

УДК 621.311.001.57, 621.3.07, 621.313.322

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.2.08

**А.Б. Аскар¹, М.В. Андреев¹, Е.М. Чикишев²,
А.А. Суворов¹, В.Е. Рудник¹**

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

²Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

РАЗРАБОТКА ГИБРИДНЫХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ НАСТРОЙКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Внедрение различных по мощности объектов генерации на основе возобновляемых источников энергии и технологий гибких управляемых электропередач переменного тока значительно изменяет динамические свойства электроэнергетических систем, что приводит к необходимости проведения мероприятий по обеспечению надежности их функционирования. Данные мероприятия могут заключаться в использовании возможностей новых внедряемых объектов или в адаптации традиционных средств, к которым, в частности, относятся автоматические регуляторы возбуждения синхронных генераторов. **Цель исследований** заключалась в обосновании необходимости осуществления настройки автоматических регуляторов возбуждения, наиболее адекватной реальным условиям их функционирования в составе энергосистем с возобновляемыми источниками энергии и технологиями гибких электропередач переменного тока, а также в разработке необходимых для этого средств в составе «всерезимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем». Для проведения исследований использовались **метод** математического моделирования энергосистем и отдельные положения концепции гибридного моделирования для формирования и разработки необходимых программно-аппаратных средств. **Результатом** исследования является комплексная оценка достоверности результатов моделирования, получаемых с помощью разработанных средств, которая позволяет заключить о возможности их применения. **Практическая значимость** выполненных исследований состоит в дальнейшем использовании разработанных средств в составе гибридного моделирующего комплекса, позволяющего достаточно полно и достоверно воспроизводить современные энергосистемы с возобновляемыми источниками энергии и технологиями гибких электропередач переменного тока, для формирования концепции и методики настройки автоматических регуляторов возбуждения, учитывающих особенности функционирования подобных энергосистем.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, возобновляемые источники энергии, технологии FACTS, математическое моделирование, автоматический регулятор возбуждения, настройка, гибридное моделирование.

**A.B. Askarov¹, M.V. Andreev¹, E.M. Chikishev²,
A.A. Suvorov¹, V.E. Rudnik¹**

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

²Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

DESIGN OF HYBRID SIMULATION TOOLS FOR TUNING OF AUTOMATIC VOLTAGE REGULATORS WITHIN CONDITIONS OF ELECTRIC POWER SYSTEMS DEVELOPMENT

The penetration of generating units of various capacity based on renewable energy sources and technologies of flexible alternating current transmission systems significantly changes the dynamic characteristics of electric power systems, which leads to the need to take measures to ensure the security of their operation. These measures may consist in using the capabilities of new penetrated units or in adapting conventional means, which, in particular, include automatic voltage regulators of synchronous generators. The **purpose** of the research is to justify the need for tuning automatic voltage regulators, which is most adequate to practical conditions of their operation as part of power systems with renewable energy sources and technologies of flexible alternating current transmission systems, as well as to develop the necessary tools for this as part of the Hybrid Real-Time Power System Simulator. To carry out the research, the **method** of mathematical modeling of power systems and specific provisions of the concept of hybrid modeling were used to form and develop the necessary hardware-software tools. The **result** of the study is a comprehensive assessment of the reliability of the modeling results obtained using the developed tools, which allows to conclude about the possibility of their application. The **practical significance** of the performed studies consists in the further use of the developed tools as part of a hybrid power system simulator, which provides a sufficiently complete and reliable reproduction of modern power systems with renewable energy sources and technologies of flexible alternating current transmission systems, for the formation of the concept and methodology for automatic voltage regulators tuning, taking into account the operating features of such power systems.

Keywords: electric power system, renewable energy sources, FACTS, mathematical modeling, automatic voltage regulator, tuning, hybrid modeling.

Введение

В настоящее время происходит значительное усложнение структуры современных электроэнергетических систем (ЭЭС) путем установки в сети технологий гибких управляемых электропередач переменного тока (Flexible Alternating Current Transmission System – FACTS), в том числе систем передачи энергии постоянным током, а также различных по мощности объектов генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). При этом помимо положительных аспектов, в частности, связанных с увеличением пропускной способности сети и улучшением надежности электроснабжения потребителей, внедрение подобных установок и устройств имеет ряд негативных последствий. Подобное обусловлено использованием в их составе

силовых преобразователей, обычно статических преобразователей напряжения, осуществляющих подключение объектов ВИЭ и устройств FACTS к сети. Это, в свою очередь, приводит к значительному влиянию на динамические свойства и характеристики ЭЭС, которое выражается в снижении общей инерционности системы, увеличении скорости протекания процессов, а также уменьшении устойчивости ЭЭС при больших возмущениях [1, 2].

Ежегодное увеличение числа данных объектов в составе ЭЭС разных стран мира приводило к возникновению различных инцидентов. Так, в 2019 г. в энергосистеме Великобритании произошла одна из крупнейших аварий за последние несколько десятков лет [3], которая связана с непредвиденным отключением большого объема генерации (в том числе множества объектов ВИЭ на базе ветроэнергетических установок (ВЭУ)) системами защиты и автоматики, превышающим доступные резервы мощности, что привело к резкому и глубокому снижению частоты в сети с последующим отключением 1 ГВт потребителей. Более того, в энергосистемах, в которых присутствует большое число вышеобозначенных объектов, снижается уровень демпфирования широкого спектра колебаний, что приводит к возникновению незатухающих и в некоторых случаях даже возрастающих высокочастотных колебаний напряжения [4] (как в энергосистеме штата Техас, США [5]), а также к увеличению вероятности возникновения электрического резонанса в сети (как в энергосистеме района Синьцзян, Китай [6]).

Решением обозначенных и ряда других проблем, как отмечается во множестве научно-исследовательских работ [7, 8], является проведение мероприятий по оптимизации настроек систем автоматического регулирования и управления (САР и САУ), а также их структур и алгоритмов как для новых внедряемых объектов ВИЭ и устройств FACTS, так и для традиционных объектов ЭЭС: синхронных генераторов и компенсаторов статических устройств компенсации реактивной мощности и др. Для осуществления подобного рода исследований и работ основным этапом становится математическое моделирование ЭЭС, позволяющее получить всю необходимую информацию о режимах и процессах, протекающих в ЭЭС и ее элементах, которая затем может быть использована для наиболее оптимальной настройки различных объектов и устройств с целью повышения эффективности управления режимами и устойчивости ЭЭС в целом при возникновении различного рода возмущений.

Существующие подходы к повышению надежности современных ЭЭС

При внедрении в ЭЭС объектов ВИЭ и устройств FACTS разного типа, состава и мощности можно выделить два основных направления, нацеленных на повышение надежности функционирования в таких системах в целом. Первое из них связано как с применением возможностей самих внедряемых объектов путем настройки их САУ, добавления дополнительных каналов регулирования или алгоритмов управления [9], так и с совместной установкой объектов разного типа для достижения большей гибкости в управлении (например, ВЭУ и статического синхронного компенсатора [10]). Второе направление заключается в адаптации традиционной части ЭЭС путем настройки САУ и САУ ее элементов [11], в том числе автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) синхронных генераторов, изменения их структуры, принципов функционирования и алгоритмов работы [12, 13], формирования новых подходов к защите и противоаварийному управлению [14]. В данной статье рассматривается возможность выполнения мероприятия по повышению надежности современных ЭЭС в рамках второго направления, которое заключается в проведении оптимальной настройки АРВ синхронных генераторов, наиболее адекватной реальным условиям их функционирования в составе ЭЭС с объектами ВИЭ и устройствами FACTS. Исследование вопроса настройки АРВ связано с неоспоримо важной ролью данной автоматики при обеспечении устойчивости как отдельных синхронных генераторов, так и всей ЭЭС в целом в нормальных и переходных режимах. Также мировой опыт эксплуатации ЭЭС со значительным числом объектов ВИЭ и устройств FACTS показал, что полномасштабный переход к безуглеродным источникам энергии и отказ от мощных традиционных генерирующих установок в настоящий момент не являются возможными ввиду возникновения ряда проблем, связанных с необходимостью наличия значительного резерва мощности и относительного постоянства выработки электроэнергии, возможностью регулирования напряжения и частоты в сети, значительным увеличением скорости протекания переходных процессов по причине снижения общей постоянной инерции ЭЭС и др. [15, 16]. Исходя из этого, наиболее эффективным и предпочтительным средством обеспечения надежности функционирования современных ЭЭС с объектами ВИЭ и устройствами FACTS, как и в тра-

диционных ЭЭС, все так же будут являться устройства АРВ синхронных генераторов. Соответственно, чрезвычайно актуальным остается вопрос настройки данной автоматики, обеспечивающей ее наиболее эффективную и корректную работу в условиях развития современных ЭЭС.

