

УДК 621.311.001

## ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ВСЕРЕЖИМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ УПРАВЛЯЕМЫХ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Гусев А.С.<sup>1</sup>, Суворов А.А.<sup>1</sup>, Сулайманов А.О.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия (634050, Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: lejkasvr@yandex.ru

Рассмотрены синтез всережимной трехфазной математической модели управляемого шунтирующего реактора с подмагничиванием (УШРП) для воспроизведения значимого спектра нормальных и аномальных процессов в обмотках реактора с учетом кривой намагничивания и программно-технические средства, обеспечивающие бездекомпозиционное, непрерывное и методически точное её решение в реальном времени и на неограниченном интервале с гарантированной приемлемой инструментальной погрешностью, а также реализующие системы автоматического управления реактором и адекватное воспроизведения всевозможных трехфазных продольных и поперечных коммутаций на входах/выходах УШРП, управления параметрами, представление, преобразование и отображение информации. Основным назначением рассмотренных средств является их применение в соответствующих средствах моделирования электроэнергетических систем. Представлены результаты экспериментальных исследований разработанных программно-технических средств, на примере применения в реально проектируемой системе электроснабжения, подтверждающие наличие обозначенных свойств и возможностей.

Ключевые слова: всережимная математическая модель управляемого шунтирующего реактора, реальное время, гарантированная точность, специализированный процессор, электроэнергетические системы.

## SOFTWARE AND HARDWARE TOOLS OF THE REAL-TIME CONTROLLED SHUNT REACTORS SIMULATION IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

Gusev A.S.<sup>1</sup>, Suvorov A.A.<sup>1</sup>, Sulaymanov A.O.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, street Lenina, 30), e-mail: lejkasvr@yandex.ru

The synthesis results of the three-phase mathematical model controlled shunt reactors (CSR) is presented in this article. Such mathematical model allows reproducing the full, continuous spectrum of normal and abnormal quasi-steady-state and transient processes in the CSR and taking into account the magnetization curve. Simulated the CSR mathematical model software and hardware tools allows: continuously, methodically accurately solving such model on an unlimited interval with guaranteed instrumental error in the real-time, including in the its functioning as a part of the appropriate simulation tools of electric power systems (EPS); carrying out adequate any longitudinal and transversal commutations input/output of CSR; to control of parameters, settings, longitudinal and transversal phase commutations and representing, converting and displaying information. Results of experimental researches confirm the existence of the marked features and capabilities the developed software and hardware tools of simulation CSR.

Keywords: mathematical model of controlled shunt reactor, specialized processor, the real time, guaranteed accuracy, electric power systems.

Внедрение в электроэнергетические системы (ЭЭС) устройств FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems), среди которых одними из наиболее распространенных в настоящее время являются управляемые шунтирующие реакторы с подмагничиванием (УШРП) [2], позволяет эффективнее управлять режимами ЭЭС, в частности осуществлять: автоматическое регулирование напряжений и потоков реактивной мощности, минимизацию потерь и др., но вместе с этим значительно усложняет динамические свойства ЭЭС, соответственно квазиустановившиеся и переходные

нормальные и аномальные процессы в оборудовании и ЭЭС в целом. В результате для многих задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС оказываются неприемлемыми неизбежно применяемые в используемых средствах расчета режимов и процессов ЭЭС упрощения и ограничения, а именно глубокая декомпозиция объективно единого и непрерывного спектра нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессов ЭЭС, существенные упрощения математических моделей элементов, особенно электросетевых, и соответственно ЭЭС в целом, ограничения интервала воспроизведения процессов [4], что приводит к неопределимой потере полноты и достоверности моделирования. Следует также отметить повышенные в этих условиях для эксплуатации требования к оперативности моделирования вплоть до осуществления его в реальном времени.

Вышеизложенное определяет актуальность создания программно-технических средств, обеспечивающих непрерывное и бездекомпозиционное, методически точное решение всережимной математической модели УШРП в реальном времени и на неограниченном интервале с гарантированной приемлемой инструментальной погрешностью, а также адекватную реализацию систем автоматического управления реактором и воспроизведения всевозможных трехфазных продольных и поперечных коммутаций, различное управление параметрами моделируемого реактора и другие необходимые информационно-управляющие функции, в том числе в составе соответствующих средств моделирования ЭЭС.

