИЭС с ААС, а также спецификой целенаправленного локального и системного управления данными устройствами и функционирования в этих условиях оборудования, релейной защиты, технологической и противоаварийной автоматики и ИЭС с ААС в целом. Необходимость учета обозначенных особенностей указанных задач исключает возможность в используемых в настоящее время средствах расчета режимов и процессов в реальных энергосистемах глубокой декомпозиции, упрощений математических моделей, в том числе электросетевого оборудования, и

*Principles used to construct tools for all-variable real-time simulation of intellectual power systems containing active-adaptive electric networks are considered and formulated. Fragments of experimental tests of field implementations of the developed tools illustrating their properties and possibilities are presented.*

**Key words:** intellectual power systems, simulation, real time, information and control system, principles of construction

ограничений интервала воспроизведения процессов. Кроме того, для многих из этих задач также необходимо воспроизведение процессов в реальном масштабе времени.

Совокупность отмеченных обстоятельств определяет актуальность создания средств всережимного моделирования в реальном времени ИЭС с ААС, обеспечивающих бездекомпозиционное адекватное воспроизведение процессов в реальном времени и на неограниченном интервале в оборудовании и трехфазных ИЭС с ААС в целом, при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы.

Разработанные на основе комплексного подхода к решению данной проблемы такого рода средства образуют специализированную многопроцессорную программно-техническую систему гибридного типа, структурная схема которой приведена на рис. 1.

Представленная структура содержит адаптируемую совокупность специализированных гибридных процессов (СГП) и информационно-управляющую систему (ИУС). Каждая из этих частей системы предназначена для эффективного осуществления соответствующих аспектов проблемы.

Совокупность СГП, функционально объединяемая коммутатором трехфазных узлов (КТУ) соглас-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы», ГК №07.514.11.4075.

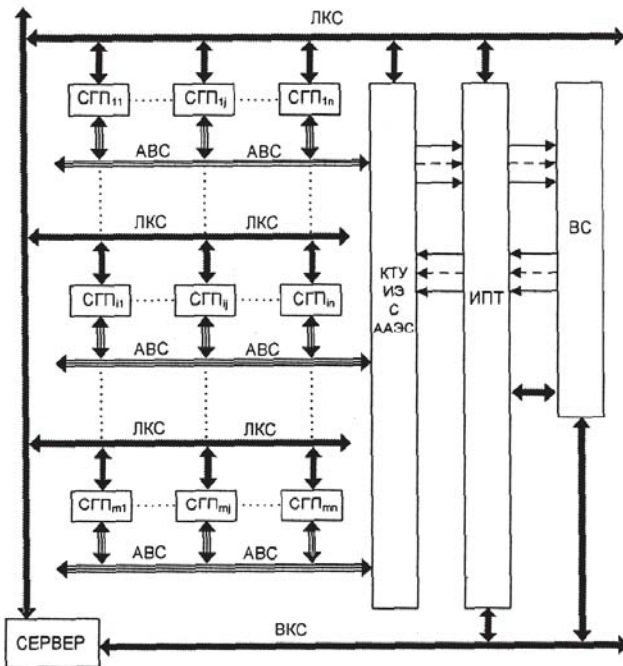


Рис. 1. Структурная схема специализированной многопроцессорной программно-технической системы гибридного типа для адекватного моделирования ИЭС с ААС

но составу и топологии моделируемой ИЭС с ААС обеспечивает необходимую полноту и достоверность воспроизведения.

Главным назначением ИУС, информационно объединяющей между собой все СГП и сервер, является осуществление необходимого спектра информационно-управляющих свойств и возможностей, связанных с реализацией всех видов автоматизированного и автоматического управления параметрами и настройками моделируемого оборудования, режимами моделирования в целом, а также различными представлениями, преобразованиями и отображениями управлений, результатов моделирования и, кроме того, с информационными взаимодействиями во внешних компьютерных сетях с автоматизированными рабочими местами клиентов-пользователей и другими программными и программно-техническими средствами.

Структура системы, сущность СГП и ИУС определяют также и принципы их построения.

1. Основу каждого СГП составляет сопроцессор (СП), соответствующий виду моделируемых элементов: генераторов, трансформаторов, СТАТКОМ и др., представляющий собой параллельную цифроаналоговую структуру, предназначенную для непрерывного и методически точного решения в реальном времени и на неограниченном интервале жесткой, нелинейной системы дифференциальных уравнений универсальной всережимной математической модели данного вида элементов ИЭС с ААС и для осуществления всех видов автоматизирован-

ного и автоматического управления коэффициентами и параметрами этой модели, включая интерактивное, программное и комбинированное.

2. Сопроцессоры всех СГП дополняются преобразователями «напряжение—ток», преобразующими непрерывные математические переменные фазных токов в модельные физические токи и напряжения, соответственно для обеспечения возможности естественного формирования посредством КТУ трехфазных узлов моделируемых ИЭС с ААС и практически неограниченного их наращивания, а также физического воспроизведения различных продольных и поперечных трехфазных коммутаций.

