

Электротехнические комплексы и системы

Electrotechnical complexes and systems

Научная статья

УДК 621.3

DOI: 10.14529/power220207

АНАЛИЗ СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ЗАВОДСКИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Г.П. Корнилов¹, kornilov@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2451-3850>

О.В. Газизова¹, ov.gazizova@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9416-672X>

А.П. Соколов¹, sasha777sokolov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9397-8291>

Р.Р. Храмшин¹, hramshinrr@mail.ru

Б.М. Логинов², lb18@yandex.ru

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

² ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, Россия

Аннотация. Одной из приоритетных задач развития металлургических предприятий является увеличение собственной генерации электрической энергии. На крупнейших предприятиях отрасли – ПАО «ММК» (г. Магнитогорск), ПАО «Северсталь» (г. Череповец), ПАО «НЛМК» (г. Липецк) выработка электроэнергии на заводских электростанциях составляет 60–70 % от общего потребления. Этому способствует два фактора: во-первых, наличие вторичных топливных газов – коксового и доменного, а во-вторых, неоправданно высокие тарифы на электроэнергию. В этих условиях обеспечение устойчивой безаварийной работы заводских генераторов и основных систем является, безусловно, актуальной задачей. Системы автоматического регулирования возбуждения (АРВ) являются наиболее ответственными, определяющими состояние генератора в различных режимах.

Основные требования к системам АРВ определяют специфические условия работы, среди которых выделим наиболее существенные и значимые.

1. Генераторы относительно небольшой мощности имеют связь с внешней энергосистемой на шинах 110 кВ, где мощность короткого замыкания находится в пределах 1000–3000 МВА, поэтому возможности регулирования и поддержания напряжения при этом весьма ограничены.

2. В результате того, что электрическая энергия, вырабатываемая на собственных электростанциях, в 2–2,5 раза дешевле покупной практически все генераторы работают с коэффициентом мощности, близким к единице, что значительно снижает их устойчивость в системе электроснабжения.

3. Напряжение в точке подключения и нагрузки собственных нужд станций, работающих на генераторном напряжении, имеют нестабильный характер, поэтому для сохранения устойчивости генераторов в переходных режимах наиболее предпочтительной является система АРВ с переключающейся структурой, в которой настройки и законы регулирования выбираются в зависимости от режима работы.

В работе дана общая характеристика существующих законов и предлагаемого закона регулирования возбуждения, адаптированная к условиям заводских генераторов, работающих совместно с мощными энергосистемами.

Ключевые слова: синхронный генератор, система возбуждения, закон регулирования возбуждения, моделирование, управление, патент

Для цитирования: Анализ систем возбуждения синхронных генераторов заводских электростанций / Г.П. Корнилов, О.В. Газизова, А.П. Соколов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 2. С. 69–80. DOI: 10.14529/power220207

ANALYSIS OF EXCITATION SYSTEMS OF SYNCHRONOUS GENERATORS OF FACTORY POWER PLANTS

G.P. Kornilov¹, kornilov@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2451-3850>

O.V. Gazizova¹, ov.gazizova@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9416-672X>

A.P. Sokolov¹, sasha777sokolov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9397-8291>

R.R. Hramshin¹, hramshinrr@mail.ru

B.M. Loginov², lb18@yandex.ru

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² PJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works", Magnitogorsk, Russia

Abstract. One of the priorities in the development of metallurgical enterprises is to increase own generation of electricity. At the largest enterprises in the sector – PJSC MMK (Magnitogorsk), Severstal PJSC (Cherepovets), PJSC "NLMK" (Lipetsk) Electricity generation is 60–70% of total consumption. This contributes to two factors: firstly, the presence of secondary fuel gases – coke and domain; and secondly, unreasonably high electricity tariffs. Thus there is an urgent need to ensure sustainable trouble-free operation of factory generators and basic systems. Automatic excitation control systems (ARV) are the most important factor when determining the state of the generator in various modes. The main requirements for ARV systems determine the specific working conditions.

We will highlight the most significant and significant of these.

1. Low power 10–50 MW generators are connected to an external power system on 110 kV buses, where the short circuit capacity is within 3000–5000 mba. Thus the possibilities of regulating and maintaining voltage are very limited.

2. Since the electricity produced by its own power plants is 2–2.5 times cheaper than purchased power, almost all generators work with a power factor close to one. This significantly reduces their stability in the power supply system.

3. The voltage at the point of connection and loading of the Eigen needs for the generator voltage stations are unstable. Therefore, in order to preserve the stability of generators in transient modes, the most preferred is the ARV system with a switching structure in which the settings and regulation laws are selected depending on Work modes.

The work gives a general review of the existing laws and the proposed arousal regulation law, adapted to the conditions of factory generators of small and medium-sized power, working concomitantly with a high power grid.

Keywords: synchronous generator, excitation system, excitation regulation law, modeling, control, patent

For citation: Kornilov G.P., Gazizova O.V., Sokolov A.P., Hramshin R.R., Loginov B.M. Analysis of excitation systems of synchronous generators of factory power plants. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2022;22(2): 69–80. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220207

Введение

Одним из основных средств регулирования параметров режима энергосистемы является система автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов (СГ). Она оказывает влияние на параметры не только установившихся, но и переходных режимов. В нормальных установившихся режимах системы АРВ СГ влияют на технико-экономические показатели. В частности, они определяют уровень напряжения и запас статической устойчивости. В ряде случаев данные системы регулирования могут быть задействованы в процессе поддержания параметров оптимального режима работы, оказывать влияние на величину потерь активной мощности, а также участвовать в системе ограничений при повышении загрузки генераторов по активной мощности. Особенно важно выбрать правильный закон АРВ при наличии в сети резкопеременной нагрузки и совместной работе с энергосистемой большой мощности и малыми сопротивлениями связи, когда перед сис-

темами регулирования стоят принципиально различные задачи.

В аварийных режимах на систему АРВ возлагается обеспечение динамической устойчивости путем повышения пропускной способности за счет поддержания напряжения в сети. По сути ее функции сводятся к максимально эффективному демпфированию низкочастотных колебаний в условиях многомашинной системы. Другим специфичным режимом является выход электростанции с нагрузкой на отдельную работу с возможной последующей ресинхронизацией, а также утяжеленные и послеаварийные режимы при совместной работе с энергосистемой.

