



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311.001

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-183-194>

Разработка программно-технических средств моделирования ветроэнергетической установки 4 типа

© И.А. Разживин, Н.Ю. Рубан, А.Б. Аскарлов, Р.А. Уфа

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Резюме: Цель – гибридное моделирование ветроэнергетических установок 4 типа, позволяющее получить достаточно полную и достоверную информацию о процессах в ветроэнергетических установках указанного типа, а также оценить влияние их внедрения в электроэнергетические системы в целом. В настоящее время в мире быстрыми темпами развивается возобновляемая энергетика преимущественно с использованием ветроэнергетических установок. Для решения большинства задач исследования, проектирования и эксплуатации ветроэнергетических установок в составе электроэнергетических систем необходима полная и достоверная информация о едином непрерывном спектре нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессов в исследуемом оборудовании и электроэнергетической системе в целом. Единственным путем получения такой информации становится преимущественно математическое моделирование ввиду недопустимости натуральных экспериментов в реальных электроэнергетических системах, особенно экспериментов аварийного характера, а также значительной ограниченности физического моделирования подобных систем. В то же время существует определенная проблема получения достоверной информации путем математического моделирования вследствие необходимости решения жестких систем дифференциальных уравнений большого порядка, описывающих процессы в элементах ветроэнергетических установок и электроэнергетических системах в целом. Данная проблематика присуща всем программно-вычислительным и программно-аппаратным комплексам для расчета режимов и процессов в электроэнергетических системах, которые неизбежно используют методы численного интегрирования, в результате чего достоверность подобных расчетов нередко оказывается низкой или неудовлетворительной. В статье представлено описание альтернативного комплексного подхода к моделированию ветроэнергетических установок 4 типа. Средством реализации данного подхода является разработанный специализированный гибридный процессор ветроэнергетических установок 4 типа, который предназначен для работы в составе Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем. Также в статье приведены фрагменты тестовых исследований произведенного специализированного гибридного процессора, подтверждающие его правильную работу. Предложенное в статье решение вопроса адекватного моделирования ветроэнергетических установок 4 типа является новым и актуальным, позволяющим (применительно к конкретной электроэнергетической системе, ее составу и топологии) получить достаточно достоверную всережимную информацию о протекающих в ней процессах для дальнейшего планирования режимов, настройки систем автоматического управления, средств релейной защиты, автоматики и др.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, возобновляемые источники энергии, электроэнергетическая система, математическое моделирование, гибридное моделирование

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № МК-1675.2019.8.

Информация о статье: Дата поступления 10 июня 2019 г.; дата принятия к печати 12 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 февраля 2020 г.

Для цитирования: Разживин И.А., Рубан Н.Ю., Аскарлов А.Б., Уфа Р.А. Разработка программно-технических средств моделирования ветроэнергетической установки 4 типа. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 1. С. 183–194. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-183-194>

Development of hardware and software simulation tools for 4 type wind turbine modeling

Igor A. Razzhivin, Nikolay Yu. Ruban, Alisher B. Askarov, Ruslan A. Ufa

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Abstract: The purpose of the paper is a hybrid simulation of 4 type wind power plants, which allows to obtain a fairly

complete and reliable information about the processes taking part in the wind power plants of the specified type, as well as to evaluate the effect from their implementation in power systems as a whole. Today renewable energy is developing rapidly in the world mainly due to the use of wind power plants. To solve most of the problems of study, design and operation of wind power plants as the components of the electric power system we need complete and reliable information about the single continuous spectrum of normal and abnormal quasi-established and transient processes in the equipment under investigation and in the electric power system as a whole. Mathematical modeling becomes the only way of obtaining such information since full-scale experiments are inadmissible in real electric power systems (especially emergency ones) and physical modeling of such systems has significant limitations. At the same time, there is a certain problem of obtaining reliable information via mathematical modeling due to the need to solve rigid systems of large order differential equations describing the processes in the elements of wind power plants and electric power systems as a whole. This problem is characteristic of all software, computing and hardware-software systems designed for calculating modes and processes in electric power systems. They inevitably use numerical integration methods as a result the reliability of such calculations is low or unsatisfactory. The article describes an alternative integrated approach to 4 type wind turbine modeling. This approach is implemented by means of the developed specialized hybrid processor of type 4 wind power plants, which is designed to operate as a part of the All-mode real-time modeling complex of electric power systems. The article provides the fragments of test studies of the produced specialized hybrid processor that confirm its correct operation. The solution of the problem of adequate modeling of 4 type wind turbines proposed in the article is new and relevant (as applied to the certain electric power system, its composition and topology) and allows to obtain sufficiently reliable, all-mode information on the processes occurring in it for further planning of modes, setting of automatic control systems, relay protection, automation, etc.

Keywords: wind turbine, renewable sources of energy, electric power system, mathematical modeling, hybrid modeling

Acknowledgments: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant No. MK-1675.2019.8.

Information about the article: Received June 10, 2019; accepted for publication December 12, 2019; available online February 28, 2020.

For citation: Razzhivin IA, Ruban NYu, Askarov AB, Ufa RA. Development of hardware and software simulation tools for 4 type wind turbine modeling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(1):183–194. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-1-183-194>

1. ВВЕДЕНИЕ

Необходимость в энергетической безопасности, ограниченность углеводородных и урановых ресурсов, а также положения Киотского протокола послужили основным двигателем в развитии возобновляемой энергетики в большинстве стран мира. Среди возобновляемых источников энергии наибольшими темпами развивается ветроэнергетика. Согласно данным Глобального совета по ветроэнергетике, на конец 2018 г. суммарная установленная мощность ветроэнергетических установок (ВЭУ) в мире составила порядка 592 ГВт. В течение данного года более чем в 40 различных странах было ведено около 51,3 ГВт новых мощностей на базе ВЭУ [1–5]. Таким образом, постепенно во многих странах мира ВЭУ, объединяемые в мощ-

ные ветроэлектростанции (ВЭС), стали неотъемлемой частью электроэнергетических систем (ЭЭС). Причем среди разных видов ВЭУ наиболее применимыми для работы в составе ЭЭС являются ВЭУ 4 типа, представляющие собой ветротурбину с синхронным генератором с возбуждением от постоянных магнитов, присоединенным через вставку постоянного тока и трансформатор связи к узлу ЭЭС¹ [6].

