

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ ДЕТАЛИЗАЦИИ МОДЕЛЕЙ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ НА АДЕКВАТНОСТЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Андреев М.В.<sup>1</sup>, Рубан Н.Ю.<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: andreevmv@tpu.ru

---

Современная электроэнергетическая система (ЭЭС) является сложной, многопараметрической, динамической, жесткой системой. Адекватное моделирование процессов, протекающих в оборудовании и ЭЭС в целом, представляет собой нетривиальную задачу. При этом в большинстве работ, посвященных её решению, основное внимание уделяется моделированию силового оборудования ЭЭС, а устройства релейной защиты (РЗ) моделируются упрощено. В то же время характер переходных процессов при различных возмущениях в реальной энергосистеме часто зависит от момента срабатывания устройств РЗ и действия противоаварийной автоматики. Это в том числе относится и к электромеханическим переходным процессам, продолжительность и характер которых определяет последующий режим работы и устойчивость энергосистемы. В данной публикации представлены результаты исследований, проведенные с применением моделирующего комплекса гибридного типа ВМК РВ ЭЭС и показывающие необходимость полноты и достоверности моделирование РЗ с учетом их конкретных реализаций.

---

Ключевые слова: моделирование, релейная защита, адекватность, переходные процессы.

## RESEARCH OF INFLUENCE OF THE DETAILING LEVEL OF RELAY PROTECTION MODELS ON OF ADEQUACY OF SIMULATION OF TRANSIENTS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

Andreev M.V.<sup>1</sup>, Ruban N.Y.<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: andreevmv@tpu.ru

---

Modern electric power system (EPS) is a complex, multi-parameter, dynamic, rigid system. Adequate modeling of the processes occurring in the equipment and the EPS as a whole is not a trivial task. In the majority of works, devoted to its solution, authors focus on modeling of the power equipment of EPS but relay protection (RP) are modeled simplified. At the same time, the dynamic of transitional processes for various disturbances in a real power system often depends on the moment of activation of the RP and the actions of emergency automation. This applies to electromechanical transitional processes, duration and dynamic of which determines the subsequent of operation and stability of the power system. This publication presents the results of research carried out with application of Hybrid Real-Time Power System Simulator (HRTSim) and shows the need for completeness and accuracy of simulation of RP tailored to their specific implementations.

---

Keywords: modeling, relay protection, adequacy, transitional processes.

Все оборудование (первичные двигатели, генераторы, трансформаторы, линии электропередачи, разнообразные электропотребители и множество другого основного и вспомогательного оборудования) электроэнергетических систем (ЭЭС) связано между собой в процессе производства, транспортировки, распределения и потребления электрической энергии.

Поскольку подавляющее большинство этого оборудования представляет собой динамические элементы, к тому же преимущественно нелинейные и с весьма значительным диапазоном постоянных времени, любая современная ЭЭС образует большую, многопараметрическую, жесткую, нелинейную, динамическую систему. В связи с этим

полное и достоверное моделирование процессов, протекающих в оборудовании и ЭЭС в целом, представляет собой крайне сложную задачу. При этом в большинстве работ, посвященных её решению, основное внимание уделяется моделированию силового оборудования ЭЭС, а устройства релейной защиты (РЗ) моделируются упрощено. В то же время характер переходных процессов при различных возмущениях в реальной энергосистеме часто зависит от момента срабатывания устройств РЗ и действия противоаварийной автоматики. Это в том числе относится и к электромеханическим переходным процессам, продолжительность и характер которых определяет последующий режим работы и устойчивость энергосистемы.

Вышесказанное связано с тем, что в настоящее время для математического моделирования режимов и процессов в оборудовании и ЭЭС в целом преимущественно применяются программные и программно-технические комплексы, в которых для расчета системы дифференциальных уравнений используются численные методы. Численное моделирование, ввиду адекватности своей методической и инструментальной основы статическим задачам, обеспечивает успешный и эффективный расчет установившихся режимов ЭЭС. Однако моделирование переходных процессов ЭЭС с применением численных методов связано с совершенно иной, принципиально противоположной ситуацией, порождающей необходимость глубокой декомпозиции процессов и упрощения математической модели ЭЭС, а также существенных ограничений жесткости, дифференциального порядка этих моделей и длительности воспроизводимых процессов [2, 3, 6, 10, 11]. Причем, как показывает история развития программных средств данной специализации, указанная ситуация весьма слабо зависит от существующего развития методической и инструментальной основы цифрового моделирования. Причиной этого является наличие ограничительных условий численных методов [2, 3, 6, 10, 11]: решения дифференциального уравнения должны удовлетворять условию Липшица, длина интервала решения ограничивается по условию теоремы Далквиста и др.