### Материалы и методы

Основу обозначенной математической модели для различных конструктивных модификаций УШРП составляет нижеприведенная система уравнений, которая может использоваться непосредственно или является одной из идентичных частей такого рода моделей для каждой из параллельных электромагнитных систем фазы реактора:

$$w_{COj} \frac{d\phi_{0j}}{dt} + L_{COj} \frac{di_{COj}}{dt} + r_{COj} i_{COj} = u_{COj}; \quad w_{KOj} \frac{d\phi_{0j}}{dt} + L_{KOj} \frac{di_{KOj}}{dt} + r_{KOj} i_{KOj} = u_{KOj}; \quad i_{YOj} = K_{\nu} \phi_{YOj}^p;$$

$$w_{YOj} \frac{d\phi_{YOj}}{dt} + L_{YOj} \frac{di_{YOj}}{dt} + r_{YOj} i_{YOj} = u_{YOj}; \quad w_{COj} \cdot i_{COj} + w_{KOj} \cdot i_{KOj} + w_{YOj} \cdot i_{YOj} = i_{\mu j} \cdot w_j; \quad i_{\mu j} = K_{\mu} \phi_{0j}^p,$$

где: CO - сетевая обмотка, КО - компенсирующая обмотка, ОУ - обмотка управления,  $j$  - фазы А, В, С,  $w$  - число витков,  $\phi_0$  - мгновенное значение основного магнитного потока,  $\phi_{YO}$  - мгновенное значение магнитного потока обмотки управления,  $i$  - мгновенное значение тока,  $u_n$  - линейное напряжение,  $L$  - индуктивность рассеивания,  $r$  - активное сопротивление,  $i_{\mu}$  - намагничивающий ток, определяемый с учетом кривой намагничивания

используемого магнитопровода аппроксимирующим выражением  $i_{\mu j} = K_{\mu} \phi_{0j}^p$ ,  $K_{\mu}$  – коэффициент, учитывающий взаимосвязь размерностей и соответствующее число витков,  $K_{\nu}$  – коэффициент, учитывающий взаимосвязь размерностей и число витков обмотки управления,  $p$  – обычно нечетный показатель степени, принимаемый в большинстве случаев  $p=3$  или  $p=5$ , хотя наиболее эффективная аппроксимация нелинейной зависимости достигается при нецелых значениях  $p$  [3].

При использовании подобной математической модели УШРП, а также аналогичных математических моделей других элементов, совокупная математическая модель любой реальной ЭЭС даже с учетом допустимого частичного эквивалентирования, неизбежно содержит жесткую, нелинейную систему дифференциальных уравнений чрезвычайно большой размерности, удовлетворительное решение которой численными методами оказывается маловероятным, и становятся неизбежными указанные ранее упрощения и ограничения. Кроме того, независимо от этого всегда неизвестной остается присущая численному интегрированию дифференциальных уравнений методическая ошибка решения, определение действительного значения которой отнесено в теории методов дискретизации дифференциальных уравнений к категории фундаментальных проблем.

Альтернативным направлением решения указанной проблемы является комплексный подход, представляющий собой в широком смысле гибридное моделирование, концепция которого состоит в следующем:

1. Для достижения необходимой полноты и достоверности моделирования все виды элементов ЭЭС воспроизводятся создаваемыми для этих целей универсальными, для каждого вида элементов, высокоточными математическими моделями, описывающими без декомпозиции весь значимый спектр нормальных, аварийных и послеаварийных режимов и процессов.

2. Для непрерывного, параллельного и методически точного решения в реальном времени и на неограниченном интервале систем дифференциальных уравнений указанных моделей применяется единственно обеспечивающий такую возможность способ непрерывного неявного интегрирования, реализация которого осуществляется с помощью разрабатываемой для этого специализированной параллельной цифро-аналоговой структурой.

3. Для исключения взаимокommunikаций математических переменных между элементами ЭЭС, которая возникает при решении узловых уравнений и для высокоадекватного моделирования всевозможных продольных и поперечных коммутаций, а также обеспечения возможности естественного и практически неограниченного

наращивания моделируемой ЭЭС, осуществляется локализация математической модели каждого элемента, согласно естественной структуре ЭЭС, состоящей из функционально отдельных элементов и узлов, которые образуются в результате коммутации выключателей этих элементов в соответствии с топологией сети, путём преобразования входных/выходных математических переменных в соответствующие им трёхфазные модельные физические токи.