Для российской энергетики ограниченность углеводородными и урановыми ресурсами не предвидится в ближайшей перспективе, однако актуальность исследования совместной работы ВЭУ в ЭЭС для России обусловлена строительством и внедрением в ЭЭС юга России порядка 1,5 ГВт ветрогенерации к 2020 г. [7, 8]. Для энергосистемы России ВЭУ являются новыми элементами, технические требования

¹Венге К., Геске М., Ломбарди П., Москаленко Н., Музиковски Х.-Д., Повалко М. [и др.]. Возобновляемые источники энергии: теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика: учеб. пособ. / под ред. З.А. Стычинского, Н.И. Воропая. Магдебург: Изд-во ун-та Отто-фон-Герике, 2010. 211 с.



к которым в части их параллельной работы с ЭЭС до настоящего времени не разрабатывались. В то же время большой опыт применения ВЭУ накоплен за рубежом, где разработаны и с каждым годом актуализируются технические и технологические требования к подобного рода установкам. Во многих странах данные требования отражаются в нормативных документах и стандартах (сетевых кодексах) на национальном уровне [9]. Например, в зарубежных сетевых кодексах Дании, Германии, Китая, США и др. сформулированы особые требования о недопустимости отключения установок на базе ВЭУ при различных типах возмущений: способность поддержания непрерывного энергоснабжения при возмущениях или способность поддержания непрерывности электроснабжения при низком напряжении (fault ride-through или low voltage ride-through capabilities, соответственно). Такие требования разрабатываются и принимаются для каждой топологии сети индивидуально, что значительно актуализирует необходимость исследования работы ВЭУ в ЭЭС России. В связи с этим описанный в статье комплексный подход к моделированию ВЭУ 4 типа позволяет получить для этого всю необходимую информацию.

2. ПРОБЛЕМАТИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Для решения большинства задач исследования, проектирования и эксплуатации ЭЭС, в том числе ЭЭС с ВЭУ, необходима полная и достоверная информация о едином непрерывном спектре нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессов в оборудовании и ЭЭС в целом. Ввиду недопустимости натуральных экспериментов в реальных ЭЭС, особенно экспериментов аварийного характера, а также значительной ограниченности физического моделирования ЭЭС единственным путем получения всей необходи-

мой информации становится преимущественно математическое моделирование² [10, 11].

Однако полученная в результате совокупная математическая модель любой реальной ЭЭС, в том числе с ВЭУ, даже с учетом приемлемого частичного эквивалентирования, неизбежно содержит жесткую нелинейную систему дифференциальных уравнений чрезвычайно большой, по математическим меркам, размерности, плохо обусловленную на ограничительных условиях применимости теории методов численного интегрирования и, соответственно, не подлежащую удовлетворительному решению [12, 13].

Единственный путь улучшения обусловленности – это снижение жесткости и размерности совокупной системы дифференциальных уравнений, которые могут быть осуществлены только за счет радикального ее упрощения и применения деконпозиции, в соответствии с ней выделяются и отдельно рассчитываются нормальные и аварийные установившиеся режимы, а также различные стадии переходных процессов на ограниченном интервале их воспроизведения. В результате существенно утрачивается полнота и достоверность получаемой таким образом информации. Кроме этого, независимо от всех упрощений и ограничений, методическая ошибка, принципиально характерная численному интегрированию дифференциальных уравнений, всегда остается неизвестной.

Вышеобозначенная проблематика свойственна всем программно-вычислительным (ПВК) и программно-аппаратным комплексам (ПАК) для расчета режимов ЭЭС с ВЭУ, которые неизбежно используют методы численного интегрирования. Распространенными ПВК для моделирования ЭЭС и ЭЭС с ВЭУ являются EMTDC/PSCAD (Power Systems Computer Aided Design/Electro Magnetic Transients including DC), EMTP (Electro Magnetic Transient Program), MATLAB Simulink, PSS/E

²Веников В.А. Теория подобия и моделирования: учеб. пособ. М.: Высш. шк., 1976. 479 с.

(Power System Simulator for Engineering), SIMPOW (SIMulation of POWer systems) и DlgSILENT (PowerFactory) [14, 15]. При моделировании больших моделей ЭЭС их вычислительные мощности и возможности ограничены, к примеру, в EMTP моделирование 10-секундного режима работы 5 ВЭУ с эквивалентной ЭЭС с шагом 50 мкс может занимать до 10 мин [16].

Моделирование ВЭС в составе ЭЭС – задача трудоемкая, т.к. реальные ВЭС объединяют в себе десятки ВЭУ, присоединенных к общему узлу ЭЭС, а использование эквивалентных моделей для представления ВЭС не является достаточным для получения полных сведений о динамике ВЭС, более того, в ВЭС выработка мощности отдельными ВЭУ различна в силу неравномерности распределения скорости ветра, различия рельефа и т.д. Разные типы ВЭУ имеют неодинаковую реакцию на возникающие возмущения (особенно аварийные) из-за их различных механических и электрических параметров (скорости ветра, электрической удаленности от места присоединения).

Несмотря на достаточно глубокое изучение ВЭУ и ЭЭС, комплекс вопросов, связанных с получением достаточно полной и достоверной информации о работе ВЭУ в ЭЭС остается актуальным и сейчас.

3. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

На основании вышеизложенного, разработана концепция всережимного гибридного моделирования ВЭУ 4 типа в составе ЭЭС в темпе реального времени и на неограниченном интервале, а также средства ее реализации. Гибридное моделирование включает:

1) аналоговую часть – для решения систем дифференциальных уравнений математически моделируемого оборудования используется способ методически точного

непрерывного неявного интегрирования, осуществляемый посредством разработки специализированных параллельных цифро-аналоговых структур – гибридных сопроцессоров (ГСП);

2) физическое моделирование – воспроизведение спектра всевозможных коммутационных процессов оборудования ВЭУ, связанных с различными короткими замыканиями, работой выключателей и силовых полупроводниковых элементов вставки постоянного тока (ВПТ), обеспечивается с помощью цифруправляемых физических моделей на базе цифруправляемых аналоговых ключей (ЦУАК);

3) цифровую часть, обеспечивающую управление коэффициентами и параметрами математически моделируемого оборудования ВЭУ, состоянием ЦУАК, всех информационно-управляющих функций, отображение и преобразование информации, реализацию алгоритмов автоматики и релейной защиты.

В Томском политехническом университете разработан Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС). Данная разработка является наиболее проработанным решением, позволяющим решать обозначенные проблемы моделирования, что подтверждается множеством экспериментальных исследований. ВМК РВ ЭЭС представляет собой многопроцессорную программно-техническую систему реального времени гибридного типа, объединяющую в себе адаптируемую совокупность специализированных гибридных процессоров (СГП) всего значимого оборудования моделируемой ЭЭС [17]. В соответствии с гибридным подходом для решения задач моделирования ВЭУ в ЭЭС разработан неприменимый ранее СГП ВЭУ 4 типа (рис. 1).

Моделирование ВЭУ 4 типа в ВМК РВ ЭЭС позволяет исключить:

– декомпозицию режимов и процессов;
– упрощение математических моделей оборудования и ЭЭС;

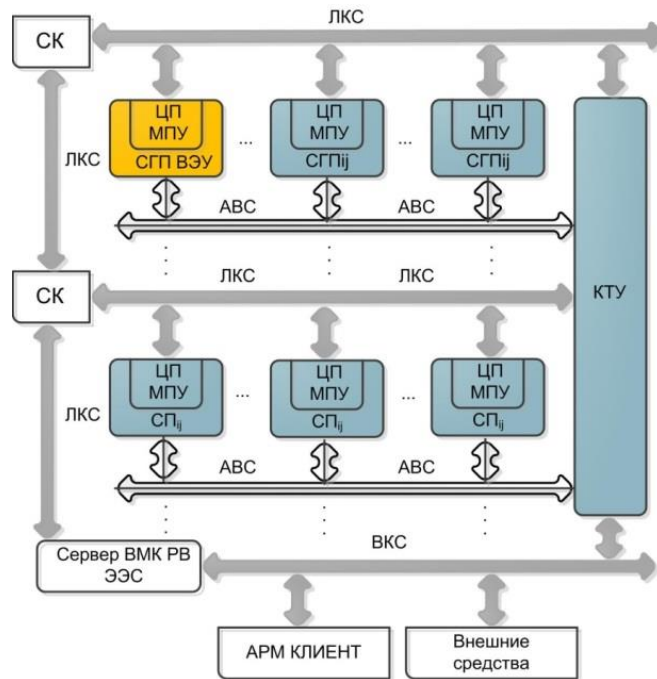


Рис. 1. Структурная схема Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем: ВС – внешние средства (СММР, SCADA, PMU), КТУ – коммутатор трехфазных узлов, СК – сетевой коммутатор, ЛКС – локальная компьютерная сеть, ВКС – внешняя компьютерная сеть; АРМ клиент – автоматизированное рабочее место клиента, ЦП – центральный процессор, МПУ – микропроцессорный узел

Fig. 1. Block diagram of All-mode modeling complex of energy system real time: ВС – external means (Transient Mode Monitoring System, SCADA, PMU), КТУ – three-phase node switchboard, СК – network switchboard, ЛКС – local computer network, ВКС – external computer network; client АРМ – automated client workstation; ЦП – central processor; МПУ – microprocessor node

– ограничение интервала воспроизведения процессов и методическую ошибку путем применения метода непрерывного, неявного, параллельного, методически точного интегрирования в реальном времени.

Для реализации совокупной математической модели ВЭУ 4 типа разработаны структура и средства реализации СГП ВЭУ 4 типа с учетом сопутствующего оборудования (рис. 2).

1. ЦП предназначен для обеспечения взаимодействия между Сервером ВМК РВ ЭЭС и ПАЦП, Сопроцессором и ПК посредством ЛКС, и выполняет функции приема режимных данных от Сервера ВМК РВ ЭЭС, а также задание их в соответствующие ГСП, передачу данных моделирования на Сервер ВМК РВ ЭЭС, синхронизацию работы всех процессоров МПУ СГП ВЭУ в ВМК РВ ЭЭС.

2. Посредством ПАЦП обеспечивается аналого-цифровое преобразование,

чтение и обработка данных моделирования, а также функциональное управление, включая динамическое, задаваемыми в соответствующие ГСП параметрами моделируемого оборудования, в частности электрической машины, трансформатора связи и др., а также передачу необходимых режимных данных и параметров в сопроцессор. Кроме этого, в ПАЦП осуществляется оцифровка и функциональная обработка данных моделирования для реализации алгоритмов системы автоматического управления преобразователем: преобразование координат, формирование управляющих воздействий для широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и др.