3. Трехфазные входы—выходы всех СГП оснащаются продольными и поперечными цифруправляемыми коммутаторами для осуществления всевозможных продольных (ЦУАКВ) и поперечных (ЦУАКЗ) трехфазных коммутаций, в том числе с учетом сопротивлений шунтов выключателей (ЦУС<sub>рШ</sub>) и переходных сопротивлений замыканий (ЦУС<sub>рП</sub>).

4. Каждый СГП включает в себя унифицированную часть ИУС, состоящую из центрального микропроцессора (ЦМП), периферийных микроконтроллеров (ПМК) и многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Все ЦМП соединяются между собой и с сервером локальной компьютерной сетью (ЛКС), а цифровыми шинами (ЦШ) СГП с ПМК, АЦП и цифроаналоговыми преобразователями (ЦАП) сопроцессора данного СГП. С помощью АЦП обеспечивает цифровая форма представления непрерывных математических переменных, а ЦМП, ПМК и их программное обеспечение предназначены для осуществления всех присущих данному виду СГП обозначенных ранее информационно-управляющих свойств и возможностей, моделирования релейной защиты, технологической и противоаварийной автоматики и др. В совокупности с программным обеспечением сервера реализуются все системные информационно-управляющие и другие свойства и возможности, включая информационные взаимодействия во внешних компьютерных сетях (ВКС).

5. Для информационного и физического взаимодействия с реальным оборудованием: станциями управления средствами FACTS, РЗ и ПА, оперативно-информационными комплексами, информационно-управляющими системами ИЭС с ААС и другими внешними средствами (ВС) в структуре средств, предусмотрены соответствующие интерфейсные программные и программно-технические средства (ИПТ), имеющие соответствующие модельные физические входы от КТУ, ВС и выходы согласующих усилителей для ВС, а также инфор-