4. Для осуществления управления параметрами и настройками моделируемого оборудования, коммутационными элементами, а также для представления, отображения и преобразования информации используется цифро-аналоговое и аналого-цифровое преобразование информации.

5. Все схемотехнические решения ориентируются исключительно на применение интегральной микроэлектроники, микропроцессорных IT-технологий.

Вышеизложенная концепция определяет единые принципы построения программно-технических средств моделирования для всех элементов ЭЭС, в том числе и для УШРП. Структурная схема УШРП, соответствующая обозначенным принципам, приведена на рисунке 1.

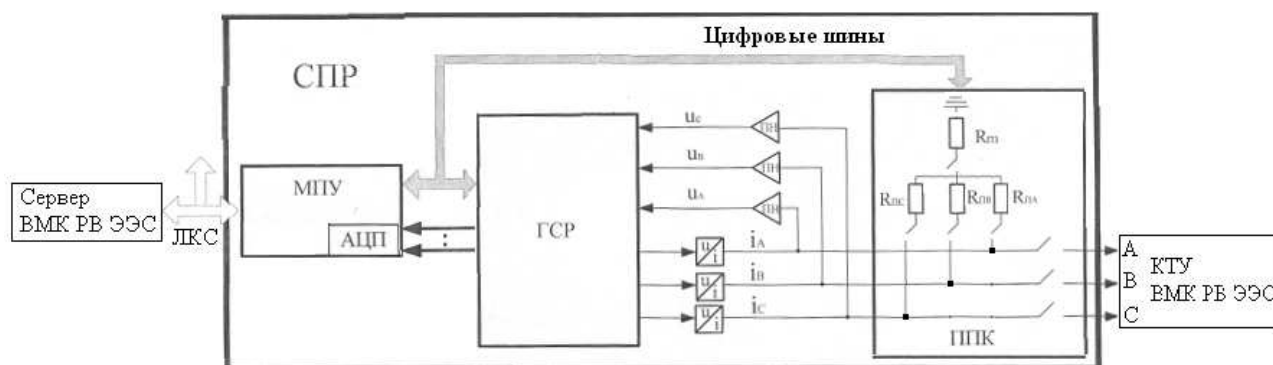


Рис. 1. Структура специализированного процессора УШРП

Специализированная параллельная цифро-аналоговая структура выполнена на базе интегральных операционных усилителей, интегральных цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП), аппроксиматоров на основе интегральных перемножителей сигнала, и образует гибридный сопроцессор реактора (ГСП). Решаемая в ГСП система уравнений предварительно подвергается преобразованиям, иллюстрируемым на примере  $j$ -ой фазы сетевой обмотки:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(w_{COj} \cdot \phi_{0j} + L_{COj} \cdot i_{COj})}{dt} + r_{COj} i_{COj} - u_{COj} &= 0 \\ \frac{dz_{COj}}{dt} = r_{COj} i_{COj} - u_{COj}; \frac{w_{COj}}{w_j} = k_{COj}; w_{COj} \cdot \phi_{0j} &= \psi_{COj} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{cases} \psi_{COj} + L_{COj} \cdot i_{COj} = -z_{COj} \\ \frac{dz_{COj}}{dt} = r_{COj} i_{COj} - u_{COj} \end{cases}$$

Преобразованная для решения в ГСР система уравнений в относительных единицах принимает вид:

$$\begin{aligned} \psi_{COj} + L_{COj} \cdot i_{COj} &= -z_{COj}; \quad \frac{dz_{COj}}{dt} = r_{COj} i_{COj} - u_{COj}; \quad \psi_{KOj} + L_{KOj} \cdot i_{KOj} = -z_{KOj}; \quad \frac{dz_{KOj}}{dt} = r_{KOj} i_{KOj} - u_{KOj}; \\ \psi_{YOj} + L_{YOj} \cdot i_{YOj} &= -z_{YOj}; \quad \frac{dz_{YOj}}{dt} = r_{YOj} i_{YOj} - u_{YOj}; \quad i_{YOj} = K_{YO} \psi_{YOj}^p; \\ k_{COj} \cdot i_{COj} + k_{KOj} \cdot i_{KOj} + k_{YOj} \cdot i_{YOj} &= i_{\mu j}; \quad i_{\mu j} = K_{\mu 1} \psi_{0j}^p. \end{aligned}$$