3. СП осуществляет прием данных от ЦП и ПАЦП для решения модели так называемого первичного двигателя (модель ветра, модель аэродинамического преобразования) и реализации системы автоматического управления (угол тангажа,

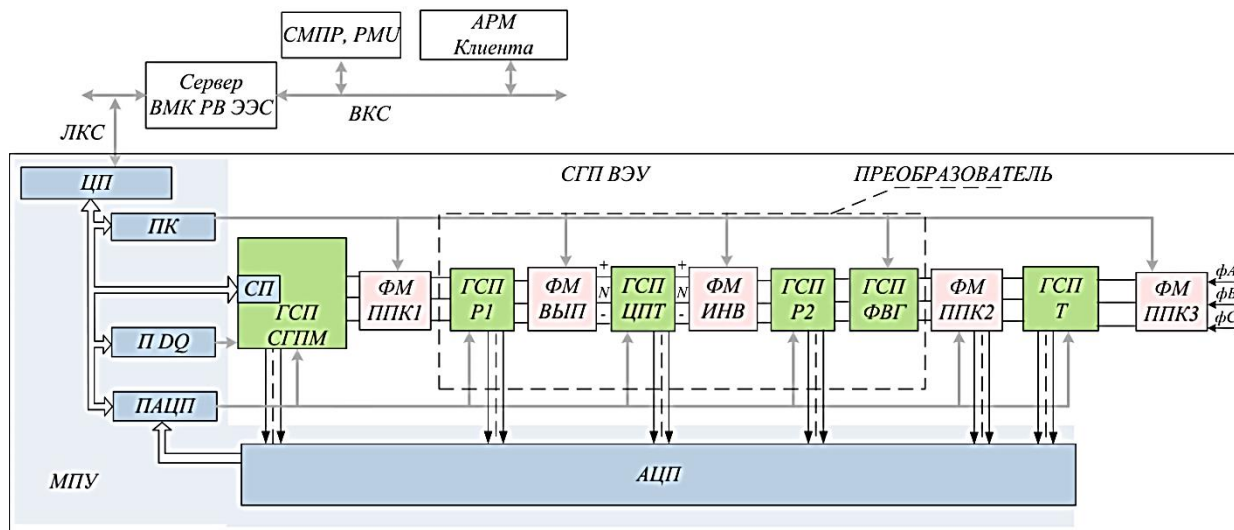


Рис. 2. Структурная схема специализированного гибридного процессора ветроэнергетической установки 4 типа: СП – сопроцессор; ПК – процессор коммутации; П DQ – процессор DQ преобразований; ПАЦП – процессор АЦП; ГСП СГПМ – гибридный сопроцессор синхронного генератора с системой возбуждения от постоянных магнитов; ФМ ППК 1, ППК 2, ППК 3 – физическая модель продольно-поперечного коммутатора; ГСП Р1, Р2 – гибридный сопроцессор реактора 1 и 2; ФМ ВЫП – физическая модель преобразователя напряжения, обеспечивающая выпрямление; ФМ ИНВ – физическая модель преобразователя напряжения обеспечивающая инвертирование; ГСП ЦПТ – гибридный сопроцессор цепи постоянного тока; ГСП ФВГ – гибридный сопроцессор фильтра высших гармоник; ГСП Т – гибридный сопроцессор трансформатора, применяется для согласования уровней напряжения сети и выходного напряжения ветроэнергетических установок

Fig. 2. Block diagram of the specialized hybrid processor of the type 4 wind power plant СП – coprocessor; ПК – switching processor; П DQ – DQ transform processor; ПАЦП – ADC processor, ГСП СГПМ – hybrid coprocessor of a synchronous generator with a constant magnet excitation system; ФМ ППК 1, ППК 2, ППК 3 – physical model of the longitudinal-transverse switch; ГСП Р1, Р2 – hybrid co-processor of reactor 1 and 2; ФМ ВЫП – physical model of voltage converter providing rectification; ФМ ИНВ – physical model of voltage converter providing inverting; ГСП ЦПТ – hybrid DC co-processor; ГСП ФВГ – hybrid coprocessor of higher harmonics filter; ГСП Т – hybrid co-processor of a transformer used for matching network voltage levels and the output voltage of wind turbines

работа преобразователя), а также для формирования и трансляции параметров в гибридный сопроцессор электрической машины ВЭУ.

Моделирование ветрового потока и его аэродинамическое преобразование реализовано в СП СГП ВЭУ 4 типа путем синтеза математических моделей, принятых в мировой электроэнергетике [6, 18]. Модель аэродинамического преобразования с учетом задания модели системы управления углом тангажа β может быть представлена уравнением (1):

$$P_{MEH} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(Z, \beta), \quad (1)$$

где C_p – коэффициент использования энергии ветра; ρ – плотность воздуха, πR^2 –

площадь, ометаемая ветроколесом; R – радиус ветроколеса; V – скорость ветра; β – угол атаки лопастей ветроколеса (угол тангажа).

Модель ветрового потока с учетом его турбулентной составляющей описывается выражением (2):

$$V = V_0 + V(t), \quad (2)$$

где V_0 – средняя скорость ветра, определяемая по справочникам и кадастрам с учетом географического расположения и высоты ВЭУ; $V(t)$ – турбулентная составляющая скорости ветра, аппроксимируемая спектральной моделью Каймала.

Также в СП решается математическая модель уравнения движения ротора



ВЭУ, по результатам решения которой вычисляется угловая частота вращения ротора ВЭУ.

4. В ПК реализуются ШИМ и формирование управляющих воздействий для ЦУАК ФМ преобразователей напряжения ВПТ и ППК.

5. МПУ обеспечивает все информационно-управляющие функции СГП ВЭУ 4 типа: коммуникации с Сервером ВМК РВ ЭЭС, прием и обработка данных моделирования, реализация системы управления ВЭУ, управление параметрами моделируемого оборудования, в том числе состоянием ЦУАК.

В качестве примера рассмотрена функциональная схема ГСП синхронного генератора на постоянных магнитах (СГПМ) (рис. 3).