Разработанный в Энергетическом институте Томского политехнического университета Всережимный моделирующий комплекс реального времени ЭЭС (ВМК РВ ЭЭС) «освобожден» от обозначенных выше ограничений.

**Целью исследований** является повышение адекватности моделирования переходных процессов в ЭЭС за счет использования всережимных математических моделей, учитывающих конкретные реализации и процессы в измерительных трансформаторах (ИТ).

#### **Материалы и методы**

ВМК РВ ЭЭС [4, 5] представляет собой параллельную, многопроцессорную, программно-техническую систему реального времени гибридного типа. Он объединяет в

себе адаптируемую совокупность специализированных гибридных процессоров (СП) всех элементов моделируемой схемы ЭЭС и информационно-управляющую систему.

Заложенные в ВМК РВ ЭЭС принципы построения исключают методическую ошибку решения математических моделей элементов и соответственно совокупной модели ЭЭС в целом, безотносительно к дифференциальному порядку, жёсткости и интервалу решения. Поэтому, точность решения гарантирована и определяется только инструментальной погрешностью аппаратной части комплекса, минимизация которой обеспечивается применением прецизионных интегральных компонентов.

Уникальные характеристики ВМК РВ ЭЭС стали доступны благодаря использованию концепции гибридного моделирования [7], которая для достижения высокой адекватности моделирования объединяются несколько методов: аналоговое, цифровое (численное) и физическое. Аналоговая часть обеспечивает отсутствие методической погрешности интегрирования. Цифровая часть позволяет на программном уровне реализовать алгоритмы управления и изменения параметров воспроизводимой системы. На физическом уровне обеспечивается связь и коммутация моделируемых элементов аналогично тому, как это осуществляется в реальной энергосистеме.

Свойства и возможности ВМК РВ ЭЭС позволяют интегрировать в комплекс (как на уровне Сервера, так и в микроконтроллеры СП) математические модели релейной защиты и автоматики, учитывающие все ключевые программно-аппаратные особенности реализации конкретных устройств, а также процессы в измерительных трансформаторах тока и напряжения – детализированные модели [1, 8, 9]. Объем данной статьи не позволяет привести всю информацию по данной теме, поэтому ниже приведены фрагменты результатов моделирования наиболее распространенной в отечественной электроэнергетике электромеханической высокочастотной дифференциально-фазной защиты (ВЧДФЗ) – ДФЗ-201.

Фрагмент (схема замещения, граф, передаточная функция (ПФ) и дифференциальное уравнение на основе ПФ) математической модели для промежуточного трансформатора в составе блока реагирующих органов (пусковых и отключающих) ДФЗ-201 приведен ниже:

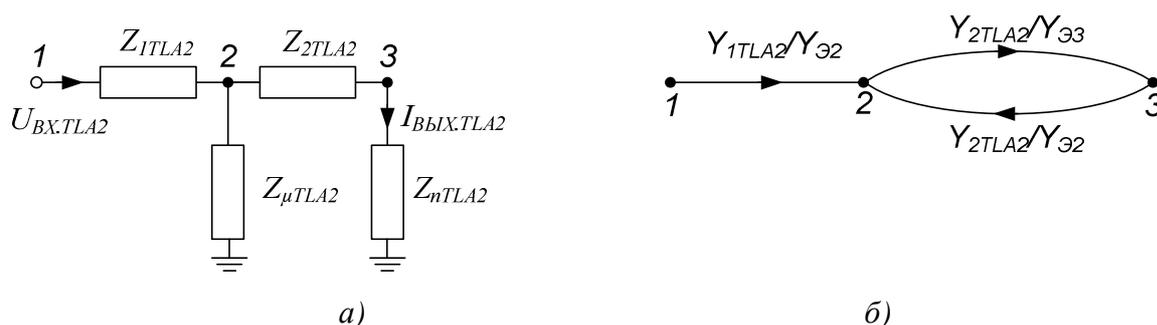


Рис. 1. Схема замещения (а) и граф (б) промежуточного трансформатора

$$\frac{I_{BЫX.TLA2}(p)}{U_{BХ.TLA2}(p)} = W_{13TLA2}(p) \cdot Y_{nTLA2}(p) =$$

$$= \frac{B_{1TLA2} \cdot p^4 + C_{1TLA2} \cdot p^3 + D_{1TLA2} \cdot p^2 + E_{1TLA2} \cdot p}{A_{2TLA2} \cdot p^5 + B_{2TLA2} \cdot p^4 + C_{2TLA2} \cdot p^3 + D_{2TLA2} \cdot p^2 + E_{2TLA2} \cdot p + F_{2TLA2}},$$

где  $B_{1TLA2}$ ,  $C_{1TLA2}$  и др. – коэффициенты, определяемые RLC-параметрами схемы промежуточного трансформатора ДФЗ.

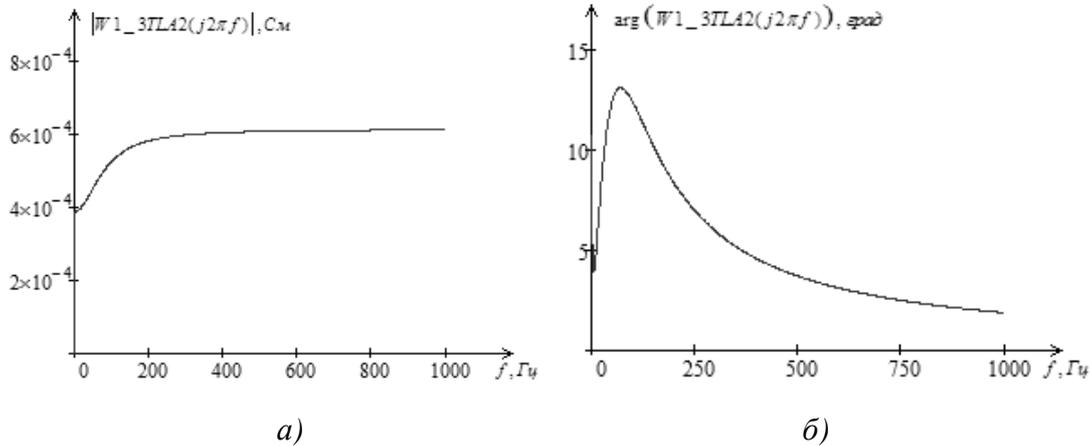


Рис. 2. Амплитудно-частотная (а) и фазо-частотная (б) характеристики промежуточного трансформатора

$$\frac{d^5(i_{BЫX.TLA2}(t) \cdot A_{2TLA2})}{dt^5} + \frac{d^4(i_{BЫX.TLA2}(t) \cdot B_{2TLA2} - u_{BХ.TLA2}(t) \cdot B_{1TLA2})}{dt^4} + \frac{d^3(i_{BЫX.TLA2}(t) \cdot C_{2TLA2} - u_{BХ.TLA2}(t) \cdot C_{1TLA2})}{dt^3} +$$

$$+ \frac{d^2(i_{BЫX.TLA2}(t) \cdot D_{2TLA2} - u_{BХ.TLA2}(t) \cdot D_{1TLA2})}{dt^2} + \frac{d(i_{BЫX.TLA2}(t) \cdot E_{2TLA2} - u_{BХ.TLA2}(t) \cdot E_{1TLA2})}{dt} + i_{BЫX.TLA2}(t) \cdot F_{2TLA2} = 0$$

Реализация синтезированных математических моделей ДФЗ осуществляется путем трансформации математических моделей, представленных в виде системы дифференциальных уравнений, в программные коды, интегрируемые в программное обеспечение ВМК РВ ЭЭС.

Следующий раздел экспериментально подтверждает актуальность и необходимость использования детализированных математических моделей.

### Результаты исследований и обсуждение

Исследования проведены на ВМК РВ ЭЭС с помощью учебной модели энергосистемы, фрагмент однолинейной схемы которой представлен на рис. 3. На рис. 4 и 5 представлены осциллограммы фазных токов линий электропередачи 220 кВ ВЛ-207 и ВЛ-210 при логическом учете и соответственно детальном моделировании функционирования основной защиты ВЛ-207 – дифференциально-фазной высокочастотной защиты ДФЗ-201. Ход эксперимента следующий: при возникновении трехфазного короткого замыкания (КЗ) на линии ВЛ-207 происходит срабатывание РЗ, при этом на воздушной линии электропередачи напряжением 220 кВ ВЛ-210 возникают синхронные качания. В первом

случае (рис. 4) функционирование ДФЗ-201 реализовано лишь логически, посредством учета времени срабатывания защиты (30 мс) и времени срабатывания выключателей (40 мс). При этом синхронные качания, возникшие на ВЛ-210, имеют максимальную амплитуду 859,4 А. В случае использования детализированной математической модели ДФЗ-201 при том же времени срабатывания выключателей (40 мс) время срабатывания ДФЗ-201 составило 58 мс, что привело к более длительному режиму существования КЗ, и, как следствие, послужило причиной возникновения более глубоких (максимальная амплитуда составила 1001 А) синхронных качаний на линии ВЛ-210 (рис. 5).

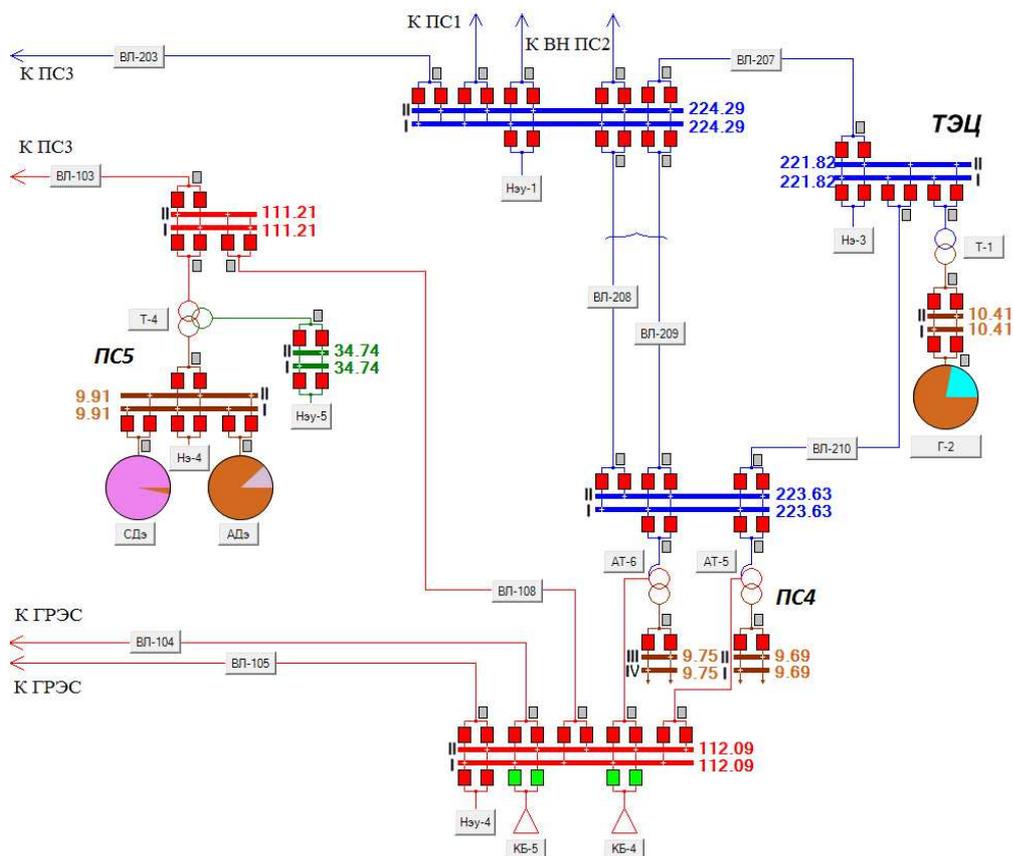


Рис. 3. Фрагмент моделируемой энергосистемы

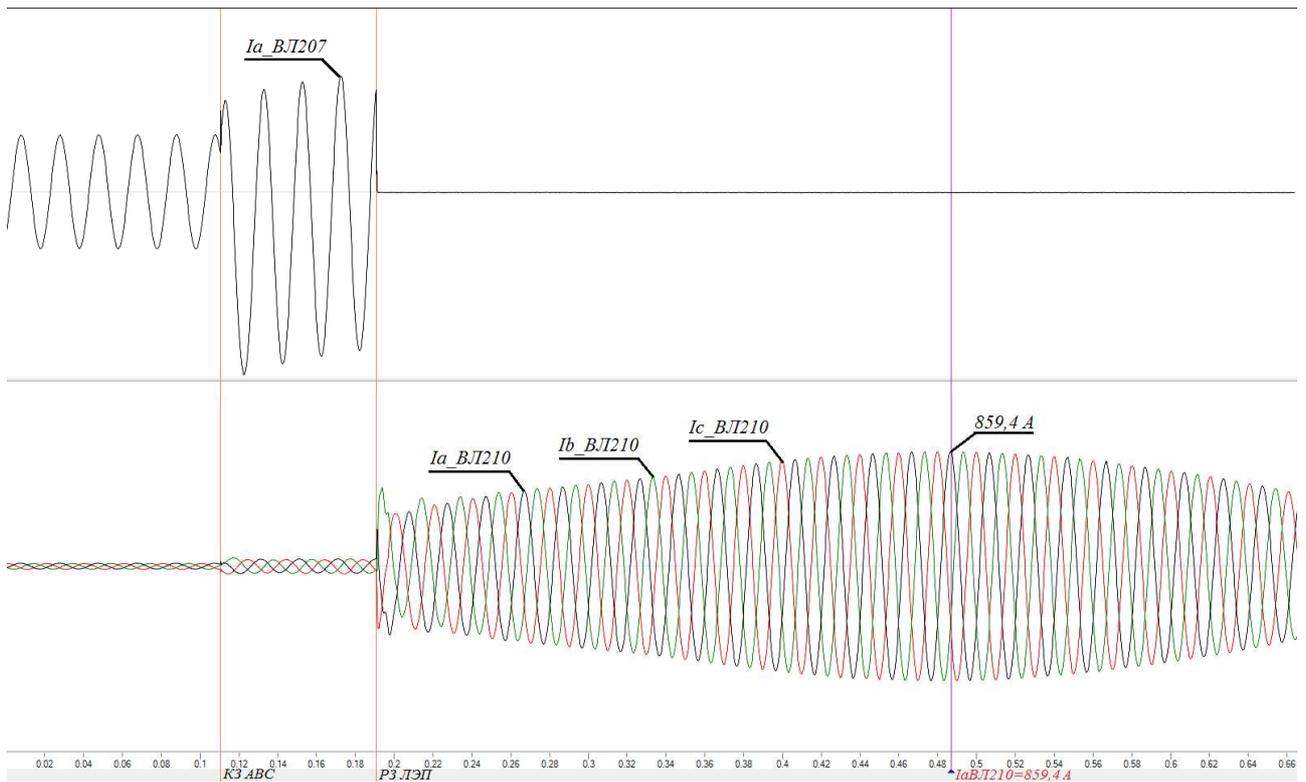


Рис. 4. Осциллограммы токов линий ВЛ-207 и ВЛ-210 при логическом учете функционирования РЗ ВЛ-207