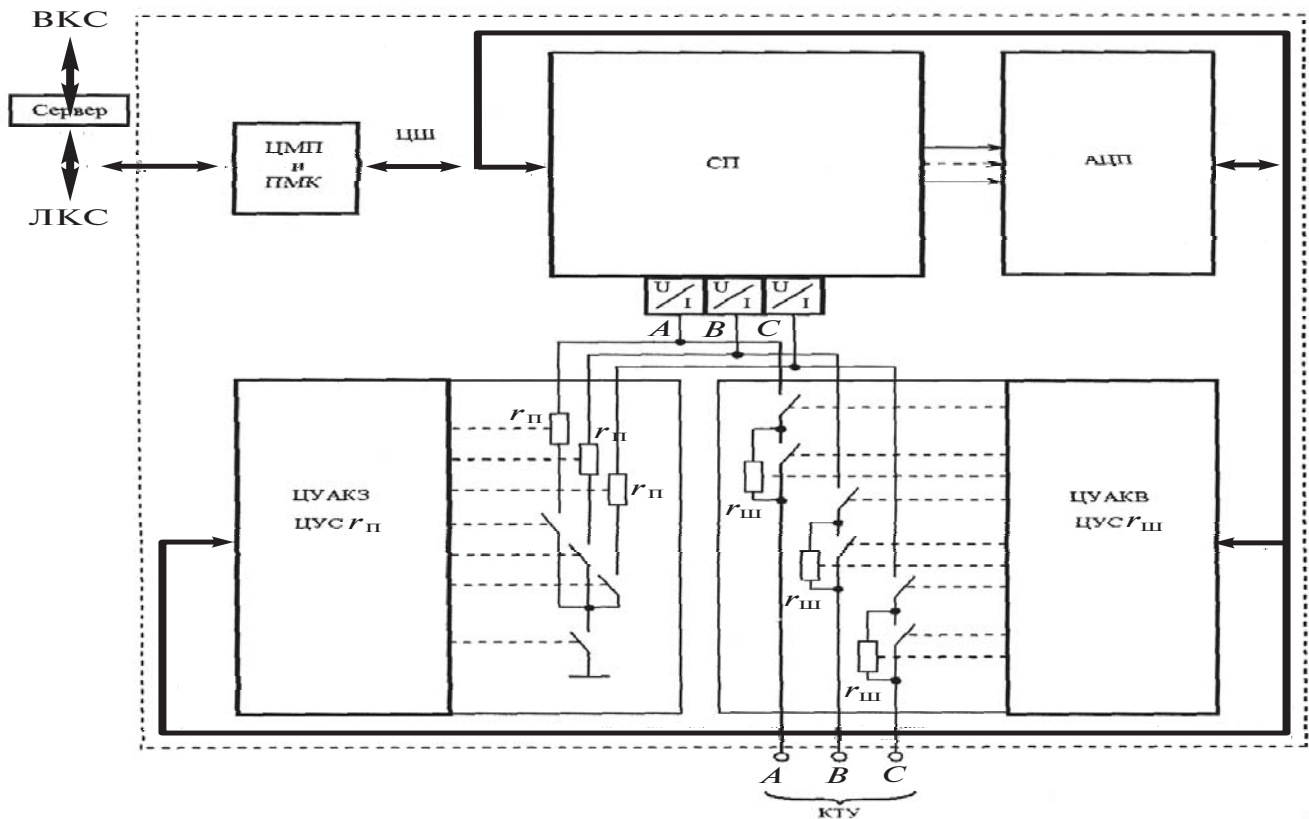


Рис. 2. Функциональная схема гибридного процессора электрических машин с учетом соответствующего дополнительного оборудования

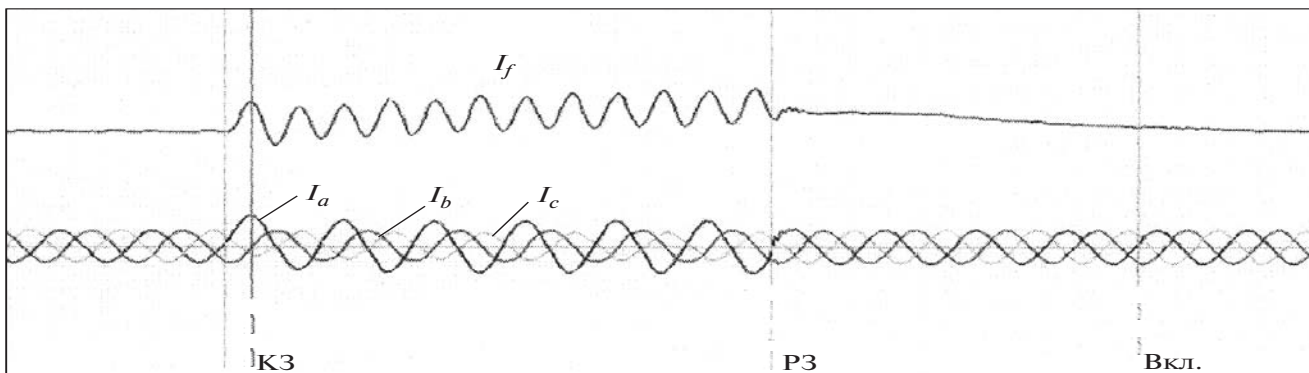


Рис. 3. Токи фаз и возбуждения генератора при однофазном коротком замыкании с сети

мационные взаимосвязи с сервером, СГП по ЛКС и ВКС.

6. Реализация всех программно-технических средств всережимного моделирования в реальном времени ИЭС с ААС ориентирована на применение новейших достижений интегральной микроэлектроники, микропроцессорной техники и IT-технологий, обеспечивающих необходимые эксплуатационно-технические характеристики, свойства и возможности, а также перспективу их совершенствования.

Наиболее значимые аспекты принципов построения средств всережимного моделирования в реальном времени ИЭС с ААС наглядно отражает

представленная на рис. 2 функциональная схема СГП, предназначенного для моделирования (в зависимости от структуры сопроцессора) синхронных и асинхронных электрических машин с учетом соответствующего дополнительного оборудования<sup>1</sup>: систем возбуждения и автоматических регуляторов возбуждения, первичных двигателей и их систем регулирования, приводимых электродвигателями механизмов.

<sup>1</sup> Гусев А.С. и др. Модели синхронных и асинхронных машин для всережимного моделирования электроэнергетических систем. – Изв. вузов. Электромеханика, 2009, №6.

На рис. 3 приведены фрагменты результатов экспериментальных испытаний средств адекватного моделирования ИЭС с ААС.

**Выводы.** 1. Рассмотренные принципы построения средств всережимного моделирования в реальном времени ИЭС с ААС позволяют в полной мере и на базе новейших достижений интегральной микроэлектроники, микропроцессорной техники и IT-технологий осуществить концепцию адекватного моделирования ИЭС с ААС.

2. Результаты экспериментальных исследований подтверждают возможность достижения полноты, достоверности и оперативности моделирования ИЭС с ААС, а также информационно-управляющих свойств и возможностей, необходимых для надежного и эффективного проектирования, исследования и эксплуатации ИЭС с ААС.

*Авторы: Боровиков Юрий Сергеевич окончил факультет автоматики и электромеханики Томского политехнического университета (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» Энергетического института (ЭНИИ)*

*Гусев Александр Сергеевич окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Томского политехнического института (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» ЭНИИ ТПУ.*

*Сулайманов Алмаз Омурзакович окончил ЭЭФ ТПИ в 1991 г. В 2009 г. защитил кандидатскую диссертацию «Неактивная мощность и ее составляющие в электроэнергетических системах» в ТПУ. Доцент кафедры «Электроэнергетические системы» ЭНИИ ТПУ.*