Адаптированная для СГПМ всережимная математическая модель с взаимным преобразованием переменных $dq \leftrightarrow ABC$ образуют систему уравнений [19-20]:

1. Уравнение внутренних электродвижущих сил (ЭДС) в воздушном зазоре в осях dq :

$$E_{id} = x_{ad}i_d + E_{IM}, E_{iq} = x_{aq}i_q + E_{IM}. \quad (3)$$

2. Уравнение для токов статорных и роторных контуров в осях dq :

$$i_d = \frac{1}{x_\sigma}(\Psi_d - E_{id}), i_q = \frac{1}{x_\sigma}(\Psi_q - E_{iq}). \quad (4)$$

3. Уравнение напряжения статора по оси q :

$$u_q = \omega\Psi_d - \frac{d\Psi_q}{dt} - r_a i_q. \quad (5)$$

4. Уравнение напряжения статора по оси d :

$$u_d = -\omega\Psi_q - \frac{d\Psi_d}{dt} - r_a i_d, \quad (6)$$

где $\frac{d\Psi_q}{dt}$, $\frac{d\Psi_d}{dt}$, $\omega\Psi_d$, $\omega\Psi_q$ – соответствующие трансформаторные ЭДС и ЭДС вращения; i_d , i_q – составляющие тока статора в системе dq ; r_a – активное сопротивление статорной обмотки; u_d, u_q – составляющие напряжения статора в системе dq ;

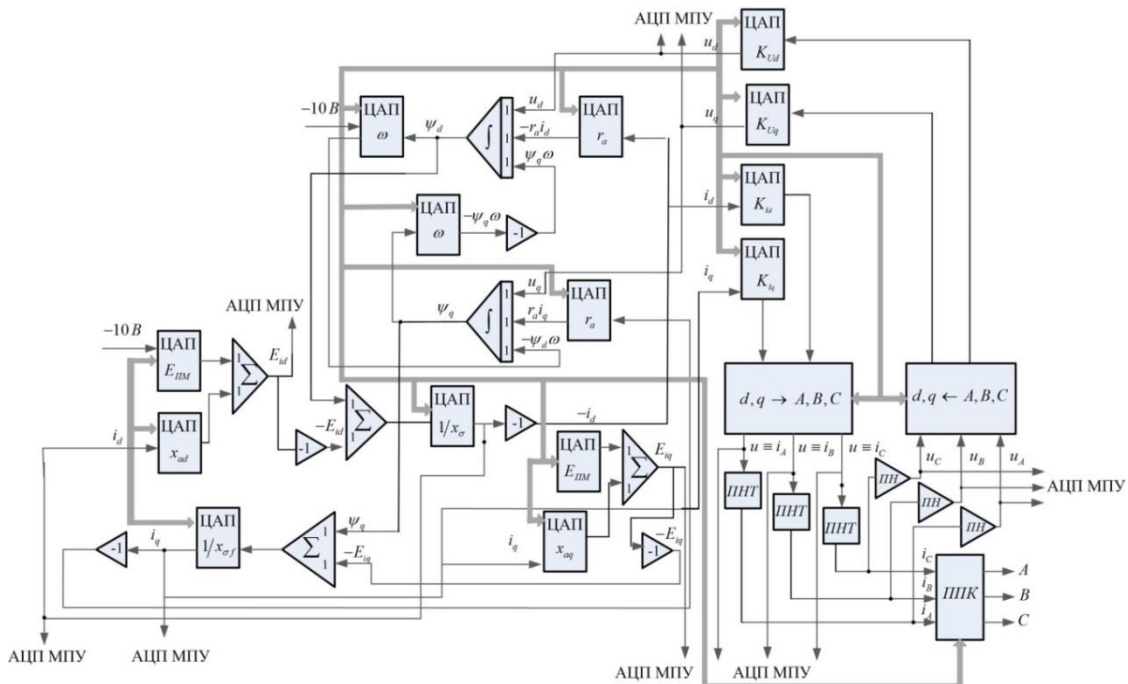


Рис. 3. Функциональная схема гибридного сопроцессора синхронного генератора на постоянных магнитах

Fig. 3. Functional diagram of hybrid coprocessor of synchronous permanent magnet generator

x_σ – сопротивление рассеяния контуров статора; x_{aq}, x_{ad} – сопротивления взаимной индукции в соответствующих осях между контурами ротора и статора; $E_{ПМ}$ – ЭДС, формируемая в обмотках статора постоянными магнитами.

5. Формируемая в ЦП $E_{ПМ}$ определяется в соответствии со следующим выражением:

$$E_{ПМ} = \frac{4K_{ОБ}K_\Phi}{p} W_\Phi f D_M L_M B_r, \quad (7)$$

где W_Φ – число витков в фазной обмотке; $K_{ОБ}$ – обмоточный коэффициент; K_Φ – коэффициент формы магнитного поля; D_M – диаметр постоянного магнита; L_M – длина активной части статора; B_r – значение магнитной индукции, создаваемое постоянным магнитом; p – число пар полюсов; f – частота.

Гибридные сопроцессоры трансформатора связи, фильтра высших гармоник, фазных реакторов, ЦПТ воспроизводятся аналогичным способом посредством специализированных параллельных цифро-аналоговых структур.

4. ТЕСТИРОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ГИБРИДНОГО ПРОЦЕССОРА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Для оценки свойств и возможностей разработанного СГП ВЭУ 4 типа, а также для подтверждения правильности воспроизведения посредством СГП ВЭУ 4 типа нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессов, было проведено тестирование разработанного СГП ВЭУ 4 типа с аналогичной моделью, реализованной в ПАК Real Time Digital Power System Simulator (RTDS), предназначенном для моделирования тестовых схем ЭЭС в режиме реального времени.

В качестве примера в статье приведены фрагменты тестовых исследований динамики работы ВЭУ 4 типа с мощностью

5 МВт в режиме реального времени при ступенчатом изменении момента турбины ВЭУ (рис. 4), а также при моделировании трехфазного короткого замыкания на шинах трансформатора связи (рис. 5–6).

На рис. 4 представлены осциллограммы активной мощности действующего значения тока и момента ВЭУ при его ступенчатом изменении. Результаты моделирования согласуются с аналогичными результатами, полученными в RTDS.