Фрагмент обозначенной структуры ГСР для решения уравнений  $j$ -ой фазы СО представлен на рисунке 2. Для обеспечения взаимодействия математического уровня ГСР с физическим уровнем используются интегральные преобразователи напряжение/ток ( $u/i$ ). Аналогичным образом реализованы в ГСР схемы решения остальных уравнений.

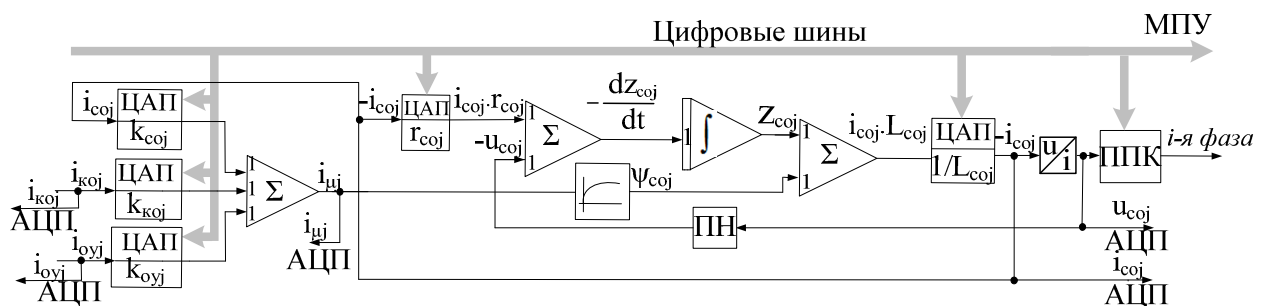


Рис. 2. Структурная схема решения  $j$ -ой фазы СО

где: ППК – продольно-поперечный коммутатор, реализованный на базе интегральных цифрууправляемых аналоговых ключей; ПН – повторитель напряжения на базе интегрального операционного усилителя, исключающий влияние трансляции информации на узел съема.

Все необходимые информационно-управляющие свойства и возможности, связанные с преобразованием, отображением, управлением, в том числе программно-функциональном, информации осуществляется с помощью микропроцессорного узла (МПУ) содержащего центральный процессор, функциональный периферийный контролер и интегральный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). МПУ реактора и МПУ других элементов ЭЭС через сетевые коммутаторы соединены между собой и сервером локальной компьютерной сети. Соответствующие топологии моделируемой ЭЭС функциональные взаимосвязи специализированных процессоров реализуются посредством коммутаторов трехфазных узлов (КТУ). Аналогичным образом реализованы специализированные процессоры всех элементов ЭЭС. Разработанный подобным образом СПР адаптирован для использования во Всережимном моделирующем комплексе реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС), разработанном в Энергетическом институте Томского политехнического университета [1]. ВМК РВ ЭЭС представляет собой параллельную, многопроцессорную, программно-техническую систему реального времени гибридного типа, объединяющую в

себе адаптируемую совокупность специализированных процессоров всех элементов моделируемой схемы ЭЭС и информационно-управляющую систему [5].

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований разработанных программно-технических средств всережимного моделирования в реальном времени УШРП на примере модели реально проектируемой схемы электроснабжения энергорайона, реализованной на ВМК РВ ЭЭС и приведенной на рисунке 3, где для генерации реактивной мощности совместно с УШРП используются батареи статических конденсаторов (БСК).