Обеспечение надежной и эффективной работы систем регулирования возбуждения во всех перечисленных режимах одновременно не всегда является выполнимым. В связи с этим необходимо использовать универсальный закон возбуждения, позволяющий обеспечивать требования в указанных режимах или выработать принципы перехода

от одного закона к другому в зависимости от обстановки.

В настоящее время разработаны универсальные системы АРВ СГ, обеспечивающие поддержание напряжения на шинах генератора с необходимыми коррекциями. В современных условиях при отсутствии достаточно квалифицированных специалистов на предприятии нередко большинство функций АРВ СГ могут быть отключены, а вся система АРВ максимально упрощена или сведена до ручного регулирования. При этом можно выделить характерные места присоединения генераторов в энергосистеме и сформулировать в соответствии с этим специфические требования к системам возбуждения. В этом случае выделяют генераторы районных электростанций мощностью 100 МВт и выше, собственные генераторы заводских электростанций, а также источники распределенной генерации мощностью до 10–50 МВт. Условия функционирования перечисленных групп генераторов весьма разнообразны, а, значит, и требования к системам АРВ могут существенно различаться.

У генераторов заводских электростанций, как источников реактивной мощности, возможности по поддержанию напряжения на шинах генераторного напряжения весьма ограничены, что зависит от сопротивления связи между собственной электростанцией и энергосистемой. Для предприятий черной металлургии характерно, что их система электроснабжения, как правило, связана с энергосистемой посредством большого числа ЛЭП, и поэтому имеет малое сопротивление связи. В результате реактивная мощность, выдаваемая генераторами, незначительно влияет на уровень напряжения в сети, и закон поддержания постоянства напряжения оказывается часто не эффективным при отклонениях напряжения со стороны энергосистемы.

Аварийные режимы промышленных электростанций, в свою очередь, сопровождаются просадками напряжения различной глубины и длительности. В связи с этим необходимо обеспечить регулирование возбуждения в нормальном режиме для поддержания напряжения и сохранения динамической устойчивости в аварийных режимах. Другой особенностью заводских электростанций является возможность выхода на раздельную работу и последующая ресинхронизация. При этом возникают проблемы взаимных качаний генераторов до полной синхронизации относительно друг друга. Требования в указанных режимах к АРВ могут существенно отличаться от нормального. В таких условиях единственным действенным методом повышения эффективности систем АРВ является применение нескольких законов регулирования возбуждения и обоснование критериев для оптимального выбора.

Целью настоящей работы является анализ существующих систем автоматического регулиро-

вания возбуждения синхронных генераторов и степень их адаптации к условиям промышленного электроснабжения в составе объектов распределенной генерации.

Основная часть

В настоящее время опубликовано немало трудов, посвященных разработке и анализу законов регулирования возбуждения генераторов различной мощности. Основным законом АРВ является поддержание постоянства напряжения на выводах обмотки статора. Поэтому большая часть работ освещает вопросы снижения и демпфирования низкочастотных колебаний в энергосистеме при различных возмущениях, то есть повышение динамической устойчивости в рамках заданного закона регулирования. Большое внимание уделяют выбору структурной схемы и входных параметров, на которые реагирует система автоматического регулирования возбуждения. Значительная часть публикаций посвящена совершенствованию системы АРВ мощных генераторов крупных энергосистем. Основной целью при этом является демпфирование низкочастотных колебаний, возникающих при нарушении баланса мощностей. Такие исследования подробно изложены в трудах [1–8]. Характерной в этом плане является работа [9], в которой для снижения низкочастотных качаний использован энергетический подход для синтеза алгоритмов управления АРВ и обоснован выбор их структуры.

Особый интерес представляет изобретение [10], суть которого заключается в обеспечении автоматической оптимизации параметров АРВ СГ на этапе ввода оборудования в эксплуатацию без дестабилизирующего воздействия на энергосистему и без нарушения ее устойчивости. В основу положен подход к адаптации параметров регулятора с использованием импульсного пробного сигнала, основанный на стохастической оптимизации указанных параметров по заданному критерию качества регулирования. Преимуществом является инвариантность к закону функционирования и количеству оптимизируемых параметров регулятора, а также гарантированная сходимости к оптимальному решению. Предлагаемый способ может применяться как к одному, так и ко всем традиционно используемым регуляторам сигналов (системных параметров) в составе устройства АРВ СГ. К достоинствам изобретения относятся: автоматическая настройка постоянных времени регулирования по режимным параметрам синхронного генератора, относительно высокая точность определения коэффициентов усиления регуляторов по режимным параметрам, сокращение длительности электромеханических переходных процессов.

В современных системах АРВ широкое применение получил системный стабилизатор Power

System Stabilizer (PSS). Это устройство, которое обеспечивает дополнительный корректирующий сигнал в системе АРВ СГ, способствующий улучшению демпфирования колебаний в энергосистеме. Выбору их структуры и анализу устойчивости посвящено немало публикаций зарубежных и отечественных ученых. Например, в [11] рассмотрены условия демпфирования низкочастотных колебаний за счет применения однополосных и многополосных PSS и дана их классификация. Более подробно вопросы применения PSS изложены в работах [12–15].

Заслуживает внимания [16], где рассмотрены настройки АРВ синхронных генераторов на основе традиционных методов, а также способы многопараметрической оптимизации. Повышение быстродействия системы АРВ авторы декларируют основной целью модернизации систем возбуждения. К особенностям относится рассмотрение различных методов оптимизации необходимых целевых функций, составленных на основе корневых и частотных критериев оценки параметров процесса регулирования, для качественного функционирования АРВ СГ, работающего в разных схемно-режимных ситуациях. В результате вычислений получены области устойчивости при изменении коэффициентов внутреннего и внешних контуров; приведены осциллограммы изменения частоты и напряжения на шинах генератора при ступенчатом воздействии, показывающие повышение качества демпфирования.

Следует отметить работу [17], где в программно-аппаратном комплексе RTDS, предназначенном для изучения стационарных режимов и электромагнитных переходных процессов в электроэнергетической системе в реальном масштабе времени, поэтапно рассмотрены настройки АРВ PSS и автоматического регулятора напряжения (АРН) отечественного производства на предмет их совместимости. Выполнено экспериментальное определение частотных характеристик системы и показано формирование целевой функции. В результате получены двумерные области устойчивости по внутреннему и внешнему каналам, которые свидетельствуют об улучшении качества демпфирования напряжения в сети.

Отдельного внимания заслуживает анализ патентов по рассматриваемой теме. Большая их часть посвящена вопросам стабилизации напряжения на выводах генератора различными решениями [18–23].

Интерес представляет способ регулирования возбуждения синхронной машины, рассмотренный в работе [23]. Он позволяет увеличить диапазон загрузки синхронного генератора по реактивной мощности за счет изменения тока статора. При этом предусмотрена возможность перехода от закона регулирования возбуждения по отклонению напряжения к регулированию по отклонению ре-

активной мощности и наоборот. Изменение закона регулирования осуществляется при достижении реактивной составляющей тока статора своего максимального или минимального значения, а также при снижении напряжения ниже заданной уставки или превышении напряжения в контролируемой точке максимально допустимого значения. В результате значительно увеличивается диапазон регулирования возбуждения генератора. Отметим, что переход от одного закона регулирования возбуждения к другому происходит с некоторой выдержкой времени. Рассмотренный способ АРВ достаточно продуктивен, поскольку исключает перегрузки генератора, а также способствует сохранению устойчивого режима его работы.

Увеличение источников распределенной генерации стимулировало проведение теоретических исследований систем АРВ с переключающейся структурой, которые в наибольшей степени отвечают условиям работы генераторов небольшой мощности в энергосистеме.

Особенности эксплуатации объектов распределенной генерации подробно излагаются в работах [24, 25]. В частности, показана необходимость учета первичного двигателя синхронного генератора и нагрузки для адаптации систем регулирования возбуждения. В качестве примера приведена типовая система АРВ ГУ типа AREP/PMG с модулем нагрузки LAM. Эта система позволяет улучшить качество переходных процессов при отклонениях напряжения с учетом изменения частоты и регулирующего эффекта нагрузки. В [26] показано повышение эффективности и способы адаптации АРВ при снижении частоты сети и набросах нагрузки. Способ АРВ, предложенный в [27], позволяет автоматически изменять процесс регулирования возбуждения машины переменного тока в зависимости от отклонения напряжения и (или) изменения сопротивления питающей линии. Особенность данного изобретения заключается в возможности регулирования возбуждения посредством изменения реактивной мощности при изменении сопротивления сети в точке подключения СГ. Положительные свойства такой системы особенно проявляются в аварийных режимах.

Заслуживают внимания рекомендации повышения устойчивости мощных генераторов каскадных ГЭС с протяжёнными ЛЭП, предложенные старейшим работником отрасли – Коганом Феликсом Лазаревичем, в журнальных статьях [28–30]. Там, в частности, предлагается простое техническое решение – для уменьшения качаний ввести в систему АРВ генераторов корректирующий сигнал разности частот вращающегося вала и вектора сетевого напряжения.

Очевидно, что подобное решение может быть применимо не только на крупных ГЭС, но и для генераторов заводских электростанций при выходе

на раздельную работу с энергосистемой. В труде [29] показан способ группового АРВ с целью повышения динамической устойчивости. Этот подход также может быть применен для группового регулирования генераторов местных ТЭС с целью повышения динамической устойчивости при совместной работе с энергосистемой [31].

Очевидно, что процессы, возникающие в системах распределенной генерации, часто требуют анализа и более детального, пошагового изучения в нормальном и аварийном режимах. В этом случае успешно используют методы математического моделирования, в том числе имитационного.

Примеры математического моделирования синхронных генераторов с АРВ подробно изложены в трудах [32–37]. В работах [38, 39] приведены сведения о математическом моделировании элементов систем электроснабжения металлургических предприятий с использованием пакета MATLAB и приложением Simulink.

На кафедре электроснабжения промышленных предприятий МГТУ им. Г.И. Носова разработан программный комплекс «КАТРАН», позволяющий с достаточной точностью оценить эффективность работы регуляторов возбуждения генераторов заводских электростанций при различных режимах работы сети. С его помощью выполнено моделирование нормальных и аварийных режимов СГ [40–46]. Проведены исследования статической и динамической устойчивости синхронных генераторов, в том числе анализ аварийных режимов, выход на раздельную работу с последующей ресинхронизацией. В трудах [47, 48] представлена программа расчета и дано качественное описание переходных процессов при потере возбуждения и последующего асинхронного хода на электростанции сложной конфигурации. Разработанные математические модели, алгоритм расчета и программный комплекс позволяют оценить условия устойчивости генераторов и отсутствия их перегрузок.

Разработанный математический аппарат позволяет проводить исследования переходных процессов отдельных электростанций с различным числом генераторов, отличающихся мощностью, напряжением и структурой АРВ. Это делает реальным переход в недалёком будущем от цифровой модели к цифровым двойникам [49].

Прежде чем перейти к описанию предлагаемой системы АРВ на основе проведенного анализа источников и патентов сформулируем ещё раз основные исходные положения.

1. Генераторы заводских электростанций при совместной работе с мощной энергосистемой не оказывают существенного влияния на напряжение в сети.

2. При работе по традиционному закону поддержания напряжения, при изменении режима ге-

нератор будет существенно изменять генерацию реактивной мощности. При повышении напряжения со стороны энергосистемы АРВ генератора стремится его уменьшить путем снижения реактивной мощности вплоть до потребления, что опасно с точки зрения сохранения его устойчивости. Снижение напряжения со стороны энергосистемы приведет к выработке генератором реактивной мощности, что опасно с точки зрения перегрева ротора и перегрузки статора. Желаемого эффекта при этом достигнуть невозможно.

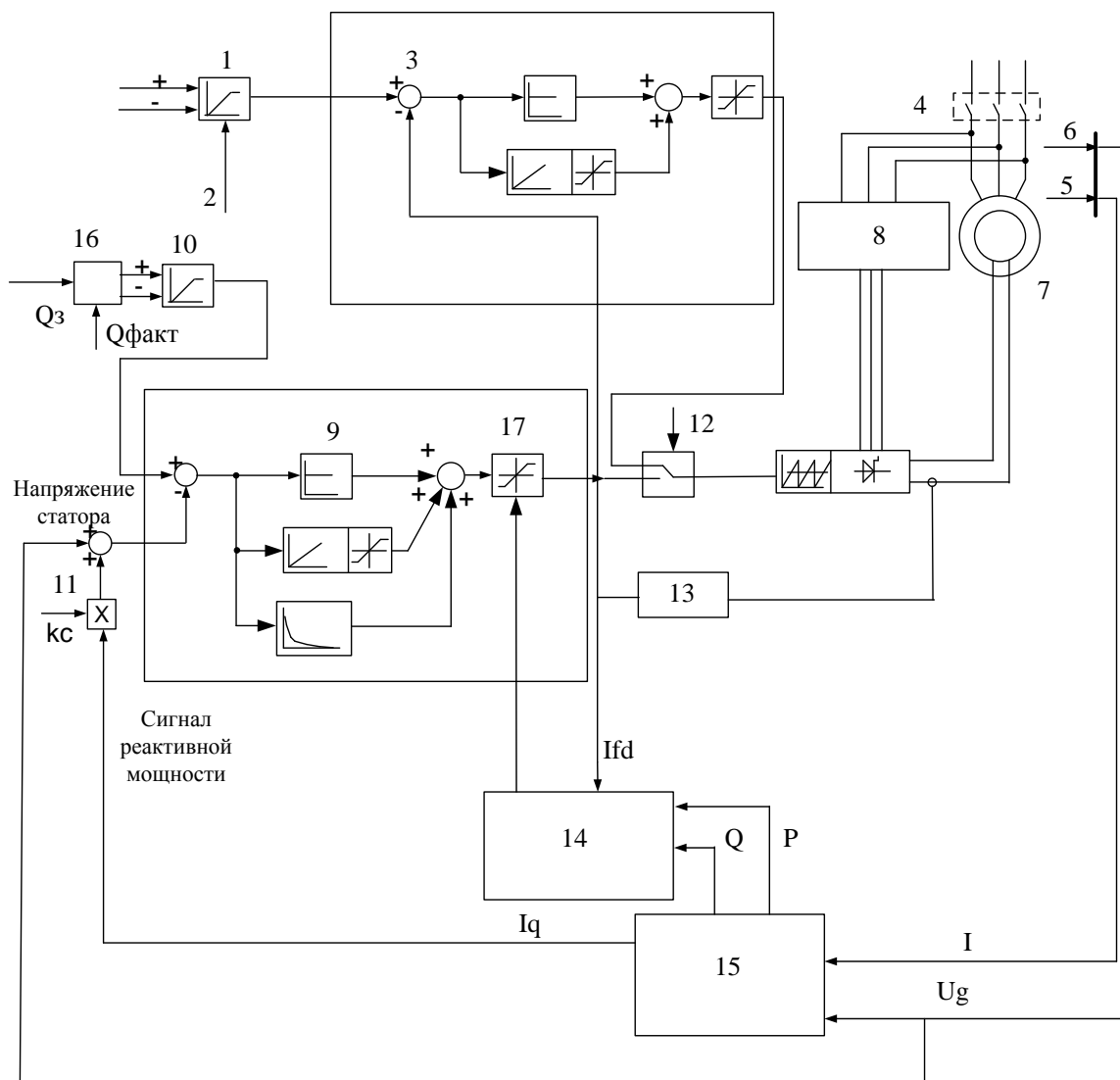
Таким образом, настройка системы АРВ на поддержание напряжения вынуждает оператора постоянно контролировать и корректировать уставку с целью исключить области недо возбуждения и перевозбуждения с размыканием контура регулирования и сохранения при этом устойчивого режима работы.

С целью устранения отмеченных недостатков предложена адаптированная система АРВ, которая реализована на основе существующей (см. рисунок).

Здесь предусмотрен дополнительный блок подстройки регулятора, который изменяет автоматически уставку на ток возбуждения, исключая переход в зону ограничений и размыкание контура регулирования возбуждения.

На рисунке показаны: 1 – задатчик уставки тока возбуждения с ключом управления оператора главного щита управления; 2 – отслеживание фактического тока возбуждения; 3 – регулятор тока возбуждения (резервный); 4 – генераторный выключатель; 5, 6 – напряжение и ток обмотки статора генератора; 7 – генератор; 8 – трансформатор тиристорного возбудителя; 9 – регулятор напряжения; 10 – задание уставки напряжения обмотки статора – блок коррекции; 11 – величина реактивной мощности; 12 – переключатель регуляторов напряжения генератора; 13 – датчик тока возбуждения; 14 – блок ограничений; 15 – система измерений активной и реактивной мощности; U_g , I_q – напряжение и реактивный ток на выводах обмотки статора; I_{fd} – ток обмотки возбуждения; 16 – блок подстройки фактической реактивной мощности регулятора; 17 – ограничитель по напряжению возбуждения; Q_z , $Q_{факт}$ – заданное и фактическое значение реактивной мощности генератора; k_c – коэффициент статизма регулятора возбуждения.

Блок подстройки, корректирующий задание уставки напряжения, включен последовательно с блоком коррекции 10. В результате исключается переход в зону ограничений, система возбуждения реагирует на изменения напряжения и является более устойчивой в нормальных режимах с отклонением напряжения до $\pm 15\%$. Данная коррекция повышает эффективность АРВ в условиях заводских электростанций, в том числе статическую и динамическую устойчивость.



Разработанная система АРВ синхронного генератора
The developed AVR system of the synchronous generator

Заключение

Вопросы адаптации систем регулирования возбуждения к условиям функционирования заводских электростанций являются весьма актуальными. При этом необходимо учитывать ряд особенностей работы генераторов, а именно: небольшую установленную мощность (до 60 МВт) по сравнению с мощностью питающей энергосистемы, которая достигает 1000–6000 МВА на уровне 110–220 кВ; предельную загрузку по активной

мощности и работу со средним коэффициентом мощности выше 0,95.

С учетом перечисленных особенностей разработан новый способ коррекции уставки напряжения. Адаптация существующих систем возбуждения снизит возможность аварийных режимов, позволит более эффективно организовывать работу оптимальных аварийных режимов, а также повысит качество нормальных и аварийных переходных электрохимических процессов.

Список литературы

1. Темгеновская Т.В. Методы настройки автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 3. С. 84–94. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.3(55).84-94
2. Булатов Ю.Н. Крюков А.В., Нгуен В.Х. Координация настроек автоматических регуляторов паротурбинной установки распределенной генерации // Вестник Иркутского государственного технического университета. Энергетика. 2020. № 24. С. 112–122. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-1-112-122
3. Поляхов Н.Д., Ха Ань Туан. Адаптивное управление синхронным генератором на основе безынерционного параметрического алгоритма // Электричество. 2014. № 12. С. 47–54.

4. Dolatabadi S., Seyedi H., Tohidi S. A new method for loss of excitation protection of synchronous generators in the presence of static synchronous compensator based on the discrete wavelet transform // *Electric Power Systems Research*. 2022. Vol. 209. DOI: 10.1016/j.epr.2022.107981
5. Choucha A., Chaib L., Arif S. Robust control design of PSS for dynamic stability enhancement of power system // *Electrical Systems*. 2017. Vol. 13 (2). P. 376–386. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.643.3
6. Xiufeng Shi. Research on Measures to Improve Stability of the Power System // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 742. p. 648–652. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.742.648
7. Sumanbabu B., Mishra S., Panigrahi B.K., Venayagamoorthy G.K. Robust Tuning of Modern Power System Stabilizers Using Bacterial Foraging Algorithm // *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2007)*. 2007. P. 2317–2324. DOI: 10.1109/cec.2007.4424760
8. Arumugam J., Keppana G.T. Robust Design of Decentralized Power System Stabilizers using Metaheuristic Optimization Techniques for Multimachine Systems // *Serbian journal of electrical engineering*. 2009. No. 1. P. 89–103. DOI: 10.2298/sjee0901089j
9. Лянзберг С.В. Разработка и выбор структуры алгоритмов управления возбуждением синхронных генераторов в энергосистеме: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. М., 2010.
10. Пат. 2498495 Российская Федерация. Способ настройки параметров регулятора возбуждения синхронного электрического генератора / А.В. Бумагин, К.П. Лиходеенко, А.Б. Борзов и др.; заявитель и правообладатель МГТУ им. Н.Э. Баумана. № 2012130970/07; заявл. 20.07.2012.
11. Николаев А.А., Даниленко А.С., Ложкин И.А. Исследование различных типов стабилизаторов PSS, используемых в системах автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. 2018. Т. 5, № 1. С. 3–10. DOI: 10.24892/RIJEE/20180101
12. Дживанандхам А., Кеппана Г.Т. Методы для многомашинных систем // *Сербский журнал электротехники*. 2009. № 1. С. 89–103.
13. Зеленохат О.Н. Разработка алгоритмов управления возбуждением синхронных генераторов для демпфирования качаний их роторов после больших возмущений в электроэнергетической системе: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. М., 2007.
14. Гуриков О.В. Методика выбора параметров настройки системных стабилизаторов микропроцессорных автоматических регуляторов возбуждения, работающих в энергообъединениях сложной структуры: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. СПб., 2020.
15. Гашимов А.М., Рахманов Н.Р., Зейналов А.Д. Демпфирование электромеханических колебаний в многомашинной энергосистеме с разнотипными регуляторами возбуждения // *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика*. 2011. № 1. С. 30–39. DOI: 10.20535/s0021347007050032
16. Канафеев Р.И., Жирнов А.Д., Климова Т.Г. Оптимальная настройка автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов // *Проблемы энергетики*. 2016. № 11. С. 77–83.
17. Канафеев Р.И., Жирнов А.Д., Климова Т.Г. Анализ результатов оптимальной настройки автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов в программно-аппаратном комплексе RTDS // *ЭнергоStyle*. 2016. № 3 (35). С. 28–30. DOI: 10.26731/1813-9108.2017.3(55).84-94
18. Пат. 2604874 Российская Федерация. Автоматический регулятор возбуждения генератора синхронного / В.Н. Воробьев; заявитель и правообладатель ОАО «Электроагрегат». № 2015153152/07; заявл. 2015.12.10.
19. Пат. 2623997 Российская Федерация. Система возбуждения синхронного генератора / В.Ф. Наумов; заявитель и правообладатель В.Ф. Наумов. № 2016126219; заявл. 30.06.2016.
20. Пат. 2237346 Российская Федерация. Способ и устройство регулирования возбуждения синхронного генератора / В.Н. Золотухин, А.А. Нестеров, Б.Ф. Симонов и др. № 2002118209/09; заявл. 05.07.2002.
21. Пат. 2523005 Российская Федерация. Система возбуждения синхронного генератора с управляемой внешней форсировкой / В.Г. Сугаков, О.С. Хватов, Ю.А. Малышев, А.А. Тошев; заявитель и правообладатель ФБОУ ВПО «Волжская государственная академия водного транспорта». № 2013108756/07; заявл. 27.02.2013.
22. Пат. 65318 Российская Федерация. Устройство регулирования возбуждения синхронного генератора / Г.Н. Утляков, Р.Ф. Нуруллин, Д.С. Дильмухаметов и др. № 2007110314/22; заявл. 20.03.2007, опубл. 27.07.2007. Бюл. № 21.
23. Пат. 2145766 Российская Федерация. Способ регулирования возбуждения синхронной машины / В.П. Герих, Н.П. Логинов, А.А. Окин; заявитель и правообладатель АО «ЦДУ ЕЭС России». № 99102868/09; заявл. 18.02.1999; опубл. 20.02.2000.
24. Али З.М., Маликов А.И. Влияние настроек регулятора энергетической системы и автоматического регулятора возбуждения на синхронизирующий и демпфирующий моменты // *Проблемы энергетики*. 2010. № 3–4. С. 131–142.
25. Илюшин П.В., Куликов А.Л. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией: моногр. Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. 364 с.

26. Илюшин П.В. Совершенствование противоаварийного и режимного управления энергорайонов с распределенной генерацией: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.14.02. СПб., 2019.
27. Attikas R., Tammoja H. Excitation System Models of Generators of Balti and Eesti Power Plants // *Oil Shale*. 2007. Vol. 24, no. 2 Special. P. 285–295.
28. Коган Ф.Л. Особенности сильного регулирования возбуждения синхронных генераторов в сложной энергосистеме // *Электрические станции*. 2019. № 7. С. 27–35.
29. Коган Ф.Л. Повышение эффективности стабилизации режима при возмущениях в энергосистеме // *Электричество*. 2020. № 5. С. 4–11.
30. Коган Ф.Л. По поводу статьи А.А. Юрганова «Некоторые соображения о статье Ф.Л. Когана «Особенности сильного регулирования возбуждения синхронных генераторов в сложной энергосистеме» // *Электрические станции*. 2019. № 11. С. 55–60. DOI: 10.34831/EP.2019.1060.43579
31. Калентионок Е.В., Филипчик Ю.Д. Управление реактивной мощностью генераторов электростанций для повышения устойчивости электроэнергетических систем // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2009. № 6, С. 23–30.
32. Белый В.Б. Моделирование процессов в системе возбуждения синхронных генераторов автономных систем электроснабжения с использованием внешних характеристик преобразователя // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2018. № 11. С. 113–116.
33. Юрганов А.А., Кожевников В.А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов. СПб.: Наука, 1996. 138 с.
34. Гусев А.С. Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Томск, 2008.
35. Шхати Вассфи Хамид. Развитие методов математического моделирования переходных процессов современных генераторов для повышения эксплуатационных показателей их работы: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. СПб., 2008.
36. Карачев А.А. Разработка и исследование нечетких регуляторов систем возбуждения бесщеточных синхронных генераторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. СПб., 2007.
37. Сафарян В.С. Исследование режимов автономного синхронного генератора // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2017. № 60 (5). С. 433–445. DOI: 10.20535/s002134701988010108
38. Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р. Моделирование электротехнических комплексов промышленных предприятий. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2014. 239 с.
39. Средства и перспективы управления реактивной мощностью крупного металлургического предприятия / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, А.Ю. Коваленко, Е.А. Кузнецов // *Электротехника*. 2008. № 5. С. 25–32.
40. Sokolov A.P., Gazizova O.V. Improving the Accuracy Mathematical Modeling of Transients Emergency Mode Industrial Facilities Distributed Generation // 2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation, RPA 2018. 2018. P. 8537190.
41. Gazizova O.V., Kondrashova Y.N., Sokolov A.P. Analysis of Short Circuit Transients with Separate Operation of Iron and Steel Industry Power Plant with Account of Dynamic Characteristics of Industrial Load // *Proceedings – 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019*. 2019. P. 7–12.
42. Kondrashova Y.N., Gazizova O.V., Malafeyev A.V. Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability // *Procedia Engineering* 2015. Vol. 128. P. 759–763.
43. Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Y.N. Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. “International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015”*. 2016. P. 012056. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012056
44. Газизова О.В., Кондрашова Ю.Н., Малафеев А.В. Повышение эффективности управления режимами электростанций промышленного энергоузла за счет прогнозирования статической и динамической устойчивости при изменении конфигурации сети // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. № 3 (32). С. 27–38.
45. Ротанова Ю.Н., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н. Исследование динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями при отделении от энергосистемы в результате короткого замыкания // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2008. № 17 (117). С. 72–74.
46. Газизова О.В., Малафеев А.В., Кондрашова Ю.Н. Определение предельных параметров режимов для обеспечения успешной ресинхронизации объектов распределенной генерации в условиях предприятия черной металлургии // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2016. Т. 16, № 4. С. 12–22. DOI: 10.14529/power160402

47. Анализ допустимости режима потери возбуждения синхронного генератора в условиях промышленной системы электроснабжения сложной конфигурации / О.В. Газизова, А.П. Соколов, Н.Т. Патшин, Ю.Н. Кондрашова // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 2 (43). С. 12–18.

48. Sokolov A.P., Gazizova O.V., Kondrashova Y.N. Study of the Transients with the Loss of Field of the Synchronous Generator in the Industrial Electric Power Station // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019. 2019. P. 012033. DOI: 10.1088/1757-899X/666/1/012033

49. Концептуальные направления создания цифровых двойников электротехнических систем агрегатов прокатного производства / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, Б.М. Логинов, О.А. Гасиярова // *Известия вузов. Электромеханика*. 2021. Т. 64, № 1. С. 54–68. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-1-54-68

References

1. Temgenevskaya T.V. [Methods setting automatic excitation regulators of synchronous generators]. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, 2017;3:84–94. (In Russ.) DOI: 10.26731/1813-9108.2017.3(55).84-94

2. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguen V.H. [Coordination of the settings of automatic steam-turbine installation regulators]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2020;(24):112–122. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2020-1-112-122

3. Polyahov N.D., Ha An' Tuan [Adaptive control of the synchronous generator based on the imperative parametric algorithm]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2014;(12):47–54. (In Russ.)

4. Dolatabadi S., Seyedi H., Tohidi S. A new method for loss of excitation protection of synchronous generators in the presence of static synchronous compensator based on the discrete wavelet transform. *Electric Power Systems Research*. 2022;209. DOI: 10.1016/j.epr.2022.107981

5. Choucha A., Chaib L., Arif S. Robust control design of PSS for dynamic stability enhancement of power system. *Electrical Systems*. 2017;13(2):376–386. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.643.3

6. Xiufeng Shi, Shiguang Mu. Research on Measures to Improve Stability of the Power System. *Applied Mechanics and Materials*. 2015;742:648–652. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.742.648

7. Sumanbabu B., Mishra S., Panigrahi B.K., Venayagamoorthy G.K. Robust Tuning of Modern Power System Stabilizers Using Bacterial Foraging Algorithm. In: *EEE Congress on Evolutionary Computation(CEC 2007)*; 2007. P. 2317–2324. DOI: 10.1109/cec.2007.4424760

8. Arumugam Jeevanandham, Keppana Gowder Thanushkodi. Robust Design of Decentralized Power System Stabilizers using Meta-heuristic Optimization Techniques for Multimachine Systems. *Serbian journal of electrical engineering*. 2009;(1):89–103. DOI: 10.2298/sjee0901089j

9. Lyanzberg S.V. *Razrabotka i vybor struktury algoritmov upravleniya vozbuзhdeniem sinhronnyh generatorov v energosisteme. Diss. kand. tekhn. nauk*. [Development and selection of the structure of algorithms for the excitation of synchronous generators in the power system. Cand. sci. diss.]. Moscow; 2010. (In Russ.)

10. Bumagin A.V., Lihodeenko K.P., Borzov A.B., Gondar' A.V., Cygankov V.Yu. *Sposob nastroyki parametrov regulatora vozbuзhdeniya sinhronnogo elektricheskogo generatora* [Method for adjusting the parameters of the excitation controller of the synchronous electrical generator]. Patent RF, no. 2498495, 2012. (In Russ.)

11. Nikolaev A.A., Danilenko A.S., Lozhkin I.A. [Study of various types of PSS stabilizers used in automatic excitation control systems for synchronous generators]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering]. 2018;5(1):3–10. (In Russ.) DOI: 10.24892/RIJEE/20180101

12. Dzhivanandham A., Keppana G.T. [Methods for many machine systems]. *Serbian magazine electrical engineering*. 2009;1:89–103. (In Russ.)

13. Zelenohat O.N. *Razrabotka algoritmov upravleniya vozbuзhdeniem sinhronnyh generatorov dlya dempfirovaniya kachanij ih rotorov posle bol'shikh vozmushchenij v elektroenergeticheskoy sisteme. Diss. kand. tekhn. nauk* [Development of algorithms for managing the excitation of synchronous generators to dampen the swings of their rotors after high perturbations in the electric power system. Cand. sci. diss.]. Moscow; 2007. (In Russ.)

14. Gurikov O.V. *Metodika vybora parametrov nastroyki sistemnyh stabilizatorov mikroprocessornyh avtomaticheskikh regulyatorov vozbuзhdeniya, rabotayushchih v energoob"edineniyah slozhnoj struktury. Diss. kand. tekhn. nauk* [Methodology for selecting the settings of system stabilizers of microprocessor automatic excitation regulators operating in the energy facilities of a complex structure. Cand. sci. diss.]. St. Peterburg; 2020. (In Russ.)

15. Gashimov A.M., Rahmanov N.R., Zejalov A.D. [Damping of electromechanical oscillations in a lot of machine power system with multi-way excitation regulators]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij i energeticheskikh ob"edinenij SNG. Energetika* [Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations]. 2011;(1):30–39. (In Russ.) DOI: 10.20535/s0021347007050032

16. Canafyev R.I., Zhirnov A.D., Klimova T.G. [Optimal configuration of automatic excitation regulators of synthesis of synchronous generators]. *Energy problems*. 2016;11:77–83. (In Russ.)

17. Canafyev R.I., Zhirnov A.D., Klimova T.G. [Analysis of the results of optimal configuration of automatic excitation controls of synchronous generators in the RTDS software and hardware complex]. *EnergoStyle*, 2016;3(35):28–30. (In Russ.) DOI: 10.26731/1813-9108.2017.3(55).84-94

18. Vorob'ev V.N. *Avtomatičeskij reguljator vozbuždeniya generatora sinhronnogo* [Automatic synchronous excitation controller]. Patent RF, no. 2604874, 2010. (In Russ.)
19. Naumov V.F. *Sistema vozbuždeniya sinhronnogo generatora* [Synchronous generator excitation system]. Patent RF, no. 2623997, 2016. (In Russ.)
20. Zolotuhin V.N., Nesterov A.A., Simonov B.F., Kadyšev A.I., Kaniskin N.A., Postnikov A.S., Haritonov S.A., Maslennikov V.V. *Sposob i ustrojstvo regulirovaniya vozbuždeniya sinhronnogo generatora* [Method and device for adjusting the excitation of a synchronous generator]. Patent RF, no. 2237346, 2002. (In Russ.)
21. Sugakov V.G., Hvatov O.S., Malyshev Yu.A., Toshchev A.A. *Sistema vozbuždeniya sinhronnogo generatora s upravlyajemoj vneshnej forsirovkoj* [Synchronous generator excitation system with controlled outer fors]. Patent RF, no. 2523005, 2013. (In Russ.)
22. Utlyakov G.N., Nurullin R.F., Dil'muhametov D.S., Valeev A.R., Asadullin V.M. *Ustrojstvo regulirovaniya vozbuždeniya sinhronnogo generatora* [Synchronous Generator Excitation]. Patent RF, no. 65318, 2007. (In Russ.)
23. Gerih V.P., Loginov N.P., Okin A.A. *Sposob regulirovaniya vozbuždeniya sinhronnoj mashiny* [Method for adjusting the excitation of a synchronous machine]. Patent RF, no. 2145766, 1999. (In Russ.)
24. Ali Z.M., Malikov A.I. [The impact of the settings of the energy system regulator and the automatic excitation regulator on the synchronizing and damping moments]. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2010;(3–4):131–142. (In Russ.)
25. Ilyushin P.V., Kulikov A.L. *Avtomatika upravleniya normal'nymi i avarijnymi rezhimami ehnergorajonov s raspredelennoj generatsiej* [Automation of the control of normal and emergency modes of energy rates with distributed generation]. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod branch of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration Publ.; 2019. 364 p. (In Russ.)
26. Ilyushin P.V. *Sovershenstvovanie protivovarijnogo i rezhimnogo upravleniya energorajonov s raspredelennoj generaciej. Diss. d-ra. tekhn. nauk* [Improvement of anti-emergency and regime management of energy rates with distributed generation. Doct. sci. diss.]. St. Petersburg; 2019. (In Russ.)
27. Attikas R., Tammoja H. Excitation System Models of Generators of Balti and Eesti Power Plants. *Oil Shale*. 2007;24(2 Special):285–295.
28. Kogan F.L. [Features of strong control of excitation of synchronous generators in a complex power system]. *Elektricheskie stancii* [Electrical stations]. 2019;(7):27–35. (In Russ.) DOI: 10.34831/EP.2019.1056.44192
29. Kogan F.L. [Increasing the efficiency of stabilization of the regime during perturbations in the power system]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2020;(5):4–11. (In Russ.) DOI: 10.24160/0013-5380-2020-5-4-11
30. Kogan, F.L. [Regarding the article A.A. Yurganova “Some considerations about the article F.L. Kogan “Features of strong control of excitation of synchronous generators in a complex power system”]. *Elektricheskie stancii* [Electrical stations]. 2019;(11):55–60. (In Russ.) DOI: 10.34831/EP.2019.1060.43579
31. Kalentionok E.V., Filipchik Yu.D. [Management of reactive power generators for increasing the stability of electric power systems]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij i energetičeskikh ob'edinenij SNG. Energetika* [Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations]. 2009;(6):23–30. (In Russ.)
32. Belyj V.B. [Modeling processes in the excitation system of synchronous generators of autonomous power supply systems using the external characteristics of the converter]. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2018;(11):113–116. (In Russ.)
33. Yurganov A.A., Kozhevnikov V.A. *Regulirovanie vozbuždeniya sinkhronnykh generatorov* [Adjusting the excitation of synchronous generators]. St. Petersburg: Nauka Publ.; 1996. 138 p. (In Russ.)
34. Gusev A.S. *Koncepciya i sredstva vserezhimnogo modelirovaniya v rel'nom vremeni elektroenergetičeskikh sistem. Diss. kand. tekhn. nauk* [Concept and means of all-mode modeling in real-time electric power systems. Cand. sci. diss.]. Tomsk; 2008. (In Russ.)
35. Schhati Vassfi Hamid. *Razvitie metodov matematičeskogo modelirovaniya perekhodnyh processov sovremennykh generatorov dlya povysheniya ekspluatacionnykh pokazatelej ih raboty. Diss. kand. tekhn. nauk* [Development of methods for mathematical modeling of transient processes of modern generators to enhance the operational performance of their work. Cand. sci. diss.]. St. Petersburg; 2008. (In Russ.)
36. Karachev A.A. *Razrabotka i issledovanie nechetkikh reguljatorov sistem vozbuždeniya bezshchetochnykh sinhronnykh generatorov. Diss. kand. tekhn. nauk* [Development and study of fuzzy regulators of excitation systems of brushless synchronous generators. Cand. sci. diss.]. St. Petersburg; 2007. (In Russ.)
37. Safaryan V.S. [Study of autonomous synchronous generator modes]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij i energetičeskikh ob'edinenij SNG. Energetika* [Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations]. 2017;60(5):433–445. (In Russ.) DOI: 10.20535/s002134701988010108
38. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Khrumshin T.R. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh kompleksov promyshlennykh predpriyatij* [Modeling electrical systems of industrial enterprises]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ.; 2014. 239 p. (In Russ.)

39. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Kovalenko A.Yu., Kuznecov E.A. [Means and prospects for controlling the reactive capacity of a large metallurgical enterprise]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2008;(5):25–32. (In Russ.)

40. Sokolov A.P., Gazizova O.V. Improving the Accuracy Mathematical Modeling of Transients Emergency Mode Industrial Facilities Distributed Generation. In: *2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation, RPA 2018*. 2018. P. 8537190. DOI: 10.1109/RPA.2018.8537190

41. Gazizova O.V., Kondrashova Y.N., Sokolov A.P. Analysis of Short Circuit Transients with Separate Operation of Iron and Steel Industry Power Plant with Account of Dynamic Characteristics of Industrial Load. In: *Proceedings – 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019*. 2019. P. 7–12. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877645

42. Kondrashova Y.N., Gazizova O.V., Malafeyev A.V. Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability. *Procedia Engineering*. 2015;128:759–763. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.1003

43. Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Y.N. Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. “International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015”*. 2016. P. 012056. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012056

44. Gazizova O.V., Kondrashova Yu.N., Malafeyev A.V. Increase of Effective Management of Modes of Electric Power Plants Due to Forecasting of Static and Dynamic Stability at Change of Network Configuration. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2016;3(32):27–38. (In Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2016-3(32)-27-38

45. Malafeyev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. [Study of the dynamic stability of power supply systems of industrial enterprises with own power plants in the separation from the power system as a result of a short circuit]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2008;17(117):72–74. (In Russ.)

46. Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Yu.N. Determination of Limit Mode Parameters to Ensure Successful Resynchronization of Distributed Generation Units at Iron and Steel Works. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2016;16(4):12–22. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160402

47. Gazizova O.V., Sokolov A.P., Patshin N.T., Kondrashova Yu.N. Analysis of the permissibility of the mode of excitation of a synchronous generator in the conditions of an industrial system of power supply complex configuration. *Electrical systems and complexes*. 2019;2(43):12–18. (In Russ.) DOI: 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-12-18

48. Sokolov A.P., Gazizova O.V., Kondrashova Y.N. Study of the Transients with the Loss of Field of the Synchronous Generator in the Industrial Electric Power Station. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019*. 2019. P. 012033. DOI: 10.1088/1757-899X/666/1/012033

49. Radionov A.A., Karandaev A.S., Loginov B.M., Gasiyarova O.A. Conceptual directions of creating digital twins for electrotechnical systems of rolling mill facilities. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics]. 2021;64(1):54–68 (In Russ.) DOI: 10.17213/0136-3360-2021-1-54-68

Информация об авторах

Корнилов Геннадий Петрович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; kornilov@magtu.ru.

Газизова Ольга Викторовна, канд. техн. наук, доц., кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; ov.gazizova@magtu.ru.

Соколов Александр Павлович, аспирант, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; sasha777sokolov@list.ru.

Храмшин Рифхат Рамазанович, канд. техн. наук, доц., кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; hramshinrr@mail.ru.

Логинов Борис Михайлович, канд. техн. наук, ведущий инженер Центральной электротехнической лаборатории, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск, Россия; lb18@yandex.ru.

Information about the authors

Gennadij P. Kornilov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Electric Power Industry, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; kornilov@magtu.ru.

Olga V. Gazizova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Department of Electric Power Industry, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; ov.gazizova@magtu.ru.

Alexandr P. Sokolov, Graduate Student, Department of Electric Power Industry, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; sasha777sokolov@list.ru.

Rifhat R. Hramshin, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Department of Electric Power Industry, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; hramshinrr@mail.ru.

Boris M. Loginov, Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer, PJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works”, Magnitogorsk, Russia; lb18@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 30.11.2021; одобрена после рецензирования 07.02.2022; принята к публикации 07.02.2022.

The article was submitted 30.11.2021; approved after reviewing 07.02.2022; accepted for publication 07.02.2022.