Полученные осциллограммы мгновенных значений тока трех фаз и активной мощности СГПМ при возникновении трехфазного короткого замыкания на шинах трансформатора связи ВЭУ (рис. 5–6) в целом демонстрируют схожий характер протекания переходных процессов. Однако, как можно заметить, характер изменения значений активной мощности, а также фазных токов, полученных с помощью разработанного СГП ВЭУ 4 типа, несколько отличается от того, который получен посредством моделирования в RTDS. Различия в активной мощности связаны, с одной стороны, с возникновением коммутационных перенапряжений при устранении короткого замыкания, воспроизведение которых путем цифрового моделирования не соответствует реальному характеру переходного процесса, а с другой – использованием в RTDS фильтра нижних частот первого порядка, интегрированного в саму модель машины на постоянных магнитах, с постоянного времени $\tau = 0,02$ с для регистрации значений выходной мощности. При этом в разработанном СГП все коммутации производятся на физическом уровне посредством ЦУАК, что является более достоверным воспроизведением обозначенных процессов коммутации, а измерение, регистрация и осциллографирование параметров осуществляются в изначальном виде исходя из мгновенных значений без предварительной обработки. Искажения синусоидальности фазных токов у СГП ВЭУ сопряжены с наличием спектра высших гармоник в начальный момент возникновения короткого замыкания (в течение примерно

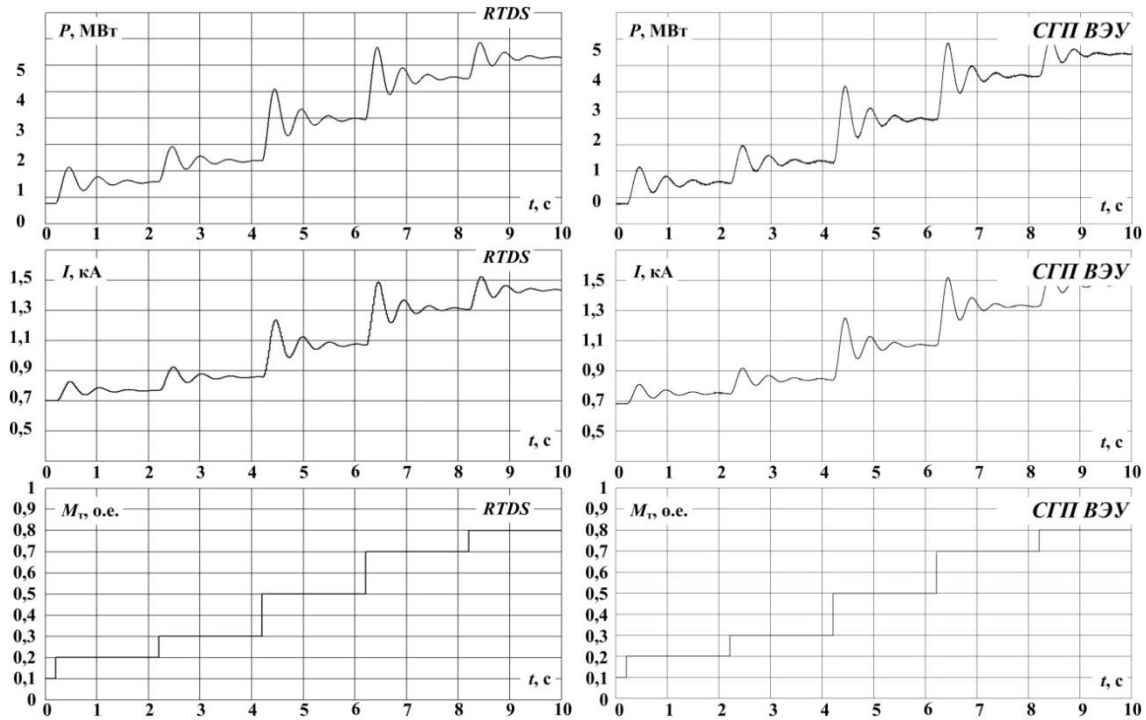


Рис. 4. Результирующие осциллограммы синхронного генератора на постоянных магнитах при ступенчатом изменении момента турбины (P – активная мощность, I – полный ток, M_T – момент турбины)

Fig. 4. Resulting oscillograms of a synchronous permanent magnet generator under a step change in the turbine moment (P – active power, I – total current, M_T – turbine moment)

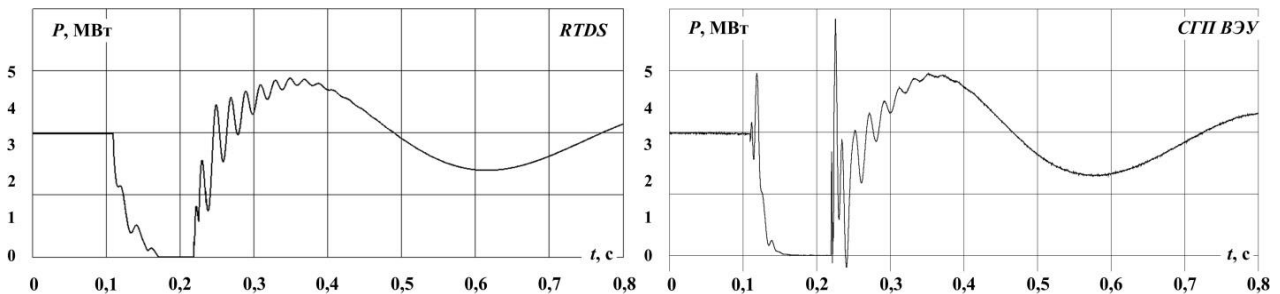


Рис. 5. Результирующие осциллограммы активной мощности (P) синхронного генератора на постоянных магнитах при возникновении трехфазного короткого замыкания

Fig. 5. Resulting oscillograms of the active power (P) of the synchronous permanent magnet generator under the three-phase short circuit mode

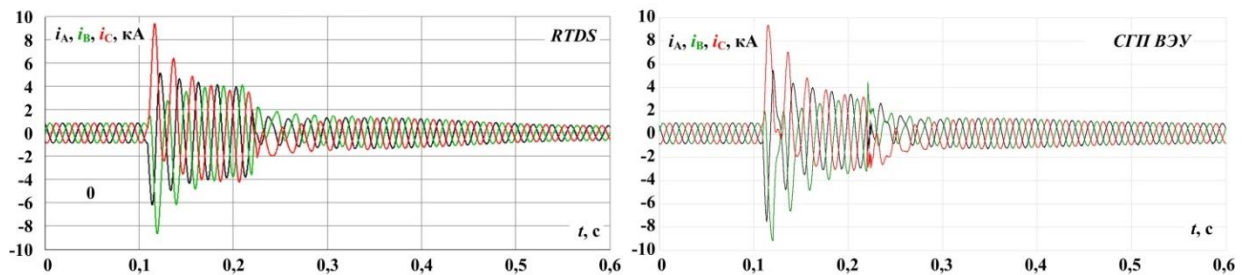


Рис. 6. Результирующие осциллограммы фазных токов (i_A, i_B, i_C) синхронного генератора на постоянных магнитах при возникновении трехфазного короткого замыкания