Концепция настройки АРВ синхронных генераторов

Основным способом получения всей необходимой информации для осуществления настройки АРВ синхронных генераторов является математическое моделирование, учитывая специфику и особенности ЭЭС, исключающие возможность проведения комплексных натурных испытаний. При этом общая концепция настройки АРВ заключается в следующем:

1. Выбор предварительных параметров настройки АРВ с применением различных методов (D -разбиения, параметрической оптимизации и др.), строящихся на идеологии варьирования значений параметров АРВ при рассмотрении широкого спектра базовых и характерных схемно-режимных условий работы синхронного генератора на линеаризованной модели ЭЭС. Данный подход позволяет определить параметры настройки, например, при использовании метода D -разбиения путем нахождения общей области устойчивости в пространстве настраиваемых коэффициентов [17] или при использовании генетического алгоритма путем нахождения коэффициентов, обеспечивающих необходимый уровень значения показателя качества настройки [18]. Однако линеаризованная модель не учитывает множество факторов, способных повлиять на функционирование АРВ в современных ЭЭС, например, работу быстродействующих САУ объектов ВИЭ и устройств FACTS, в связи с чем необходимым является следующий шаг.

2. Проверка и корректировка в случае необходимости выбранных параметров настройки АРВ в аналогичных схемно-режимных ситуациях на динамической модели ЭЭС с применением цифровых программно-вычислительных (ПВК) и программно-аппаратных (ПАК) комплексов [19]. Данный подход позволяет оценить качество работы АРВ при воспроизведении процессов, протекающих в ЭЭС в случае различного рода возмущений, во временной области, что представляет из себя аналог натурального эксперимента.

Однако применение цифровых ПВК и ПАК, базирующихся на численных методах решения систем дифференциальных уравнений, которые составляют математическую модель каждого элемента ЭЭС

и описывают протекающие в них процессы, для исследования процессов в современных ЭЭС со значительным количеством объектов ВИЭ и устройств FACTS сопряжено с рядом проблем и допущений, основные из которых рассмотрены далее, вследствие чего снижается достоверность оценки адекватности выбранных параметров настройки АРВ синхронных генераторов в широком многообразии схемно-режимных условий работы ЭЭС с ВИЭ и FACTS.

Проблема моделирования современных ЭЭС в условиях внедрения объектов ВИЭ и устройств FACTS

Применение силовых преобразователей в структуре разнообразных объектов ВИЭ (ВЭУ 3-го и 4-го типов, фотоэлектрических установок) и устройств FACTS (статических компенсаторов реактивной мощности, объединенных регуляторов потоков мощности, вставок постоянного тока) вызывает ряд актуальных вопросов в области моделирования ЭЭС. С одной стороны, данные вопросы связаны с необходимостью воспроизведения совокупной модели ЭЭС большой размерности, которая учитывает сложную топологию сети и множество объектов, в том числе новых, расположенных в ней, с другой – с необходимым и достаточным уровнем детализации математических моделей воспроизводимых элементов и ЭЭС в целом.

Эффективными средствами математического моделирования ЭЭС для решения вопросов в рамках первого направления являются ПВК моделирования электромеханических переходных процессов (например, *RUSTab* (Фонд им. Д.А. Арзамасцева, Россия), *Eurostag* (Tractebel Engineering, Бельгия), *PSS/E* (Siemens, Германия) и др.), которые широко используются на практике. Данные ПВК позволяют моделировать реальные ЭЭС большой размерности с учетом разнообразных математических моделей классического оборудования: электрических машин, линий электропередачи, силовых трансформаторов, комплексных нагрузок и др., а также воспроизводить необходимые САР и САУ разной конфигурации и структуры. Однако даже для данного вида оборудования в ПВК моделирования электромеханических переходных процессов неизбежно используются определенные упрощения и ограничения [20], которые в то же время не приводили к значительному снижению достоверности получаемых результатов моделирования при рассмотрении ЭЭС традиционной структуры. Последнее обусловлено тем,

что динамические характеристики подобных ЭЭС определялись преимущественно синхронными генераторами и их САР, воспроизводимыми достаточно детально, которым свойственно относительно медленное протекание процессов (в рамках спектра электромеханических переходных процессов). При возникновении необходимости моделирования новых объектов в составе ЭЭС, к которым относятся ВИЭ и FACTS, для обозначенного типа ПВК были разработаны их обобщенные модели (*generic models*), которые также обладают значительными упрощениями и ограничениями. Данные модели представляют из себя фиктивный управляемый источник тока или напряжения, не имеющий физических аналогов и имитирующий работу объектов в месте подключения к сети [21]. Подобное упрощение приводит к исключению воспроизведения электромагнитной стадии процессов для данных объектов, которая является определяющей при их функционировании, и существенному упрощению их САУ, в которой не учитываются основные звенья (замкнутый контур регулирования фазы, внутренний контур управления током), определяющие динамику и отклик объекта на изменения схемно-режимных условий в ЭЭС. Таким образом, спектр задач для современных ЭЭС, решаемых с помощью ПВК моделирования электромеханических переходных процессов, является весьма ограниченным, поскольку подобные ПВК с учетом принятых допущений достаточно адекватно могут воспроизводить спектр процессов только в диапазоне от 0,1 до 10 Гц. Данный факт значительно отражается на полноте и достоверности информации, получаемой при математическом моделировании и необходимой, в частности, для оценки эффективности настройки АРВ в ЭЭС с ВИЭ и FACTS.

Исходя из вышеизложенного, актуальным становится решение вопросов в рамках второго направления, связанного с детальным воспроизведением моделей как традиционной части ЭЭС, так и новых объектов без каких-либо значительных упрощений. В данном случае широко применяются ПВК моделирования электромагнитных переходных процессов (например, *PSCAD* (Manitoba Hydro International Ltd., Канада), *EMT module PowerFactory* (DIgSILENT GmbH, Германия) и др.), позволяющие рассматривать единый спектр процессов от быстрых коммутационных до длительных теплоэнергетических процессов. Однако воспроизведение детальной совокупной математической модели ЭЭС, например, в масштабах региональной энергосистемы, с помощью обозна-

ченного типа ПВК неизбежно связано со значительными вычислительными возможностями и затратами времени. Данный факт особенно актуален при наличии в модели ЭЭС значительного числа новых объектов с силовыми преобразователями в своем составе, поскольку это приводит к необходимости использовать относительно малый шаг расчета (от 10 мкс и меньше) и соответствующему увеличению времени расчета. В частности, в работе [22] показывается, что воспроизведение 5-секундного интервала заняло более 4,7 ч в ЭЭС с ВИЭ при шаге интегрирования, равном 5 мкс. Использование ПАК-моделирования электромагнитных переходных процессов (например, *RTDS* (RTDS Technologies Inc., Канада), *HYPERSIM* (OPAL-RT Technologies Inc., Канада) и др.) позволяет обойти некоторые обозначенные недостатки, присущие ПВК, особенно в контексте вычислительных мощностей и скорости расчета. Основными вопросами в таком случае остаются:

1) аппаратные возможности данных комплексов, определяющие масштабность и уровень детализации исследуемой ЭЭС, в связи с чем зачастую необходимо эквивалентировать исследуемую модель ЭЭС, упрощать или исключать ее элементы и т.п.;

2) сходимость решения совокупной модели ЭЭС, особенно при ее воспроизведении в масштабах региональной ЭЭС или более и без применения существенных упрощений;

3) синхронизация расчета и обмена данными между отдельными частями ЭЭС, решаемыми с разными шагами интегрирования, для адекватного воспроизведения устройств или объектов с силовыми преобразователями необходим малый шаг расчета, следовательно, в ПАК обычно данные элементы решаются с малым шагом (от 10 мкс и меньше), а остальная часть ЭЭС с большим (от 50 мкс и больше) и др.

Логичным решением существующей проблематики моделирования современных ЭЭС в условиях внедрения объектов ВИЭ и устройств FACTS являются разработка и применение альтернативных средств, позволяющих осуществлять воспроизведение ЭЭС реальных размерностей без их значительного эквивалентирования с учетом детальных моделей различных устройств и объектов в их составе. При этом моделирование должно учитывать бездекомпозиционное непрерывное воспроизведение единого спектра квазиустановившихся и переходных процессов на неограниченном интервале в темпе реального времени для обеспечения необходимой оперативности расчетов.

В качестве перспективного решения может быть использован «всерезжимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем» (ВМК РВ ЭЭС), являющийся техническим заделом при разработке необходимых средств для проведения настройки АРВ синхронных генераторов, наиболее адекватной реальным условиям функционирования в ЭЭС с ВИЭ и FACTS.

Применение гибридного подхода к моделированию современных ЭЭС

ВМК РВ ЭЭС основан на концепции гибридного моделирования, объединяющей в себе основные существующие подходы к моделированию ЭЭС: аналогового, цифрового и физического. Данная концепция определяет уникальные особенности и возможности ВМК РВ ЭЭС, которые позволяют исключить декомпозицию режимов и процессов, упрощение математических моделей элементов и совокупной модели ЭЭС в целом, ограничение интервала воспроизведения процессов, а также методическую ошибку решения дифференциальных уравнений, присущую численными методам, которые используются в ПВК и ПАК [23]. В связи с этим ВМК РВ ЭЭС позволяет получать наиболее полную и достоверную информацию о режимах и процессах в ЭЭС с объектами ВИЭ и устройствами FACTS, которая в дальнейшем может применяться при проведении настройки АРВ синхронных генераторов. Для успешного выполнения данного мероприятия необходимым этапом является адаптация комплекса путем модернизации существующих средств гибридного моделирования, используемых для анализа режимов работы синхронных генераторов в составе ЭЭС и протекающих в них процессов.

Обозначенная адаптация заключается в разработке наиболее полной и подробной модели энергоблока, включающей в себя детализированные модели электрической машины с учетом возможности задания мультимассности вала, системы возбуждения, современных устройств АРВ и регуляторов турбины, собственных нужд (с.н.), а также силового блочного трансформатора (рис. 1).

Подобная модель гарантирует максимально адекватное воспроизведение основных свойств моделируемого объекта и достоверный характер протекания переходных процессов.

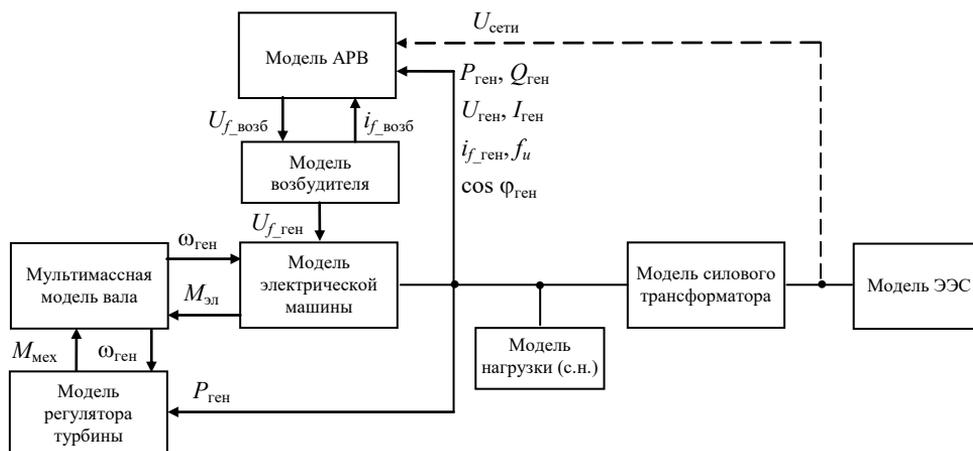


Рис. 1. Блок-схема модели энергоблока

В совокупности каждый элемент ЭЭС со всеми его САУ и/или САУ в ВМК РВ ЭЭС реализуется в виде специализированного гибридного процессора (СГП), представляющего собой цифро-аналого-физическую схему решения совокупной математической модели. Подобные СГП были разработаны, протестированы и верифицированы как для классического оборудования, так и для новых объектов (ВИЭ, FACTS). Экспериментальный образец разрабатываемого СГП моделирования энергоблока представлен на рис. 2, в рамках которого:

1) на аналоговом уровне реализуются жестко задаваемые системы дифференциальных уравнений, описывающие модель электрической машины и возбудителя, мультимассную модель вала в виде модели с сосредоточенными параметрами, модель нагрузки в виде собственных нужд и силового трансформатора, и их решение с помощью метода непрерывного неявного интегрирования, основу которого составляют интеграторы на базе операционных усилителей;

2) на цифровом уровне реализуются модели AVR и регулятора турбины, а также осуществляются все необходимые информационно-управляющие функции, которые заключаются в задании параметров оборудования с помощью соответствующих цифроаналоговых преобразователей (ЦАП), обработке и передаче информации, что обеспечивает необходимый информационный обмен между разными элементами совокупной модели энергоблока;

3) на физическом уровне реализуются: 1) пофазные продольно-поперечные коммутации моделируемых элементов энергоблока, а так-

же схемы тиристорных преобразователей в составе модели возбудителя с помощью цифруправляемых аналоговых ключей; 2) пофазные преобразования непрерывных математических переменных входных/выходных токов в виде напряжений, получаемых в аналоговой схеме решения, в соответствующие им модельные физические токи с помощью прецизионного аналогового перемножителя, собранного по схеме преобразователя «напряжение–ток» (ПНТ).



Рис. 2. Внешний вид экспериментального образца СПП моделирования энергоблока, где МПУ – микропроцессорный узел

В качестве примера на рис. 3 приведена структурная схема реализации аналоговым способом модели электрической машины и мульти-массной модели вала с учетом связей с цифровым и физическим уровнями моделирования. Модель электрической машины представлена в виде полных уравнений Парка–Горева совместно с уравнениями взаимного преобразования переменных систем dq и abc , учитывающих трансформаторные ЭДС и ЭДС вращения в уравнениях статорных контуров, три контура по оси d (одна обмотка возбуждения и две демпферные обмотки) и оси q (три демпферные обмотки). Данная модель также учитывает насыщение стали [24] путем перезадавания значений реактивностей взаимной индукции по осям d и q в зависимости от заданной характеристики намагничивания. Модель вала представлена

в виде уравнений движения, учитывающих две сосредоточенные массы (турбина–генератор), которые также могут быть как упрощены до одной массы (классическое уравнение движения ротора генератора), так и расширены вплоть до одиннадцати масс, что позволяет учесть разные типы турбин и необходимое количество возбудителей, сопряженных с валом генератора, в зависимости от наличия исходных данных.

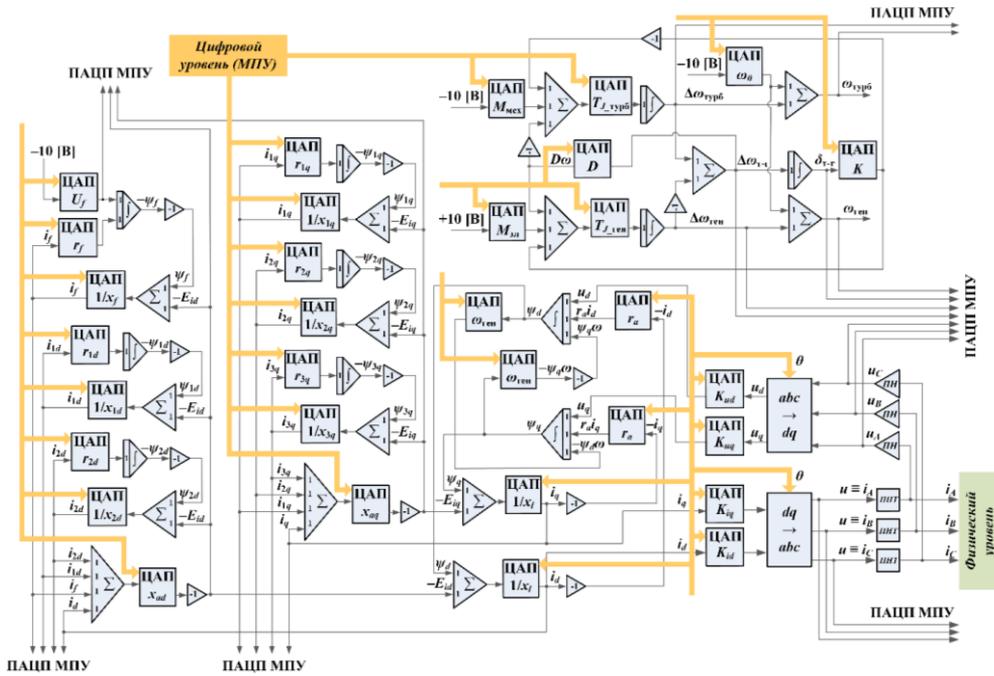


Рис. 3. Структурная схема реализации модели электрической машины и мультимассной модели вала, где ПАЦП – процессор аналогоцифрового преобразования, ПН – повторители напряжения

Результаты верификации разработанных гибридных средств моделирования энергоблока

После разработки программно-аппаратных средств гибридного моделирования энергоблока проводилось их тестирование, отладка и верификация на примере тестовой модели ЭЭС, представленной в [20]. Верификация модели энергоблока осуществлялась путем сравнения результатов моделирования, полученных с помощью разработанных программно-аппаратных средств, с аналогичными результатами, полученными с применением широкого используемого цифрового ПАК моделирования ЭЭС – RTDS (*Real-Time Digital Simulator*) фирмы

RTDS Technologies Inc. (Канада). В качестве критериев оценки результатов моделирования использовалось несколько количественных показателей: относительная погрешность, δ (1); нормализованное среднеквадратичное отклонение, НСКО (2); нормализованное максимальное отклонение, НМО (3); коэффициент корреляции, r (4), которые в своей совокупности позволяют достаточно полно оценить достоверность и адекватность воспроизведения процессов с помощью разработанных гибридных средств моделирования энергоблока.

$$\delta = \left| 1 - \frac{x_i}{y_i} \right| \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где x_i – эталонное значение рассматриваемого параметра (RTDS); y_i – сравниваемое значение рассматриваемого параметра (ВМК РВ ЭЭС).

$$\text{НСКО} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - \hat{y}_i)^2 \cdot 100 \%, \quad (2)$$

$$\text{НМО} = \max |\hat{x}_i - \hat{y}_i| \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где i – выборка нормализованных эталонных значений, $i = (1, \dots, n)$; i – выборка нормализованных сравниваемых значений, $i = (1, \dots, n)$. Все значения нормализованы относительно их максимального значения на рассматриваемом промежутке времени.

$$r = \frac{\left| \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y}) \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (4)$$

где x_i – выборка эталонных значений, $x_i = (x_1, \dots, x_n)$; y_i – выборка сравниваемых значений, $y_i = (y_1, \dots, y_n)$; \bar{x} , \bar{y} – средние значения выборок.

Тестирование и, соответственно, верификация программно-аппаратных средств моделирования энергоблока осуществлялись в два этапа. Первый этап заключался в проведении экспериментальных исследований при изолированной работе синхронного генератора (на холостом ходу и при увеличении нагрузки (в виде с.н.) на его выводах с учетом постоянной скорости вращения), необходимых для нахождения и построения основных характеристик генератора [25]: характеристики холостого хода (рис. 4); внешней характеристики (рис. 5) и регулировочной характеристики (рис. 6). Поскольку исследования проводились

с учетом постоянной скорости вращения генератора, то на данном этапе не учитывалась механическая часть модели (мультиимассная модель вала и регулятор турбины).

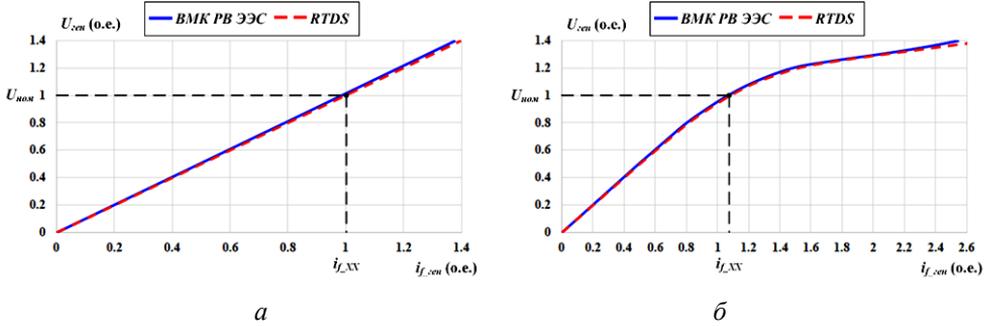


Рис. 4. Характеристика холостого хода генератора:
 а – без учета насыщения, б – с учетом насыщения

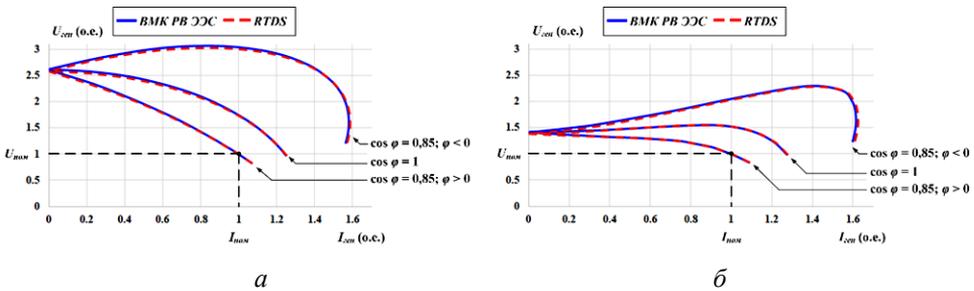


Рис. 5. Внешняя характеристика генератора:
 а – без учета насыщения, б – с учетом насыщения

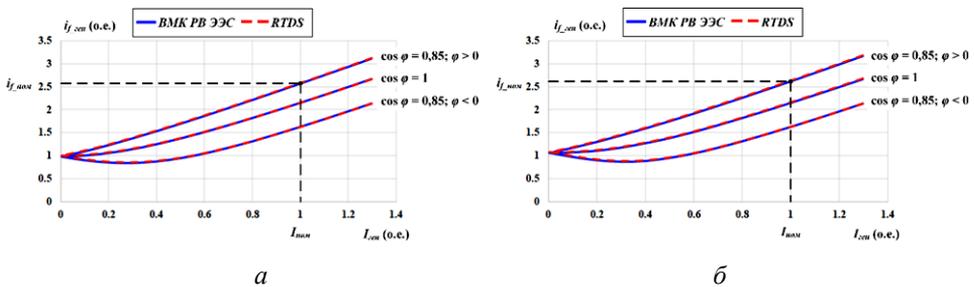


Рис. 6. Регулировочная характеристика генератора:
 а – без учета насыщения, б – с учетом насыщения

Определение характеристики холостого хода и регулировочной характеристики выполнялось с учетом работы АРВ и системы возбуждения, что позволяет оценить реализацию данных моделей на цифро-

вом и аналоговом уровнях соответственно. Воспроизводилась модель АРВ сильного действия типа AVR-3М, которая получена, исходя из данных, представленных в литературе, а также модель тиристорной системы независимого возбуждения, широко используемой на генераторе большой мощности, который, в частности, являлся объектом исследования в данной работе ($S_{\text{ном}} = 141 \text{ МВА}$, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,85$). Значения напряжения и тока возбуждения генератора были нормализованы относительно значений холостого хода ($E_{f_XX} = 0,000785$; $i_{f_XX} = 0,577$). Определение внешней и регулировочной характеристики осуществлялось путем изменения величины тока нагрузки, что позволяет оценить реализацию модели с.н. на аналоговом уровне. Нахождение характеристик выполнялось как без учета насыщения, так и с его учетом, что позволяет оценить реализацию алгоритма учета насыщения стали электрической машины на цифровом уровне модели энергоблока. После построения характеристик для каждого случая рассчитывалась средняя величина относительной погрешности по полученным значениям. Результаты расчета сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты оценки достоверности воспроизведения процессов с помощью разработанных гибридных средств моделирования энергоблока при изолированной работе генератора

Характеристика		$\delta_{\text{ср}}$ (%)
<i>Холостого хода</i>		
– без учета насыщения		1,56
– с учетом насыщения		2,09
<i>Внешняя</i>		
– без учета насыщения	$\cos \varphi = 0,85; \varphi > 0$	0,34
	$\cos \varphi = 1$	0,33
– с учетом насыщения	$\cos \varphi = 0,85; \varphi < 0$	0,55
	$\cos \varphi = 0,85; \varphi > 0$	1,03
	$\cos \varphi = 1$	0,73
	$\cos \varphi = 0,85; \varphi < 0$	1,66
<i>Регулировочная</i>		
– без учета насыщения	$\cos \varphi = 0,85; \varphi > 0$	0,73
	$\cos \varphi = 1$	0,62
	$\cos \varphi = 0,85; \varphi < 0$	0,65
– с учетом насыщения	$\cos \varphi = 0,85; \varphi > 0$	0,79
	$\cos \varphi = 1$	0,64
	$\cos \varphi = 0,85; \varphi < 0$	0,63

Из полученных данных можно сделать вывод о высокой степени достоверности воспроизведения процессов с помощью разработанных гибридных средств моделирования энергоблока при нахождении основных характеристик синхронного генератора. Уровень относительной погрешности составил менее 2,1 %. Наибольшие различия характерны для областей с большими значениями напряжения (более 1,2 о.е.) на выводах синхронного генератора, которые зачастую не являются рабочими областями при параллельной работе генератора с внешней ЭЭС. Особенно это видно при нахождении внешней характеристики, когда исходно задавалось постоянное возбуждение, соответствующее номинальной нагрузке генератора, которое приводило при малых токах нагрузки к завышенному напряжению на выводах.

Второй этап верификации программно-аппаратных средств моделирования энергоблока заключался в проведении экспериментальных исследований при параллельной работе синхронного генератора с ЭЭС и динамических возмущениях разного рода: 1) наброс нагрузки в качестве внешнего малого возмущения, не сопровождающегося значительными отклонениями параметров режима (рис. 7); 2) металлическое самоустраняющееся однофазное короткое замыкание (КЗ) (фазы *A* на землю) и трехфазное КЗ длительностью 0,15 с в качестве внешних больших возмущений (рис. 8 и 9 соответственно). Местом приложения данных возмущений являлись выводы совокупной модели энергоблока за силовым трансформатором, обмотки которого соединены по схемам «звезда» с нулем на высокой стороне и «треугольник» на низкой. Рассмотрение симметричных и несимметричных видов возмущений позволяет комплексно оценить отклик модели энергоблока и ее отдельных элементов. Наблюдаемыми параметрами являлись действующее значение напряжения на выводах генератора, напряжение и ток возбуждения (отражают работу АРВ и системы возбуждения), скорость вращения генератора и угол турбины относительно генератора (отражают работу механической части), фазные напряжения и токи (отражают работу электрической части модели генератора).

После проведения необходимых экспериментальных исследований для каждого случая осуществлялась оценка достоверности полученных результатов моделирования в соответствии с показателями из уравнений (2), (3) и (4). Результаты оценки представлены в табл. 2.

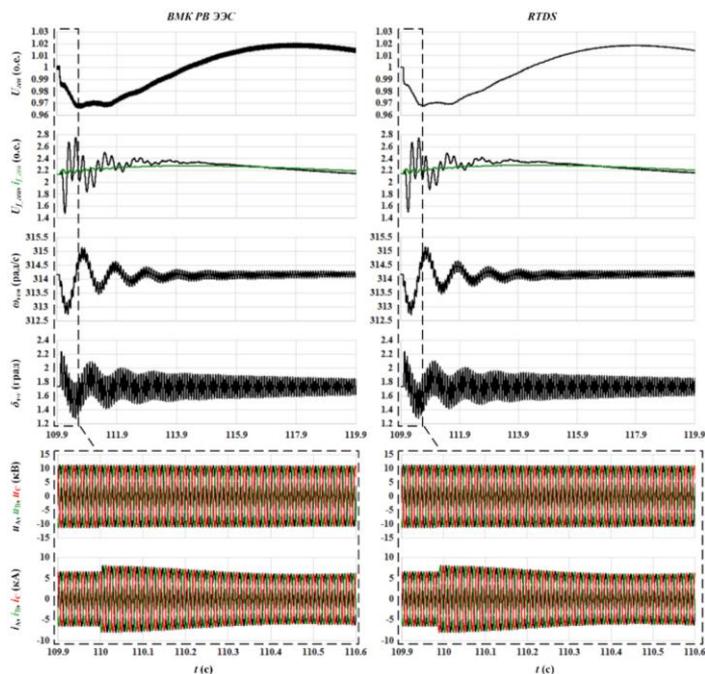


Рис. 7. Результаты моделирования, полученные в случае наброса нагрузки на выводах совокупной модели энергоблока

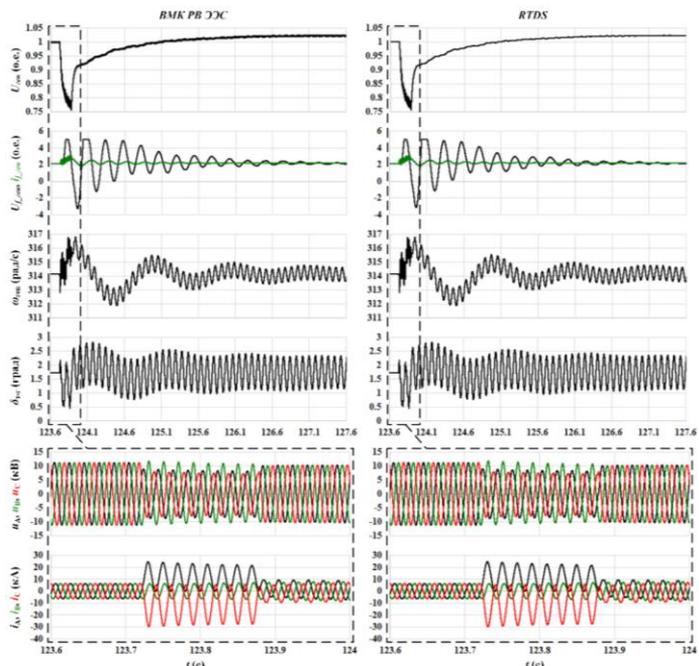


Рис. 8. Результаты моделирования, полученные в случае однофазного КЗ (фазы А на землю) на выводах совокупной модели энергоблока

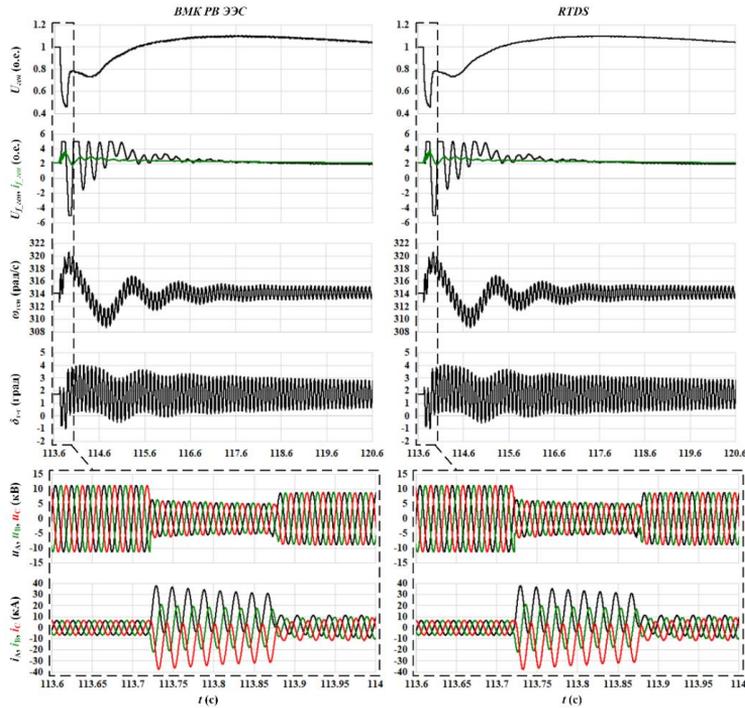


Рис. 9. Результаты моделирования, полученные в случае трехфазного КЗ на выводах совокупной модели энергоблока

Таблица 2

Результаты оценки достоверности воспроизведения процессов с помощью разработанных гибридных средств моделирования энергоблока при динамических возмущениях

Случай/параметр	Количественный показатель		
	НСКО (%)	НМО (%)	r (о.е.)
Наброс нагрузки			
$U_{ген}$	<0,01	0,88	0,9968
$U_{f\ ген}$	0,02	7,98	0,9688
$i_{f\ ген}$	<0,01	1,57	0,9982
$\omega_{ген}$	<0,01	0,09	0,9279
$\delta_{г-г}$	0,28	11,32	0,8327
u_A	0,2	11,79	0,9979
i_A	0,16	20,05	0,9978
Однофазное КЗ			
$U_{ген}$	<0,01	0,45	0,9997
$U_{f\ ген}$	0,06	5,85	0,9952
$i_{f\ ген}$	<0,01	1,19	0,9974
$\omega_{ген}$	<0,01	0,03	0,9999
$\delta_{г-г}$	<0,01	0,86	0,9999
u_A	0,17	6,06	0,9982
i_A	0,01	2,98	0,9985

Окончание табл. 2

Случай/параметр	Количественный показатель		
	НСКО (%)	НМО (%)	г (о.е.)
Трехфазное КЗ			
$U_{г\text{ген}}$	0,02	5,49	0,9982
$i_{г\text{ген}}$	<0,01	1,05	0,9996
$\omega_{г\text{ген}}$	<0,01	0,05	0,9998
$\delta_{г-г}$	<0,01	1,5	0,9998
u_A	0,36	21,74	0,9958
i_A	0,02	5,47	0,9963

Проведенная оценка результатов моделирования при динамических возмущениях в ЭЭС, полученных с помощью разработанных гибридных средств моделирования энергоблока, показала также высокую степень достоверности воспроизведения процессов в случае как симметричных, так и несимметричных возмущений. Незначительное увеличение различий при набросе нагрузки в сравнении со случаями КЗ связано с отсутствием контроля момента начала возмущения в обоих средствах моделирования: при воспроизведении КЗ контролировался момент перехода напряжения фазы *A* через ноль для достижения наибольшего значения броска тока.

Заключение

В условиях внедрения объектов ВИЭ, особенно подключаемых к сети с помощью силовых преобразователей, и устройств FACTS необходимым становится проведение мероприятий по обеспечению надежности функционирования ЭЭС как в нормальных, так и в переходных режимах. Одним из таких мероприятий является осуществление настройки АРВ синхронных генераторов, установленных на традиционных электростанциях. Для получения наиболее оптимальной настройки АРВ, адекватной реальным условиям функционирования в широком многообразии схемно-режимных состояний работы ЭЭС, в том числе при различного рода возмущениях, необходимо иметь достаточно полную и достоверную информацию о режимах и процессах в ЭЭС, источником которой служит математическое моделирование. Широко используемые цифровые средства моделирования ЭЭС обладают определенными допущениями и ограничениями при получении подобного рода информации. Таким образом, в работе предлагается использовать альтернативное средство – ВМК РВ ЭЭС, основанный на концепции гибридного моделирования и позволяющий решить поставленную зада-

чу всесторонне и комплексно. Для этого были разработаны специализированные программно-аппаратные средства гибридного моделирования энергоблока, включающего в себя все значимые элементы синхронного генератора, которые необходимо учесть при настройке устройств АРВ. В рамках статьи представлены основные результаты тестирования и верификации данных средств, позволяющие заключить о высокой адекватности получаемых результатов воспроизведения процессов. В дальнейшем планируется совместное использование разработанных средств и ВМК РВ ЭЭС при проведении исследований режимов и процессов в ЭЭС с объектами ВИЭ и устройствами FACTS, которые необходимы при настройке АРВ синхронных генераторов, для формирования концепции и методики настройки данной режимной автоматики, учитывающей особенности функционирования современных ЭЭС.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90003.

Библиографический список

1. Шескин Е.Б. Проблемы использования потенциала возобновляемых источников энергии для регулирования частоты в электрических системах // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2019. – № 1(80). – С. 97–104.

2. Ахмедов С.Б., Климов П.Л. Влияние распределенной генерации на базе возобновляемых источников энергии с использованием силовой электроники на резонанс на гармонических частотах // Вестник Иркутск. гос. техн. ун-та. – 2020. – Т. 24, № 1(150). – С. 97–111. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-1-97-111

3. Елпидифоров В.Ю. Авария в энергосистеме Великобритании, приведшая к масштабному отключению электроэнергии в августе 2019 года // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2020. – № 1 (58). – С. 152–159.

4. Overview of emerging subsynchronous oscillations in practical wind power systems / J. Shair, X. Xie, L. Wang, W. Liu, J. He, H. Liu // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – Vol. 99. – P. 159–168. DOI: 10.1016/j.rser.2018.09.047

5. Li Y., Fan L., Miao Z. Replicating Real-World Wind Farm SSR Events // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2020. – Vol. 35, № 1. – P. 339–348. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2931838

6. Subsynchronous Interaction Between Direct-Drive PMSG Based Wind Farms and Weak AC Networks / H. Liu, X. Xie, J. He, T. Xu, Z. You, C. Wang, C. Zhang // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2017. – Vol. 32, № 6. – P. 4708–4720. DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2682197

7. Лямов А.С., Смоловик С.В., Солодянкин С.А., Тупицина А.Л., Шишкин А.С. Исследование влияния быстродействующих устройств режимного регулирования на показатели устойчивости // *Известия НТЦ единой энергетической системы*. – 2018. – № 1 (78). – С. 35–44.

8. Stability and control of power systems with high penetrations of inverter-based resources: An accessible review of current knowledge and open questions / R.W. Kenyon, M. Bossart, M. Marković, K. Doubleday, R. Matsuda-Dunn, S. Mitova, S.A. Julien, E.T. Hale, B.-M. Hodge // *Solar Energy*. – 2020. – Vol. 210. – P. 149–168. DOI: 10.1016/j.solener.2020.05.053

9. Liu J., Miura Y., Ise T. Comparison of Dynamic Characteristics Between Virtual Synchronous Generator and Droop Control in Inverter-Based Distributed Generators // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2016. – Vol. 31, № 5. – P. 3600–3611. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2465852

10. Yazdi S.S.H., Milimonfared J., Fathi S.H. Adaptation of VSC-HVDC connected DFIG based offshore wind farm to grid codes: A comparative analysis // *International Journal of Renewable Energy Development*. – 2019. – Vol. 8, № 1. – P. 91–101. DOI: 10.14710/ijred.8.1.91-101

11. Гуриков О.В., Зеленин А.С., Кабанов Д.А. Разработка методики настройки системных стабилизаторов зарубежного типа с использованием частотных методов анализа // *Электрические станции*. – 2015. – № 12 (1013). – С. 9–17.

12. Седойкин Д.Н., Юрганов А.А. Новая структура канала стабилизации режима синхронного генератора и общие принципы его настройки на основе нечеткого аппроксиматора // *Известия НТЦ Единой энергетической системы*. – 2016. – № 1 (74). – С. 67–74.

13. Коган Ф.Л. Особенности сильного регулирования возбуждения синхронных генераторов в сложной энергосистеме // *Электрические станции*. – 2019. – № 7 (1056). – С. 27–35.

14. Илюшин П.В., Куликов А.Л. Особенности реализации автоматики управления режимами энергорайонов с объектами распределительной генерации // *Релейная защита и автоматизация*. – 2019. – № 3(36). – С. 14–23.

15. Rezkalla M., Pertl M., Marinelli M. Electric power system inertia: requirements, challenges and solutions // *Electrical Engineering*. – 2018. – Vol. 100. № 4. – P. 2677–2693. DOI: 10.1007/s00202-018-0739-z
16. Анализ влияния возобновляемых источников энергии с силовыми преобразователями на процессы в современных энергосистемах / Н.Ю. Рубан, А.Б. Аскарков, М.В. Андреев, А.В. Киевец, В.Е. Рудник // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – 2020. – № 36. – С. 7–30. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.4.01
17. Темгеновская Т.В. Выбор настроек АРВ-СД в многомашинной электроэнергетической системе // *Труды Братск. гос. ун-та. Сер. Естественные и инженерные науки*. – 2015. – Т. 1. – С. 105–109.
18. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Применение генетических алгоритмов для настройки автоматических регуляторов установок распределенной генерации // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. – 2016. – № 2. – С. 30–45.
19. Есипович А.Х., Кабанов Д.А. Технология настройки цифровых АРВ сильного действия отечественной структуры // *Известия НТЦ единой энергетической системы*. – 2016. – № 1 (74). – С. 113–126.
20. Аскарков А.Б., Суворов А.А., Андреев М.В. Применение Все-режимного моделирующего комплекса для энергосистем с распределенной генерацией // *Вестник Иркутск. гос. техн. ун-та*. – 2019. – Т. 23, № 1 (144). – С. 75–89. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-75-89
21. Generic Dynamic Models for Modeling Wind Power Plants and Other Renewable Technologies in Large-Scale Power System Studies / P. Pourbeik, J.J. Sanchez-Gasca, J. Senthil, J.D., Weber P.S. Zadehkhosht, Y. Kazachkov, S. Tacke, J. Wen, A. Ellis // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2017. – Vol. 32, № 3. – P. 1108–1116. DOI: 10.1109/TEC.2016.2639050
22. A Multi-Rate Co-Simulation of Combined Phasor-Domain and Time-Domain Models for Large-Scale Wind Farms / Y. Li, D. Shu, F. Shi, Z. Yan, Y. Zhu, N. Tai // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2020. – Vol. 35, no. 1. – P. 324–335. DOI: 10.1109/TEC.2019.2936574
23. Концепция и базовая структура все-режимного моделирующего комплекса / М.В. Андреев, Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов, А.А. Суворов, Н.Ю. Рубан, Р.А. Уфа // *Газовая промышленность*. – 2017. – № 5 (752). – С. 18–27.

24. Крылова И.А., Кавалеров Б.В., Чабанов Е.А. Модель синхронного генератора с учетом насыщения магнитной цепи в среде MATLAB/SIMULINK для исследования автоматических регуляторов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2017. – № 24. – С. 178–191.

25. Данеев А.В., Данеев Р.А., Сизых В.Н. Моделирование многофазных синхронных машин в различных системах координат // Известия Самар. науч. центра Рос. акад. наук. – 2020. – Т. 22, № 4(96). – С. 104–115. DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-4-104-115

References

1. Sheskin E.B. Problemy ispol'zovaniia potentsiala vozobnovliaemykh istochnikov energii dlia regulirovaniia chastoty v elektricheskikh sistemakh [Problems of using the potential of renewable energy sources for frequency control in electrical systems]. *Izvestiia NTTs Edinoi energeticheskoi sistemy*, 2019, no. 1(80), pp. 97-104.

2. Akhmedov S.B., Klimov P.L. Vliianie raspredelennoi generatsii na baze vozobnovliaemykh istochnikov energii s ispol'zovaniem silovoi elektroniki na rezonans na garmonicheskikh chastotakh [Effect of renewable energy-based distributed generation with power invertors on resonance at harmonic frequencies]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2020, vol. 24, no. 1(150), pp. 97-111. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-1-97-111

3. Elpidiforov V.Iu. Avariia v energosisteme Velikobritanii, privedshaia k masshtabnomu otkliucheniiu elektroenergii v avguste 2019 goda [The accident in the UK power system, which led to a large-scale power outage in August 2019]. *Elektroenergiia. Peredacha i raspredelenie*, 2020, no. 1(58), pp. 152-159.

4. Shair J., Xie X., Wang L., Liu W., He J., Liu H. Overview of emerging subsynchronous oscillations in practical wind power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, vol. 99, pp. 159-168. DOI: 10.1016/j.rser.2018.09.047

5. Li Y., Fan L., Miao Z. Replicating Real-World Wind Farm SSR Events. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, vol. 35, no. 1, pp. 339-348. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2931838

6. Liu H., Xie X. He, J., Xu T., You Z., Wang C., Zhang C. Subsynchronous Interaction Between Direct-Drive PMSG Based Wind Farms and Weak AC Networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, vol. 32, no. 6, pp. 4708-4720. DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2682197

7. Liamov A.S., Smolovik S.V., Solodiankin S.A., Tupitsina A.L., Shishkin A.S. Issledovanie vlianiia bystrodeistvuiushchikh ustroystv rezhimnogo regulirovaniia na pokazateli ustoichivosti [Influence of the FACTS devices on the power system stability indices]. *Izvestiia NTTs edinoi energeticheskoi sistemy*, 2018, no. 1(78), pp. 35-44.

8. Kenyon R.W., Bossart M., Marković M., Doubleday K., Matsuda-Dunn R., Mitova S., Julien S.A., Hale E.T., Hodge B.-M. Stability and control of power systems with high penetrations of inverter-based resources: An accessible review of current knowledge and open questions. *Solar Energy*, 2020, vol. 210, pp. 149-168. DOI: 10.1016/j.solener.2020.05.053

9. Liu J., Miura Y., Ise T. Comparison of Dynamic Characteristics Between Virtual Synchronous Generator and Droop Control in Inverter-Based Distributed Generators. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, vol. 31, no. 5, pp. 3600-3611. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2465852

10. Yazdi S.S.H., Milimonfared J., Fathi S.H. Adaptation of VSC-HVDC connected DFIG based offshore wind farm to grid codes: A comparative analysis. *International Journal of Renewable Energy Development*, 2019, vol. 8, no. 1, pp. 91-101. DOI: 10.14710/ijred.8.1.91-101

11. Gurikov O.V., Zelenin A.S., Kabanov D.A. Razrabotka metodiki nastroiки sistemnykh stabilizatorov zarubezhnogo tipa s ispol'zovaniem chastotnykh metodov analiza [Development of system stabilizer tuning methodology using frequency domain analysis]. *Elektricheskie stantsii*, 2015, no. 12(1013), pp. 9-17.

12. Sedoikin D.N., Iurganov A.A. Novaia struktura kanala stabilizatsii rezhima sinkhronnogo generatora i obshchie printsipy ego nastroiки na osnove nechetkogo approksimatora [The new structure for stabilization loop of the synchronous generator mode and the general principles of its settings based on fuzzy approximator]. *Izvestiia NTTs Edinoi energeticheskoi sistemy*, 2016, no. 1(74), pp. 67-74.

13. Kogan F.L. Osobennosti sil'nogo regulirovaniia возбуждениia sinkhronnykh generatorov v slozhnoi energosisteme [Features of strong excitation control of synchronous generators in a complex power system]. *Elektricheskie stantsii*, 2019, no. 7(1056), pp. 27-35.

14. Iliushin P.V., Kulikov A.L. Osobennosti realizatsii avtomatiki upravleniia rezhimami energoraionov s ob"ektami raspredelitel'noi generatsii [Automated control of distributed generation enabled power districts]. *Releinaia zashchita i avtomatizatsiia*, 2019, no. 3(36), pp. 14-23.

15. Rezkalla M., Pertl M., Marinelli M. Electric power system inertia: requirements, challenges and solutions. *Electrical Engineering*, 2018, vol. 100, no. 4, pp. 2677-2693. DOI: 10.1007/s00202-018-0739-z

16. Ruban N.Iu., Askarov A.B., Andreev M.V., Kievets A.V., Rudnik V.E. Analiz vliianiia vozobnovliaemykh istochnikov energii s silovymi preobrazovateliami na protsessy v sovremennykh energosistemakh [Analysis of impact of renewable energy sources with power converters on the processes in modern electric power systems]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2020, no. 36, pp. 7-30. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.4.01

17. Temgenevskaia T.V. Vybor nastroek ARV-SD v mnogomashinnoi elektroenergeticheskoi sisteme [Determination of ARV-SD settings in a multi-machine electric power system]. *Trudy Bratskogo gosudastvennogo universiteta. Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2015, vol. 1, pp. 105-109.

18. Bulatov Iu.N., Kriukov A.V. Primenenie geneticheskikh algoritmov dlia nastroiки avtomaticheskikh regulatorov ustanovok raspredelennoi generatsii [Application of genetic algorithms for tuning automatic regulators of distributed generation units]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii*, 2016, no. 2, pp. 30-45.

19. Esipovich A.Kh., Kabanov D.A. Tekhnologiia nastroiки tsifrovyykh ARV sil'nogo deistviia otechestvennoi struktury [The method of configuring of domestic digital AVR]. *Izvestiia NTTs edinoi energeticheskoi sistemy*, 2016, no. 1(74), pp. 113-126.

20. Askarov A.B., Suvorov A.A., Andreev M.V. Primenenie Vserezhimnogo modeliruiushchego kompleksa dlia energosistem s raspredelennoi generatsiei [Use of all-mode modeling complex for power systems with distributed generation]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2019, vol. 23, no. 1(144), pp. 75-89. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-75-89

21. Pourbeik P., Sanchez-Gasca J.J., Senthil J., Weber J.D., Zadekhkost P.S., Kazachkov Y., Tacke S., Wen J., Ellis A. Generic Dynamic Models for Modeling Wind Power Plants and Other Renewable Technologies

in Large-Scale Power System Studies. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, vol. 32, no. 3, pp. 1108-1116. DOI: 10.1109/TEC.2016.2639050

22. Li Y., Shu D., Shi F., Yan Z., Zhu Y., Tai N. A Multi-Rate Co-Simulation of Combined Phasor-Domain and Time-Domain Models for Large-Scale Wind Farms. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2020, vol. 35, no. 1, pp. 324-335. DOI: 10.1109/TEC.2019.2936574

23. Andreev M.V., Borovikov Iu.S., Gusev A.S., Sulaimanov A.O., Suvorov A.A., Ruban N.Iu., Ufa R.A. Kontseptsii i bazovaiia struktura vserezhimnogo modeliruiushchego kompleksa [Concept and basic structure of the All-mode modeling complex]. *Gazovaiia promyshlennost'*, 2017, no. 5(752), pp. 18-27.

24. Krylova I.A., KavaleroV B.V., Chabanov E.A. Model' sinkhronnogo generatora s uchetom nasyshtcheniia magnitnoi tsepi v srede MatLab/Simulink dlia issledovaniia avtomaticheskikh reguliatorov [Model of synchronous generator with accounting of the magnetic circuit saturation in the MatLab/Simulink environment for research of automatic controller]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2017, no. 24, pp. 178-191.

25. Daneev A.V., Daneev R.A., Sizykh V.N. Modelirovanie mnogofaznykh sinkhronnykh mashin v razlichnykh sistemakh koordinat [Modeling of multi-phase synchronous machines in various coordinate systems]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2020, vol. 22, no. 4(96), pp. 104-115. DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-4-104-115

Сведения об авторах

Аскарров Алишер Бахрамжонович (Томск, Россия) – аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета (634050, Томск, пр. Ленина, 30, e-mail: aba7@tpu.ru).

Андреев Михаил Владимирович (Томск, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета (634050, Томск, пр. Ленина, 30, e-mail: andreevmv@tpu.ru).

Чикишев Евгений Михайлович (Тюмень, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации автомобильного

транспорта Института транспорта Тюменского индустриального университета (625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, e-mail: chikishev_e@mail.ru).

Суворов Алексей Александрович (Томск, Россия) – кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета (634050, Томск, пр. Ленина, 30, e-mail: suvorovaa@tpu.ru).

Рудник Владимир Евгеньевич (Томск, Россия) – аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета (634050, Томск, пр. Ленина, 30, e-mail: ver3@tpu.ru).

About the authors

Alisher Bakhramzhonovich Askarov (Tomsk, Russian Federation) – Graduate Student of Division for Power and Electrical Engineering, School of Energy & Power Engineering National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, 30, Lenina ave., e-mail: aba7@tpu.ru).

Mikhail Vladimirovich Andreev (Tomsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of Division for Power and Electrical Engineering, School of Energy & Power Engineering National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, 30, Lenina ave., e-mail: andreevmv@tpu.ru).

Evgeniy Mikhailovich Chikishev (Tyumen, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Road Transport Operation, Institute of Transport, Industrial University of Tyumen (625000, Tyumen, 38, Volodarskogo st., e-mail: chikishev_e@mail.ru).

Aleksey Aleksandrovich Suvorov (Tomsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of Division for Power and Electrical Engineering, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, 30, Lenina ave., e-mail: suvorovaa@tpu.ru).

Vladimir Evgenyevich Rudnik (Tomsk, Russian Federation) – Graduate student of Division for Power and Electrical Engineering, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, 30, Lenina ave., e-mail: ver3@tpu.ru).

Получено 28.05.2021