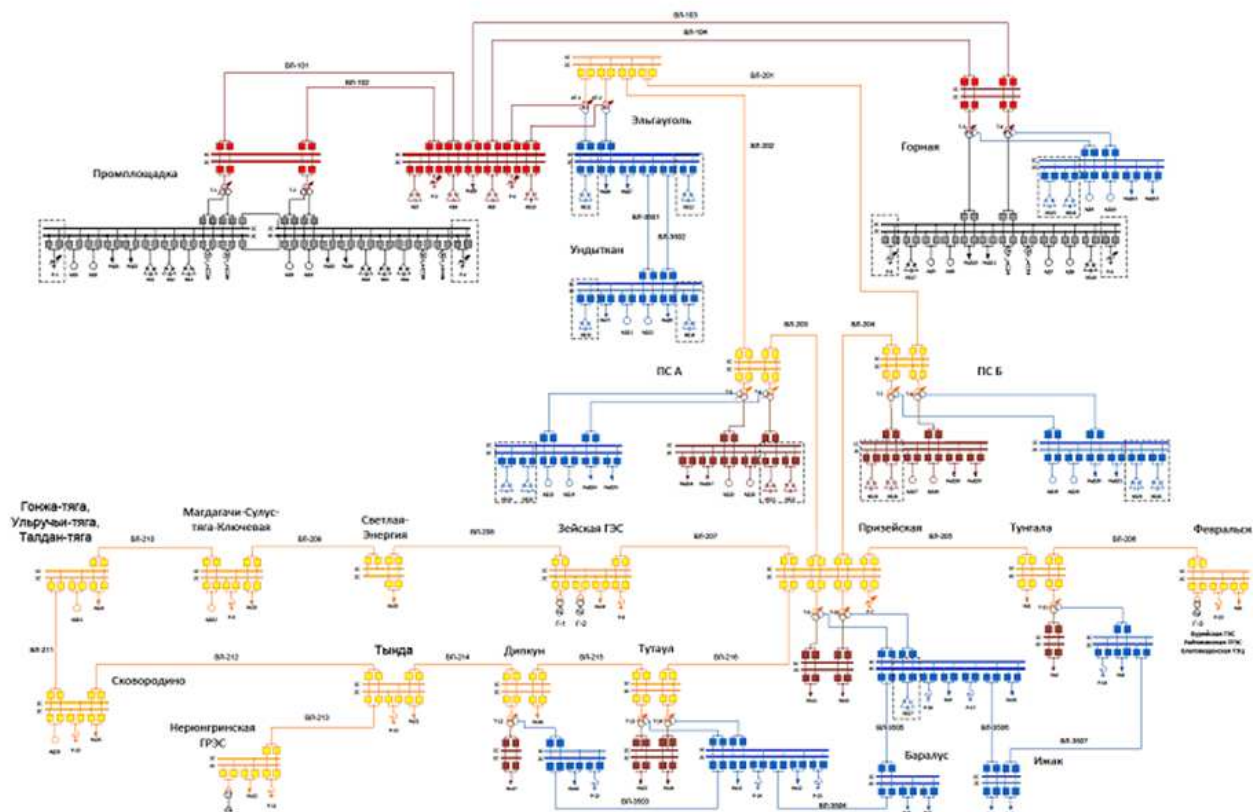


Рис. 3. Трехфазная схема всережимного моделирования энергокластера

### Результаты исследований и обсуждение

Для подтверждения свойств и возможностей разработанных программно-технических средств проведены экспериментальные исследования использования УШРП для решения задач автоматического регулирования напряжения и реактивной мощности, минимизации потерь при работе электрооборудования по реальному графику нагрузки. Основные фрагменты результатов исследований представлены соответствующими осциллограммами, изображенными на рисунках 4 и 5.