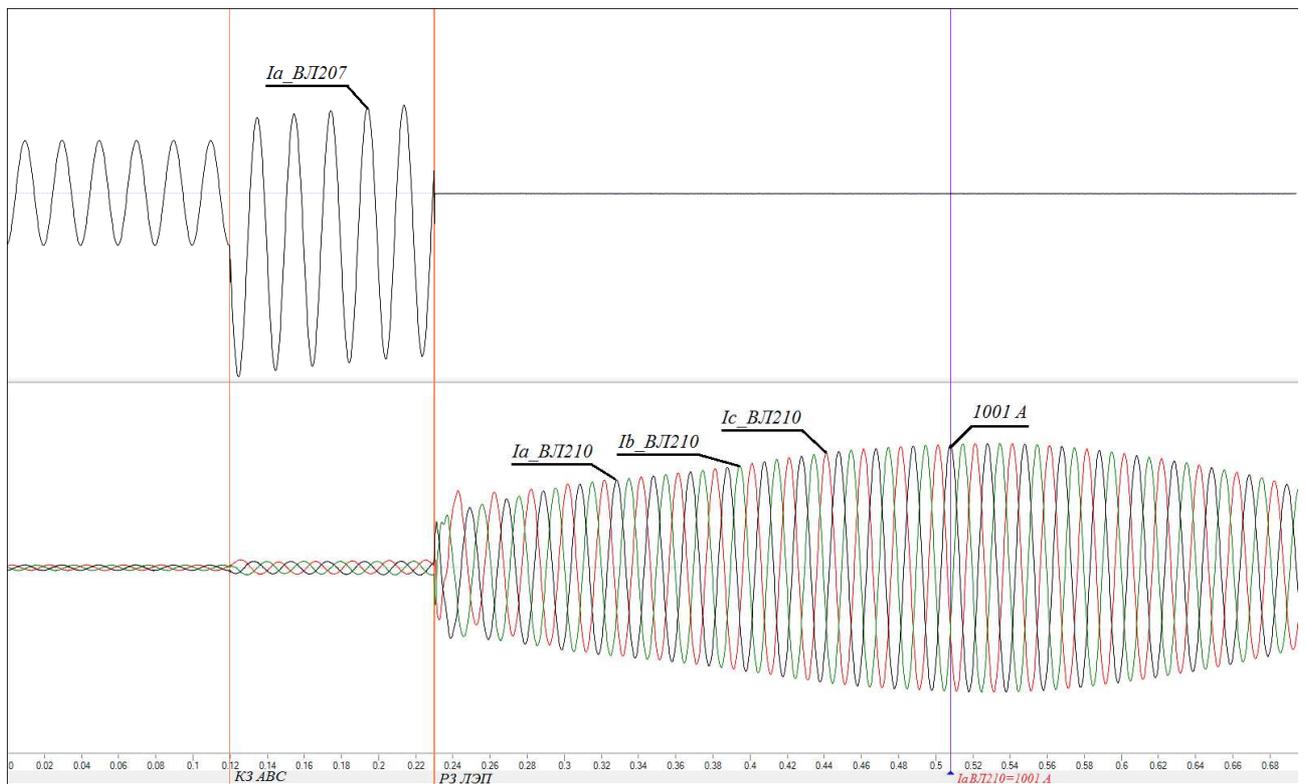


Рис. 5. Осциллограммы токов линий ВЛ-207 и ВЛ-210 при детальном моделировании функционирования РЗ ВЛ-207

## Выводы

Результаты исследований, кратко обозначенные в данной статье, позволили сделать вывод о том, что характер протекания переходных процессов в значительной степени зависит от функционирования РЗ. При этом при использовании детализированных моделей защит и их упрощенных аналогов, реализующих лишь функцию сравнения контролируемых величин с уставкой и управление коммутационной аппаратурой, протекание переходного процесса в модели ЭЭС было различным.

Вышесказанное позволяет подтвердить тот факт, что при моделировании режимов и процессов в ЭЭС необходимо учитывать должным образом все влияющие на них в значительной степени элементы, к которым в частности относится и релейная защита ЭЭС.

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

### Список литературы

1. Андреев М.В., Боровиков Ю.С. Оптимизация уставок дифференциальных защит трансформаторов и автотрансформаторов с помощью их адекватных математических моделей // Современные проблемы науки и образования, 2013. – №3; <http://www.science-education.ru/109-9343>.
2. Бабенко К.И. Основы численного анализа. – М.: Наука, 1986. – 744с.
3. Бабушка И., Витасек Э., Прагер М. Численные процессы решения дифференциальных уравнений: Пер. с англ. / Под ред. Г.И. Марчука. М.: Мир, 1969. – 368 с.
4. Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О. Принципы построения средств всережимного моделирования в реальном времени энергосистем // Электричество, 2012. – № 6 – С. 10-13.
5. Боровиков Ю.С., Сулайманов А.О. Информационно-управляющая система мультипроцессорного комплекса моделирования в реальном времени энергосистем // Электротехника, 2013. – № 5. – С. 56-63.
6. Вержбицкий В.М. Численные методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения). – М.: Высш. шк., 2001. -382с.
7. Гусев А.С. Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем//Известия ВУЗов. Проблемы энергетики, 2008, - № 9-10/1. – с. 164-170.
8. Рубан Н.Ю., Гусев А.С., Сулайманов А.О. Средства моделирования для адекватной настройки дифференциально-фазной высокочастотной защиты линий электропередачи

[Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. - 2014 - №. 3. - С. 1. -  
Режим доступа: <http://www.science-education.ru/117-r13213>.

9. Сулайманов А.О., Андреев М.В., Рубан Н.Ю. Концепция адекватного моделирования релейной защиты и противоаварийной автоматики энергосистем // Электричество, №6, 2012, с. 17 – 20.

10. Хеминг Р.В. Численные методы: Пер. с англ. / Под ред. Р.С. Гутера. М: Наука, 1968. - 400 с.

11. Холл Дж., Уатт Дж. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений: Пер. с англ. / Под ред. А.Д. Горбунова. -М.: Мир, 1979. -312с.

**Рецензенты:**

Гусев А.С., д.т.н., доцент, профессор кафедры электроэнергетических систем 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.