Fig. 6. Resulting waveforms of phase currents (i_A, i_B, i_C) of the synchronous permanent magnet generator in the three-phase short circuit mode

0,05 с, далее токи имеют синусоидальный вид), поскольку замыкание фаз на землю с помощью упомянутых аналоговых ключей осуществляется поочередно с неопределенной задержкой по времени (в сравнении с математической моделью в RTDS), которая напрямую зависит от характеристик используемой элементной базы, что несколько более адекватно отображает моделируемый процесс и в то же время незначительно влияет на разницу в значениях (относительная погрешность составляет примерно 1,7%) и характер протекания процесса.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлено описание предложенной концепции всережимного моделирования ВЭУ 4 типа в ЭЭС в реальном времени и на неограниченном интер-

вале, а также средства ее реализации. Разработанный СГП ВЭУ 4 типа позволяет принципиально исключить проблемы, препятствующие достаточно полному и достоверному моделированию единого непрерывного спектра квазиустановившихся и переходных процессов ВЭУ в ЭЭС при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах ее работы. Разработанные средства могут быть использованы для прогнозирования работы ВЭУ 4 типа в ЭЭС для дальнейшей настройки систем автоматического управления ВЭУ, устройств релейной защиты и автоматики внешней ЭЭС и др. В рамках предложенного подхода в дальнейшем планируется реализовать модели ВЭУ 1–3 типов. Предложенное решение мультипликативно и может быть использовано при моделировании ВЭС неограниченной размерности.

Библиографический список

1. Muljadi E., Yin Cheng Zhang, Gevorgian V., Kosterev D. Understanding Dynamic Model Validation of a Wind Turbine Generator and a Wind Power Plant // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (Milwaukee, 18–22 September 2016). Milwaukee: IEEE, 2016. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2016.7855542>
2. Аюев Б.И., Герасимов А.С., Есипович А.Х., Куликов Ю.А. Верификация цифровых моделей ЭЭС/ОЭС // Электричество. 2008. № 5. С. 2–7.
3. Герасимов А.С., Есипович А.Х., Смирнов А.Н. Об опыте верификации цифровых и физических моделей энергосистем // Электрические станции. 2010. № 11. С. 14–19.
4. Renewables 2018 // Global Status Report [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/> (13.03.2019).
5. Annual Global Wind Report // GWEC Global Wind Energy Council [Электронный ресурс]. URL: <https://gwec.net/members-area-market-intelligence/reports/> (13.03.2019).
6. Ackermann T. Wind Power in Power Systems. 2nd ed. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, 2012. 1049 p. <https://doi.org/10.1002/0470012684>
7. Фонд Роснано и Фортум получили право строительства 823 МВт ветрогенерации // Роснано [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rusnano.com/about/press-centre/news/20180613-rosnano-fond-razvitiya-vetroenergetiki-poluchil-pravo-stroitelstva-823-mvt-vetrogeneratsii> (15.03.2019).
8. Росатом применит в проектах по ветроэнергетике лопасти производства GE // РИА Новости [Электронный ресурс]. URL: <https://ria.ru/atomtec/20180513/1520441828.html> (15.03.2019).
9. The Grid Code. 2017. Issue 5. 698 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nationalgrid.com/sites/default/files/documents/8589935310-Complete%20Grid%20Code.pdf> (15.03.2019).
10. Hengdao Guo, Ciyan Zheng, Herbert Ho-Ching Lu, Fernando T. A critical review of cascading failure analysis and modeling of power system // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 80. P. 9–2. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.206>
11. Negnevitsky M., Voropai N., Kurbatsky V., Tomin N., Panasetzky D. Development of an intelligent system for preventing large-scale emergencies in systems // Power and Energy Society General Meeting (Vancouver, 21–25 July 2013). Vancouver: IEEE, 2013. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESMG.2013.6672099>
12. Butcher J.C. Numerical methods for ordinary differential equations // John Wiley & Sons. 2016. P. 31–40 <https://doi.org/10.1002/9781119121534>
13. Холл Д., Уатт Д. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / пер. с англ. М.: Мир, 1979. 312 с.
14. Lund T., Eek J., Uski S., Perdana A. Dynamic fault simulation of wind turbines using commercial simulation tools // 5th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms (Glasgow, 7–8 April 2005). Glasgow, 2005. P. 1–9.
15. Agrawal R., Bharradwaj S.K., Kothari D.P. An Educational and Professional Simulation Tools in Power Systems and FACTS controllers – «An Overview» // International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering. 2013. Vol. 2. Issue 2. P. 91–96.
16. Multi-time-step and multi-core simulations // EMTP



[Электронный ресурс]. URL: <https://www.emtp-software.com/page/fmi-options?q=page/fmi-options> (15.03.2019).

17. Гусев А.С., Хрущев Ю.В., Гуринов С.В., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем // *Электричество*. 2009. № 12. С. 5–8.

18. Akhmatov V., Nielsen A.H., Pedersen J.K., Nymann O. Variable-Speed Wind Turbines with Multi-Pole Synchronous Permanent Magnet Generators. Part I: Modeling in Dynamic Simulation Tools // *Wind Engineering*.

2003. Vol. 27. Issue 6. P. 531–548. <https://doi.org/10.1260/030952403773617490>

19. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1985. 169 с.

20. Dehkordi A.B., Gole A.M., Maguire T.L. Permanent Magnet Synchronous Machine model for Real-Time Simulation // *International Conference on Power System Transients (Montreal, 19–23 June 2005)*. Montreal: IEEE, 2005. P. 1–6.

References

1. Muljadi E, Yin Cheng Zhang, Gevorgian V, Kosterev D. Understanding dynamic model validation of a wind turbine generator and a wind power plant. In: *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 18–22 September 2016, Milwaukee. Milwaukee: IEEE; 2016, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2016.7855542>

2. Ayuev BI, Gerasimov AS, Esipovich AH, Kulikov YuA. Verification of unified energy system/United energy system digital models. *Elektrichestvo = Electricity* 2008;5:2–7. (In Russ.)

3. Gerasimov AS, Esipovich AH, Smirnov AN. Experience of verification of digital and physical models of electric power systems. *Elektricheskie stancii = Electrical stations*. 2010;11:14–19. (In Russ.)

4. Renewables 2018. *Global Status Report*. Available from: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/> [Accessed 13th March 2019].

5. Annual Global Wind Report. *GWEC Global Wind Energy Council*. Available from: <https://gwec.net/members-area-market-intelligence/reports/> [Accessed 13th March 2019].

6. Ackermann T. *Wind Power in Power Systems*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons; 2012, 1049 p. <https://doi.org/10.1002/0470012684>

7. The Rusnano Foundation and Fortum received the right to build 823 MW of wind power generation. *Rosnano*. Available from: <http://www.rusnano.com/about/press-centre/news/20180613-rosnano-fond-razvitiya-vetroenergetiki-poluchil-pravo-stroitelstva-823-mvt-vetro-generatsii> [Accessed 15th March 2019].

8. Rosatom will use GE blades in wind energy projects. *RIA Novosti*. Available from: <https://ria.ru/atomtec/20180513/1520441828.html> [Accessed 15th March 2019].

9. The Grid Code. 2017;5:698. Available from: <https://www.nationalgrid.com/sites/default/files/documents/8589935310-Complete%20Grid%20Code.pdf> [Accessed 15th March 2019].

10. Hengdao Guo, Ciyang Zheng, Herbert Ho-Ching Lu, Fernando T. A critical review of cascading failure analysis and modeling of power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;80:9–2. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.206>

11. Negnevitsky M, Voropai N, Kurbatsky V, Tomin N, Panasetzky D. Development of an intelligent system for

preventing large-scale emergencies in systems. In: *Power and Energy Society General Meeting*. 21–25 July 2013, Vancouver. Vancouver: IEEE; 2013, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESMG.2013.6672099>

12. Butcher JC. *Numerical methods for ordinary differential equations*. John Wiley & Sons. 2016;31–40 <https://doi.org/10.1002/9781119121534>

13. Hall D, Watt D. *Modern numerical methods for solving ordinary differential equations*, 1979, 312 p. (Russ. ed.: *Sovremennye chislennye metody resheniya obyknovennykh differentsial'nykh uravnenij*. Moscow, Mir, 1979, 312 p.)

14. Lund T, Eek J, Uski S, Perdana A. Dynamic fault simulation of wind turbines using commercial simulation tools. In: *5th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms*. 7–8 April 2005, Glasgow. Glasgow; 2005, p. 1–9.

15. Agrawal R, Bharradwaj SK, Kothari DP. An Educational and Professional Simulation Tools in Power Systems and FACTS controllers – “An Overview”. *International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering*. 2013;2(2):91–96.

16. Multi-time-step and multi-core simulations. *EMTP*. Available from: <https://www.emtp-software.com/page/fmi-options?q=page/fmi-options> [Accessed 15th March 2019].

17. Gusev AS, Hrushchev YuV, Gurin SV, Svechkaev SV, Plodistyj IL. Electric power system real time all-mode modeling complex. *Elektrichestvo = Electricity*. 2009;12:5–8. (In Russ.)

18. Akhmatov V, Nielsen AH, Pedersen JK, Nymann O. Variable-Speed Wind Turbines with Multi-Pole Synchronous Permanent Magnet Generators. Part I: Modeling in Dynamic Simulation Tools. *Wind Engineering*. 2003;27(6):531–548.

<https://doi.org/10.1260/030952403773617490>

19. Ledovskij AN. *Electric machines with highly coercive permanent magnets*. Moscow: Energoatomizdat; 1985, 169 p. (In Russ.)

20. Dehkordi AB, Gole AM, Maguire TL. Permanent Magnet Synchronous Machine model for Real-Time Simulation. In: *International Conference on Power System Transients*. 19–23 June 2005, Montreal. Montreal: IEEE; 2005, p. 1–6.

Критерии авторства

Разживин И.А., Рубан Н.Ю., Аскарлов А.Б., Уфа Р.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Разживин Игорь Андреевич,
ассистент отделения электроэнергетики
и электротехники,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;
✉ e-mail: lionrash@tpu.ru

Рубан Николай Юрьевич,
кандидат технических наук,
доцент отделения электроэнергетики
и электротехники,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;
e-mail: rubanny@tpu.ru

Аскарлов Алишер Бахрамжонович,
инженер-исследователь научно-исследовательской
лаборатории «Моделирование
электроэнергетических систем»,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;
e-mail: aba7@tpu.ru

Уфа Руслан Александрович,
кандидат технических наук,
доцент отделения электроэнергетики
и электротехники,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;
e-mail: hecn@tpu.ru

Authorship criteria

Razzhivin I.A., Ruban N.Yu., Askarov A.B., Ufa R.A. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor A. Razzhivin,
Assistant Professor of the Department
of Power Industry and Electrical Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia;
✉ e-mail: lionrash@tpu.ru

Nikolay Yu. Ruban,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Power Industry and Electrical Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia;
e-mail: rubanny@tpu.ru

Alisher B. Askarov,
Research Engineer of the Research Laboratory
of Electric Power System Modeling,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia;
e-mail: aba7@tpu.ru

Ruslan A. Ufa,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Power Industry and Electrical Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia;
e-mail: hecn@tpu.ru