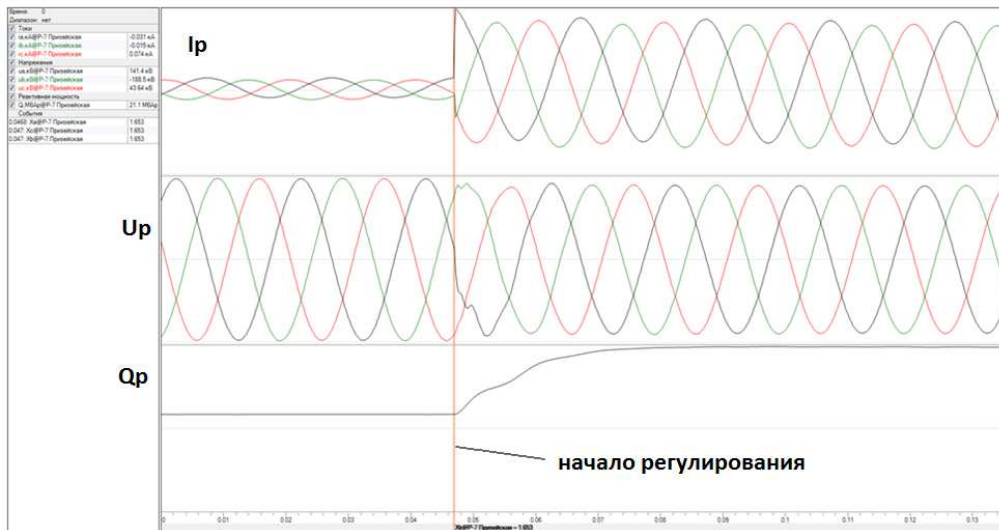


Рис. 4. Осциллограммы функционирования УШРП в режиме поддержания напряжения в узле подключения при работе электрооборудования по реальному графику нагрузки

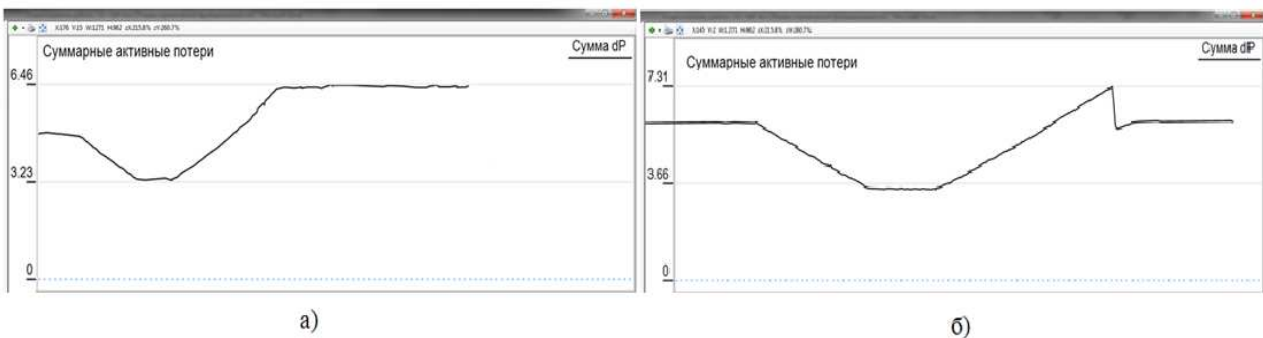


Рис.5. Осциллограммы потерь мощности при работе электрооборудования по реальному графику нагрузки: а) при функционирующих УШРП и БСК б) при отключенных УШРП и БСК

## Заключение

Совокупность представленных результатов разработки программно-технических средств всережимного моделирования УШРП и выполненные экспериментальные исследования на примере реально проектируемой системы электроснабжения подтверждают достижения поставленной цели, заключающейся в создании средств обеспечивающих бездекомпозиционное, непрерывное, методически точное решение в реальном времени всережимной математической модели УШРП с гарантированной приемлемой погрешностью, воспроизведение всевозможных продольных и поперечных коммутаций, реализацию системы автоматического управления УШРП и другие необходимые информационно-управляющие функции, в том числе в составе соответствующих средств моделирования ЭЭС.

Работа выполнена при поддержке мегагранта ТПУ № ВИУ\_ЭНИН\_138\_2014 - «Гибридное моделирование и управление в интеллектуальных энергосистемах».

## Список литературы

1. Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О. Принципы построения средств всережимного моделирования в реальном времени энергосистем // Электричество. – 2012. – №. 6 – С. 10-13.
2. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. – М.: Торус Пресс, 2011. – 326 с.
3. Постников И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин. – М.: Высш. шк., 1975. – 319 с.
4. Холл Дж., Уатт Дж. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений: Пер. с англ. / Под ред. А.Д. Горбунова. – М.: Мир, 1979. – 312 с.
5. Yu. S. Borovikov, A. O. Sulaimanov. Information and Control System for Use in the Real Time Multiprocessor Simulation of Power Equipment // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84, No. 5, pp. 290–295.

### Рецензенты:

Лукутин Б.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск;

Хрущев Ю.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры электрических сетей и электротехники Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск.