

УДК 621.311, 681.515, 621.313.322

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.3.03

**А.Б. Аскарлов<sup>1</sup>, М.В. Андреев<sup>1</sup>, Е.М. Чикишев<sup>2</sup>,  
А.А. Суворов<sup>1</sup>, В.Е. Рудник<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Томск, Россия

<sup>2</sup>Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

## **СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Электроэнергетические системы современной структуры значительно отличаются от традиционных в контексте состава используемого оборудования и динамических характеристик, определяющих характер протекания процессов. Последнее приводит к закономерной необходимости в адаптации различных систем регулирования и управления, используемых на объектах, для обеспечения требуемого уровня надежности и устойчивости функционирования современных электроэнергетических систем. Одной из тенденций в данной сфере является развитие систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов электростанций. **Цель** статьи заключалась в аналитическом обзоре современных направлений развития подобных систем, которые способствуют эффективному обеспечению необходимых запасов устойчивости в различных схемно-режимных состояниях современных электроэнергетических систем, а также качества протекания процессов, динамического перехода и демпфирования возникающих колебаний. Для этого был проведен **анализ** решений, используемых в каждом из существующих направлений. **Результатом** работы являются представленная информация о возможных вариантах развития систем регулирования возбуждения, а также некоторые выводы о достоинствах и недостатках каждого из них. **Практическая значимость** заключается в возможности использования полученной информации для формирования принципиально нового направления, позволяющего исключить недостатки существующего или частного технического решения в рамках представленных направлений.

**Ключевые слова:** автоматический регулятор возбуждения, синхронный генератор, система возбуждения, электроэнергетическая система, нейронные сети, нечеткая логика, методы оптимизации, настройка.

A.B. Askarov<sup>1</sup>, M.V. Andreev<sup>1</sup>, E.M. Chikishev<sup>2</sup>,  
A.A. Suvorov<sup>1</sup>, V.E. Rudnik<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

## CURRENT TRENDS IN DEVELOPMENT OF AUTOMATIC EXCITATION CONTROL SYSTEMS OF SYNCHRONOUS GENERATORS OF POWER PLANTS

Electric power systems of a modern structure differ significantly from conventional ones in the context of the used elements and the dynamic characteristics that determine the nature of the processes. The latter leads to a consequent need to adapt various control systems used at facilities to ensure the required level of reliability and stability of operation of modern electric power systems. One of the trends in this area is the development of automatic excitation control systems of synchronous generators of power plants. The **purpose** of this article is to provide an analytical review of modern trends in the development of such systems, which contribute to the effective ensuring of the necessary stability margins in various operating states of modern electric power systems, as well as quality of the processes, dynamic transition and damping of emerging oscillations. For this, an **analysis** of the solutions used in each of the existing directions was carried out. The **result** of the work is the presented information on possible options for the development of excitation control systems, as well as some conclusions about pros and cons of each of them. The **practical significance** lies in the possibility of using the information obtained to form a fundamentally new direction, which makes it possible to exclude the shortcomings of existing ones, or a particular technical solution within the framework of the presented directions.

**Keywords:** automatic voltage regulator, synchronous generator, excitation system, electric power system, neural networks, fuzzy logic, optimization methods, tuning.

### Введение

Динамические характеристики электроэнергетических систем (ЭЭС) современной структуры значительно изменяются в сравнении с традиционными ЭЭС [1], в которых основным фактором, определяющим протекание процессов, являлась динамика функционирования синхронных генераторов электрических станций и их систем автоматического регулирования и управления (САР и САУ), а сетевые элементы преимущественно функционировали на переменном токе. Подобный факт непосредственно связан с внедрением в системообразующие и распределительные электрические сети все большего числа разнообразных «активных» объектов и устройств: объектов распределенной генерации (РГ) различного типа, крупных объектов генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), технологий гибких управляемых электропередач переменного тока (*Flexible Alternating*

*Current Transmission System* – устройств FACTS), промышленных систем накопления электрической энергии, установок генерации или потребления на постоянном токе и др. С учетом резко изменяющихся условий функционирования ЭЭС в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах, сопровождающихся возникновением ряда проблем, которые связаны с обеспечением эффективного автоматического режимного и противоаварийного управления современными ЭЭС, среди решений, которые направлены на достижение требуемого уровня надежности и устойчивости функционирования ЭЭС, гарантирующего бесперебойное электроснабжение потребителей электрической энергией нормированного качества и в необходимом количестве, являются модернизация и адаптация существующих или разработка новых САР и САУ различных элементов ЭЭС [2, 3], среди которых стоит отдельно выделить автоматические регуляторы возбуждения (АРВ) синхронных генераторов. Последние являются основным видом режимной автоматики ЭЭС, отвечающей за их функционирование в нормальных и переходных режимах, а также за все виды устойчивости (статическую аperiodическую, статическую колебательную и динамическую) как отдельных агрегатов, так и всей ЭЭС в целом, и устанавливаются на традиционных источниках генерации (тепловых, гидравлических и атомных электростанциях, включая газотурбинные, парогазовые и другие генерирующие установки).

При этом одна из важнейших ролей в обеспечении надежности и устойчивости современных ЭЭС с объектами РГ, ВИЭ и устройствами FACTS, как и в традиционных ЭЭС, будет все так же отводиться устройствам АРВ синхронных генераторов, поскольку, как показывает мировой опыт эксплуатации ЭЭС со значительной долей объектов РГ и ВИЭ, полномасштабный переход от централизованной к децентрализованной схеме электроснабжения и полноценный отказ от мощных традиционных источников энергии в пользу низкоуглеродных и безуглеродных в настоящий момент не являются возможными ввиду возникновения широкого перечня вопросов и проблем в подобных ЭЭС, требующих всестороннего анализа и комплексного решения [4, 5]. В связи с этим чрезвычайно актуальными остаются вопросы осуществления регулирования возбуждения с точки зрения эффективного обеспечения необходимых запасов устойчивости в различных схемно-режимных состояниях современных ЭЭС, а также качества протекания процессов, динамического перехода и демпфирования возникающих колебаний.

## Обзор существующих направлений в области развития систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов электрических станций

На текущий момент можно выделить несколько направлений, связанных с обеспечением эффективности функционирования систем АРВ синхронных генераторов в условиях развития современных ЭЭС, которые могут быть объединены в четыре основные группы и представлены в общем виде, как показано на рис. 1. В последующих разделах статьи приведена информация о каждом из представленных направлений.

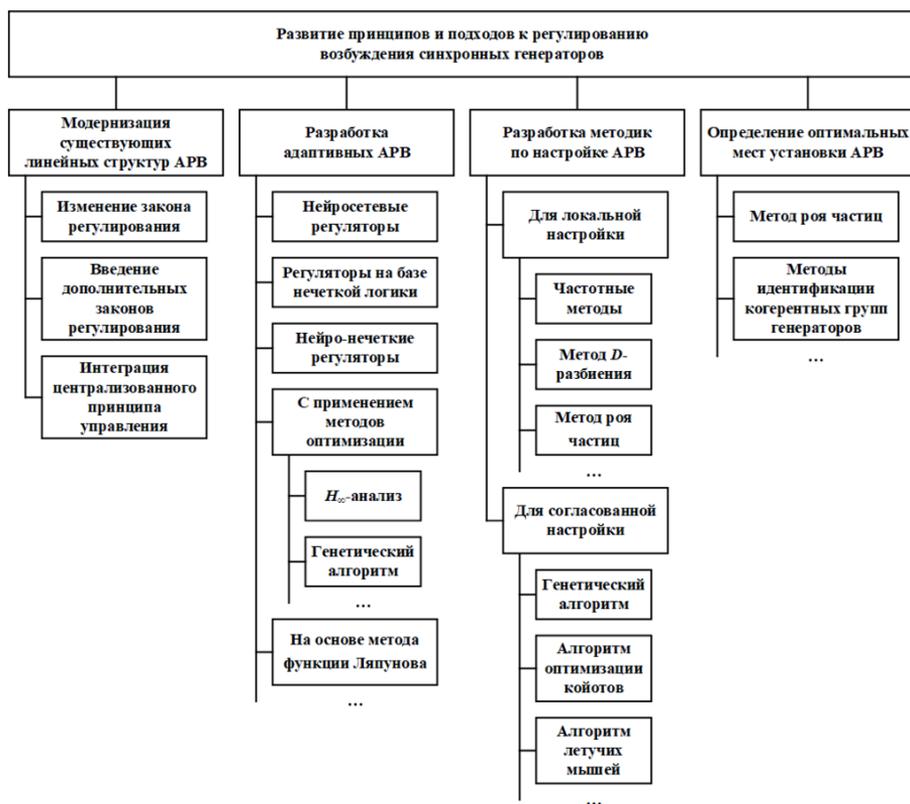


Рис. 1. Основные направления развития в области регулирования возбуждения

### Модернизация автоматических регуляторов возбуждения с сохранением их линейной структуры

В рамках первого из направлений осуществляется модернизация широко используемых на практике структур регуляторов возбуждения с помощью добавления новых каналов и параметров регулирования

или применения дополнительных схемно-алгоритмических решений в их составе. При этом отдельно стоит выделить особенности, встречаемые при анализе направлений в области развития систем регулирования возбуждения: 1) для отечественных работ характерно рассмотрение АРВ сильного действия, имеющего в своем составе каналы стабилизации внутреннего и внешнего движения синхронного генератора, параллельные основному каналу по отклонению напряжения, которые в совокупности образуют единую систему управления; 2) в зарубежных источниках при упоминании САР возбуждения генераторов зачастую подразумевается рассмотрение системного стабилизатора (*Power System Stabilizer – PSS*), который является по своей сути отдельным элементом и соединяется последовательно с автоматическим регулятором напряжения (АРН).

Таким образом, в работе [6] предлагается использовать разность между отклонением частоты вращения вала генератора и частотой напряжения на шинах электростанции вместо частоты напряжения на зажимах генераторов в качестве входного сигнала каналов стабилизации внешнего движения у АРВ. Также в [7] рассматривается возможность учета в структуре АРВ дополнительного канала по взаимным углам между роторами синхронных машин, значения которых вводятся в систему регулирования на основе данных системы мониторинга переходных режимов (СМНР). В работе [8] показана возможность применения дополнительного канала стабилизации угла нагрузки в структуре системы регулирования возбуждения для повышения устойчивости синхронных машин большой мощности. Еще одним способом увеличения уровня стабилизации работы синхронных генераторов является использование частоты центра инерции энергорайона, получаемой по данным СМНР [9]. Кроме того, применение устройств синхронизированных векторных измерений (*Phasor Measurement Unit – PMU*) позволяет на основе структуры классических АРВ сформировать централизованную систему АРВ для демпфирования межсистемных колебаний (рис. 2) [10]. Также интеграция дополнительных каналов, параллельных основным каналам стабилизации, при их определенной конфигурации может способствовать значительному расширению частотного диапазона, в котором каналы стабилизации АРВ способны обеспечивать эффективное демпфирование колебаний [11].

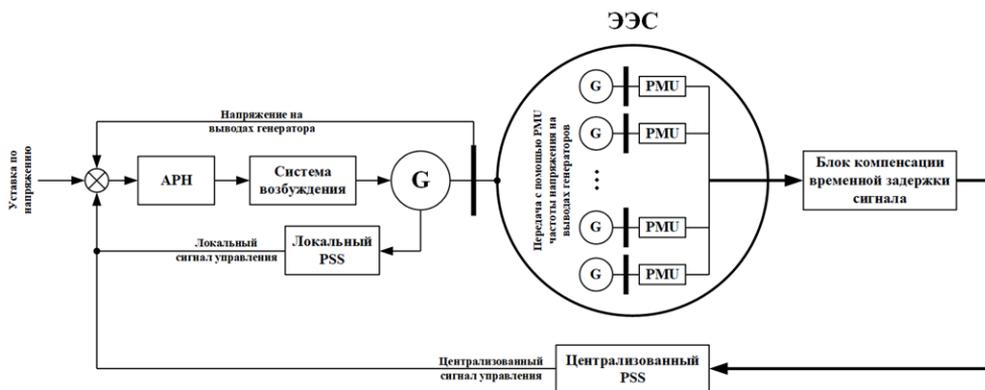


Рис. 2. Структурная схема управления возбуждением с применением синхронизированных векторных измерений

### Разработка адаптивных и робастных автоматических регуляторов возбуждения нелинейной структуры

Второе направление развития систем АРВ заключается в разработке принципиально новых адаптивных и робастных регуляторов возбуждения различной структуры, осуществляющих параметрическую адаптацию АРВ на основе информации о состоянии объекта управления. Подобные устройства могут использовать классическую линейную структуру АРВ, параметры которой автоматически настраиваются в режиме реального времени, как показано на рис. 3, что позволяет обеспечить необходимый уровень качества переходных процессов в зависимости от постоянно изменяющихся схемно-режимных условий работы ЭЭС.

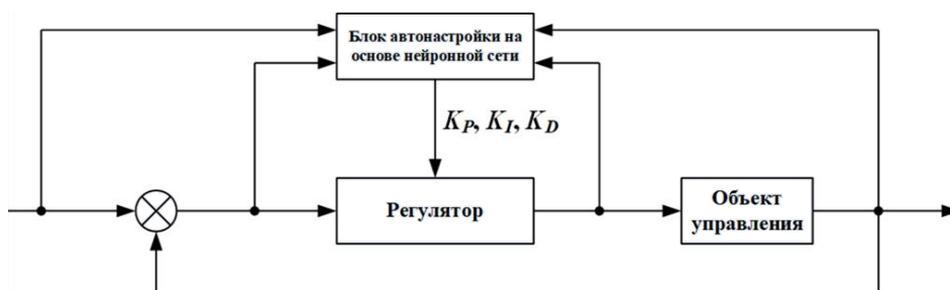


Рис. 3. Структурная схема ПИД-регулятора с блоком автонастройки на основе нейронной сети

В общем случае на основе получаемой информации и заложенных алгоритмов определяются необходимые коэффициенты усиления пропорционального, интегрального и дифференциального каналов ре-

гулятора ( $K_P$ ,  $K_I$  и  $K_D$  соответственно). В противном случае линейная структура АРВ полностью замещается нелинейной, формирующей необходимый уровень сигнала управления. Проводятся исследования по разработке адаптивных АРВ на основе нечеткой логики [12, 13] и нейронных сетей [14, 15], а также их комбинаций [16, 17], которые могут быть представлены в виде обозначенного блока автонастройки или основного контура управления.

В данном направлении получают широкое распространение работы, связанные с разработкой централизованных систем управления возбуждением, которые позволяют осуществлять эффективное демпфирование межсистемных низкочастотных колебаний, повысить статическую и динамическую устойчивость ЭЭС в целом [18, 19]. Также при проектировании нелинейных робастных структур регуляторов возбуждения находят применение  $H_\infty$ -анализ [20, 21], метод функций Ляпунова [22], теорема Харитоновна [23], теория непрерывного вейвлет-преобразования [24] и др. Подобные методы и способы позволяют обеспечить приемлемое качество переходных процессов, необходимую точность и грубость (робастность) к неопределенности в объекте управления. При этом в ряде работ отмечается, что с помощью классических АРВ в принципе невозможно осуществлять эффективное управление нормальными и переходными режимами в широком многообразии схемно-режимных условий работы ЭЭС. В связи с этим предлагается их полная замена разрабатываемыми адаптивными устройствами АРВ, обладающими свойствами «идеальной» системы регулирования [25, 26].

### **Адаптация существующих и разработка новых методик по настройке автоматических регуляторов возбуждения**

В рамках третьего направления формируются новые подходы и соответствующие методики по настройке систем АРВ с учетом как классических структур регуляторов, так и новых, представленных выше. При этом могут быть выделены несколько ключевых подходов к решению вопроса нахождения наиболее оптимальной настройки АРВ, соответствующей изменяющимся условиям функционирования ЭЭС, особенно при внедрении объектов РГ, в том числе на базе ВИЭ, и устройств FACTS. Первый из них заключается в разработке принципиально новых методик по настройке устройств АРВ одного генератора или их группы

в рамках одной электростанции. В работах [27, 28] предлагается методика настройки регуляторов возбуждения с применением частотных методов анализа для генераторов, работающих в ЭЭС сложной структуры. Также в [29, 30] рассматривается возможность модификации классического метода  $D$ -разбиения для нахождения настроек устройств регулирования возбуждения различной структуры. Кроме того, при определении параметров настройки АРВ широкое распространение получают методы параметрической оптимизации, основанные на различных естественных и биологических процессах, в частности, метод оптимизации на основе алгоритма оптимизации китов [31], метод роя частиц (рис. 4) [32], метод многокритериальной оптимизации [33, 34] и др.

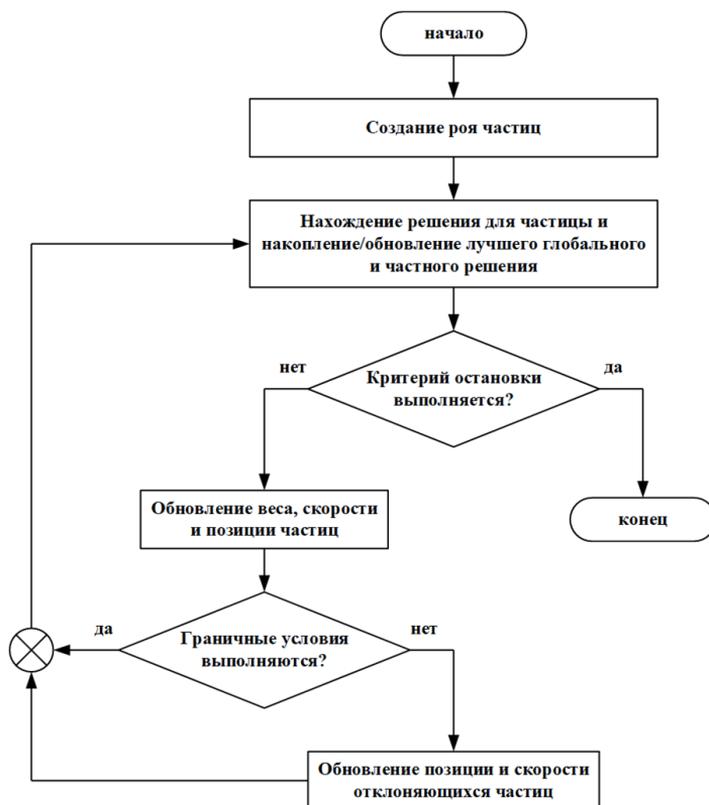


Рис. 4. Блок-схема метода оптимизации роем частиц

Второй подход включает в себя исследования, направленные на координацию настроек устройств АРВ между собой, другими системами регулирования синхронных генераторов или САУ объектов

ВИЭ и устройств FACTS с целью повышения управляемости нормальными и переходными режимами ЭЭС. В работах [35, 36] предлагаются методы согласованной настройки регуляторов возбуждения и частоты вращения генераторов для решения актуальных задач, возникающих в условиях формирования и развития крупномасштабных энергообъединений. В первой из них используется аппарат нечеткой логики, во второй – нахождение минимума целевой функции. При координации настройки APB с управляемыми устройствами продольной компенсации для обеспечения колебательной устойчивости ЭЭС, что становится особенно актуальным в связи с возрастающей вероятностью возникновения явления субсинхронного резонанса в электрических сетях с подобным типом устройств FACTS [37], также находит применение метод *D*-разбиения [38]. В работе [39] используется генетический алгоритм, с помощью которого настраиваются основные каналы по отклонению напряжения и каналы стабилизации APB, а также САУ статического тиристорного компенсатора реактивной мощности. Также в подобных работах зачастую используются аналогичные методы параметрической оптимизации, в частности, метаэвристический алгоритм оптимизации койотов [40], алгоритм летучих мышей [41] и др.

### **Разработка методик по нахождению оптимальных мест установки автоматических регуляторов возбуждения**

В качестве отдельного направления также выделены исследования, связанные с нахождением оптимального места установки устройств APB и их настройки для повышения уровня демпфирования широкого спектра колебаний в ЭЭС, например, с применением метода роя частиц [42] или с помощью идентификации когерентных групп генераторов в совокупности с методом оптимизации средней дисперсии [43]. Кроме того, подобные исследования могут заключаться в выборе оптимального типа регулятора [44], что, в частности, относится к каналам стабилизации или системному стабилизатору APB, в нахождении оптимальных мест установки устройств FACTS различного типа, состава и мощности с учетом наличия в ЭЭС традиционных источников генерации с APB [45, 46], а также рассматривать при этом возможность установки не только синхронных генераторов, но и синхронных компенсаторов с APB [47].

## **Оценка возможности развития систем регулирования возбуждения в рамках представленных направлений**

Весомым достоинством развития систем АРВ в рамках первого направления является сохранение классической линейной структуры регуляторов, которая широко используется в мировой практике и апробирована десятилетиями их успешной эксплуатации. Изменение закона регулирования путем добавления новых сигналов и каналов не является столь радикальным мероприятием по сравнению с замещением на нелинейные адаптивные и робастные устройства АРВ. Также зачастую предлагаемые в данном направлении решения являются реализуемыми на практике, в частности, в связи с непрерывным развитием систем мониторинга и измерения параметров электрического режима [48], что позволяет оперативно получать точную и достоверную информацию, необходимую для реализации новых функций или алгоритмов в структуре систем АРВ. Разработка адаптивных устройств АРВ позволяет осуществлять, как уже отмечалось ранее, эффективное управление режимами в широком многообразии схемно-режимных условий функционирования ЭЭС, учитывая изменения их структуры и свойств при внедрении объектов РГ, ВИЭ и устройств FACTS. Данная возможность является неоспоримым преимуществом подобных систем регулирования возбуждения в сравнении с АРВ классической структуры. Адаптивные и робастные АРВ могут быть разработаны для учета разных типов генераторов или даже групп генераторов и их совместного управления, способны учитывать особенности функционирования ЭЭС, их динамические характеристики, выражающиеся в скорости протекания процессов, спектре возникающих колебаний и диапазоне изменения параметров электрического режима. Однако масштабное применение подобного рода устройств АРВ с целью повышения эффективности решения проблем режимного управления в современных ЭЭС и их устойчивости является маловероятным, как минимум, в среднесрочной перспективе, так как практическая реализация данных устройств заметно усложняет сам регулятор, что приводит к снижению его надежности, и в настоящее время отсутствуют какая-либо общая структуризация и методика их формирования и настройки [49, 50]. Кроме того, среди причин отсутствия практического внедрения подобного типа АРВ находятся сложность и нелинейность алгоритмов их работы, которые оказывают влияние на неопределенность

их функционирования. Объект управления, в качестве которого выступает синхронный генератор, по своей сути достаточно сложен, а применение сложных алгоритмов адаптации с большим количеством предположений относительно его режимов работы и многообразных схемно-режимных состояний ЭЭС является затруднительным. Также одной из проблем адаптивных регуляторов является невозможность гарантирования их эффективной работоспособности в системах и условиях, отличных от тех, в которых они были разработаны и настроены для конкретного объекта. Кроме того, есть проблема существования и достижимости как оптимальных нелинейных законов управления, так и решения задачи адаптивного управления с нелинейной параметризацией, в особенности достижения стабилизации и гарантированного качества регулирования процессов. При этом стоит отметить, что введение новых каналов или сигналов регулирования, т.е. создание нового типа АРВ классической линейной структуры, также затруднительно, поскольку требует достаточного обоснования, экспериментальной проверки и комплексного сравнения с существующими устройствами АРВ [51, 52].

Основным достоинством разработки новых подходов и методик по настройке систем регулирования возбуждения является их универсальность при рассмотрении АРВ разной структуры с учетом места их установки или структуры и топологии ЭЭС в целом. При этом становится возможным учесть множество факторов при настройке устройств АРВ, в том числе значительное количество рассматриваемых схемно-режимных состояний ЭЭС, взаимовлияние других объектов в ЭЭС, необходимые показатели качества регулирования и т.д., а также адаптировать данные методики под решение конкретных задач и соблюдение нормированных показателей, отраженных в сетевых кодексах и стандартах, например, необходимость демпфирования электро-механических колебаний за время, не превосходящее 15 секунд [53]. Однако применение различных методов оптимизации неизбежно связано с определенными трудностями, в частности, с выбором весовых коэффициентов при использовании различных показателей качества с целью формирования единого критерия оптимальности; зависимостью надежности методов от условий поиска, т.е. в случаях, когда рассматривается значительное количество схемно-режимных условий, вычислительный процесс может расходиться, вследствие чего необходимые

параметры настройки не будут определены; описанием необходимой целевой функции, слабая проработанность которого приводит к ухудшению результатов оптимизации и проявляется на этапе экспериментальной проверки найденных решений, и др. В то же время в каждой из представленных выше работ показывается преимущество предлагаемой методики настройки над другими, в связи с чем невозможно оценить, который из вариантов является наиболее эффективным и относительно легко реализуемым на практике. Таким образом, вопрос нахождения наиболее оптимальной настройки АРВ определенной структуры в условиях работы в конкретной ЭЭС с учетом возможных схемно-режимных состояний и возмущений остается крайне актуальным.

### **Заключение**

Изменяющиеся свойства и характеристики ЭЭС современной структуры становятся одной из основных причин, способствующих развитию различных областей электроэнергетики, среди которых отдельно можно выделить подходы к автоматическому регулированию возбуждения синхронных генераторов электростанций. В настоящий момент существует несколько направлений в рамках развития подобных систем, связанных с модернизацией АРВ классической линейной структуры, разработкой адаптивных АРВ, формированием новых методик по их настройке и нахождением оптимальных мест установки АРВ совместно с синхронными генераторами или компенсаторами. В статье приведена информация о решениях, используемых в рамках представленных направлений, а также сделаны некоторые выводы о достоинствах и недостатках каждого из них.

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

### **Библиографический список**

1. Анализ влияния возобновляемых источников энергии с силовыми преобразователями на процессы в современных энергосистемах / Н.Ю. Рубан, А.Б. Аскарлов, 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

2. Илюшин П.В., Симонов А.В. О функционировании распределенных источников энергии с силовыми преобразователями в составе энергосистем и изолированных энергорайонов // Релейная защита и автоматизация. – 2020. – № 2 (39). – С. 30–38.

3. Координация работы противоаварийной автоматики и системы мониторинга запасов устойчивости / М.Н. Говорун, К.С. Горячевский, А.Ф. Михайленко, Е.И. Сацук, И.В. Синянский // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2020. – № 2 (83). – С. 22–33.

4. Анализ проблем энергосистемы с высокой долей солнечной генерации / С.А. Ситников, Н.М. Шайтор, А.В. Горпинченко, Е.А. Дубков // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2021. – Т. 24, № 1. – С. 87–95. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-87-95

5. Busarello L., Musca R. Impact of the High Share of Converter-Interfaced Generation on Electromechanical Oscillations in Continental Europe Power System // IET Renewable Power Generation. – 2020. – Vol. 14, no. 19. – P. 3918–3926. DOI: 10.1049/iet-rpg.2020.0489

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

7. Недоливко А.В., Беляев А.Н. Повышение динамической устойчивости транзитных электропередач переменного тока на основе применения данных мониторинга переходных режимов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербург. гос. политехн. ун-та. – 2016. – № 4 (254). – С. 106–115.

8. Крюков О.В., Гуляев И.В., Теплухов Д.Ю. Способ стабилизации работы синхронных машин с использованием виртуального датчика нагрузки // Электротехника. – 2019. – № 7. – С. 2–7.

9. Elliott R.T., Arabshahi P., Kirschen D.S. A Generalized PSS Architecture for Balancing Transient and Small-Signal Response // IEEE Transactions on Power Systems. – 2020. – Vol. 35, no. 2. – P. 1446–1456. DOI: 10.1109/TPWRS.2019.2938205

10. Prakash T., Singh V.P., Mohanty S.R. A synchrophasor measurement based wide-area power system stabilizer design for inter-area oscillation damping considering variable time-delays // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2019. – Vol. 105. – P. 131–141. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.08.014

11. Liu Z., Yao W., Wen J. Enhancement of power system stability using a novel power system stabilizer with large critical gain // *Energies*. – 2017. – Vol. 10, iss. 4. DOI: 10.3390/en10040449

12. Shokouhandeh H., Jazaeri M. Robust design of fuzzy-based power system stabiliser considering uncertainties of loading conditions and transmission line parameters // *IET Generation, Transmission & Distribution*. – 2019. – Vol. 13, no. 19. – P. 4287–4300. DOI: 10.1049/iet-gtd.2018.6194

13. Седойкин Д.Н., Юрганов А.А. Адаптивный автоматический регулятор возбуждения на основе нечеткого аппроксиматора в режиме недовозбуждения синхронной машины // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 22–29. DOI: 10.18721/JEST.240202

14. Беляев А.Н., Переслыцких О.О., Полушкин В.С. Синтез централизованного адаптивного регулятора возбуждения на основе нейронных сетей методом обучения с подкреплением // *Известия НТЦ Единой энергетической системы*. – 2020. – № 2 (83). – С. 42–53.

15. PSS design for damping low-frequency oscillations in a multi-machine power system with penetration of renewable power generations / O. Kahouli, M. Jebali, B. Alshammari, H.H. Abdallah // *IET Renewable Power Generation*. – 2019. – Vol. 13, no. 1. – P. 116–127. DOI: 10.1049/iet-rpg.2018.5204

16. Хижняков Ю.Н., Южаков А.А. Нейро-нечеткий регулятор напряжения объекта управления // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. – 2011. – Т. 54, № 12. – С. 51–56.

17. Coordination of adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) and type-2 fuzzy logic system-power system stabilizer (T2FLS-PSS) to improve a large-scale power system stability / A.B. Muljono, I.M. Ginarsa, I.M.A. Nnarthana, A. Dharma // *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. – 2018. – Vol. 8, no. 1. – P. 76–86. DOI: 10.11591/ijece.v8i1.pp76-86

18. Sreedivya K.M., Aruna Jeyanthi P., Devaraj D. Improved Design of Interval Type-2 Fuzzy based Wide Area Power System Stabilizer for Inter-area Oscillation Damping // *Microprocessors and Microsystems*. – 2021. – Vol. 83. – P. 103957. DOI: 10.1016/j.micpro.2021.103957

19. A Computationally Efficient Method to Design Probabilistically Robust Wide-Area PSSs for Damping Inter-Area Oscillations in Wind-

Integrated Power Systems / J. Zhou, D. Ke, C.Y. Chung, Y. Sun // IEEE Transactions on Power Systems. – 2018. – Vol. 33, no. 5. – P. 5692–5703. DOI: 10.1109/TPWRS.2018.2815534

20. Тащилин В.А. Анализ и выбор параметров стабилизации устройств регулирования возбуждения с использованием методов идентификации: дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2018. – 139 с.

21. A nonlinear H-infinity control approach to stabilization of distributed synchronous generators / G. Rigatos, P. Siano, A. Melkikh, N. Zervos // IEEE Systems Journal. – 2018. – Vol. 12, no. 3. – P. 2625–2663. DOI: 10.1109/JSYST.2017.2688422

22. Kumar A. Nonlinear AVR for power system stabilisers robust phase compensation design // IET Generation, Transmission and Distribution. – 2020. – Vol. 14, no. 21. – P. 4927–4935. DOI: 10.1049/iet-gtd.2020.0092

23. Ayman M., Soliman M. Robust multi-objective PSSs design via complex Kharitonov's theorem // European Journal of Control. – 2021. – Vol. 58. – P. 131–142. DOI: 10.1016/j.ejcon.2020.07.008

24. Faraji A., Hesami Naghshbandy A. A combined approach for power system stabilizer design using continuous wavelet transform and SQP algorithm // International Transactions on Electrical Energy Systems. – 2019. – Vol. 29, no. 3. – P. e2768. DOI: 10.1002/etep.2768

25. Application of neuro-fuzzy controller to replace smib and interconnected multi-machine power system stabilizers / A Sabo., N.I.A. Wahab, M.L. Othman, M.Z.A.M. Jaffar, H. Acikgoz, H. Beiranvand // Sustainability (Switzerland). – 2020. – Vol. 12, no. 22. – P. 1–42. DOI: 10.3390/su12229591

26. Deep Reinforcement Learning-Based Approach for Proportional Resonance Power System Stabilizer to Prevent Ultra-Low-Frequency Oscillations / G. Zhang, W. Hu, D. Cao, Q. Huang, J. Yi, Z. Chen, F. Blaabjerg // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2020. – Vol. 11, no. 6. – P. 5260–5272. DOI: 10.1109/TSG.2020.2997790

27. 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.

28. Филимонов Н.Ю., Юрганов А.А. Метод выбора параметров и настройки каналов автоматических регуляторов возбуждения // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2019. – № 2 (81). – С. 43–52.

29. Использование метода D-разбиения для анализа настроек АРВ в режиме реального времени / Р.Р. Идрисов, В.А. Тащилин, П.В. Чусовитин, А.В. Паздерин // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VII Междунар. молодеж. науч.-техн. конф. (19–23 сентября 2016 г.). – Казань: Изд-во Казан. гос. энергетич. ун-та, 2016. – Т. 3. – С. 212–215.

30. Ayman M., Soliman M. Decentralised design of robust multi-objective PSSs: D-decomposition approach // IET Generation, Transmission and Distribution. – 2020. – Vol. 14, no. 23. – P. 5392–5406. DOI: 10.1049/iet-gtd.2019.1415

31. Butti D., Mangipudi S.K., Rayapudi S. Model Order Reduction Based Power System Stabilizer Design Using Improved Whale Optimization Algorithm // IETE Journal of Research. – 2021. DOI: 10.1080/03772063.2021.1886875

32. Implementation of particle swarm optimization (PSO) algorithm for tuning of power system stabilizers in multimachine electric power systems / H. Verdejo, V. Pino, W. Kliemann, C. Becker, J. Delpiano // Energies. – 2020. – Vol. 13, no. 8. – P. 2093. DOI: 10.3390/en13082093

33. Чехонадских А.В. Область стабилизации нелинейной модели синхронного генератора с ПИДЦ2-регулятором возбуждения // Доклады Академии наук высшей школы РФ. – 2020. – № 4 (49). – С. 51–61. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-51-61

34. Mohandes B., Abdelmagid Y.L., Boiko I. Development of PSS tuning rules using multi-objective optimization // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2018. – Vol. 100. – P. 449–462. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.01.041

35. Приходько М.А., Булатов Ю.Н., Игнатьев И.В. Адаптивный блок согласованной настройки автоматических регуляторов возбуждения и частоты вращения генераторов электростанций // Труды Братск. гос. ун-та. Сер. Естественные и инженерные науки. – 2015. – Т. 1. – С. 71–75.

36. Marinescu B., Petesch D. Three-level coordination in power system stabilization // Electric Power Systems Research. – 2014. – Vol. 111. – P. 40–51. DOI: 10.1016/j.epsr.2014.01.019

37. Definition and Classification of Power System Stability Revisited and Extended / N. Hatziaargyriou, J.V. Milanovic, C. Rahmann, V. Ajjarapu, C. Canizares, I. Erlich, D. Hill, I. Hiskens, I. Kamwa, B. Pal, P. Pourbeik, J.J. Sanchez-Gasca // IEEE Transactions on Power Systems. – 2020. – Vol. 36, iss. 4. – P. 3271–3281. DOI: 10.1109/TPWRS.2020.3041774

38. Выбор коэффициентов регулирования автоматического регулятора возбуждения для сохранения колебательной устойчивости электроэнергетической системы с управляемой линией электропередачи / В.П. Голов, Н.А. Градов, Д.Н. Кормилицын, Е.С. Скоропеева, Ю.О. Чуркина // Вестник Иванов. гос. энергетич. ун-та. – 2017. – № 5. – С. 27–36. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.5.027-036

39. Kang R.D., Martinez E.A., Viveros E.C. Coordinated tuning of power system controllers using parallel genetic algorithms // Electric Power Systems Research. – 2021. – Vol. 190. – P. 106628. DOI: 10.1016/j.epsr.2020.106628

40. New coordinated tuning of svc and psss in multimachine power system using coyote optimization algorithm / T. Guesmi, B.M. Alshammari, Y. Almalaq, A. Alateeq, K. Alqunun // Sustainability (Switzerland). – 2021. – Vol. 13, no. 6. – P. 3131. DOI: 10.3390/su13063131

41. Baadji B., Bentarzi H., Bakdi A. Comprehensive learning bat algorithm for optimal coordinated tuning of power system stabilizers and static VAR compensator in power systems // Engineering Optimization. – 2020. – Vol. 52, no. 10. – P. 1761–1779. DOI: 10.1080/0305215X.2019.1677635

42. Sharma A., Kumar R. Optimum location of PSS and its parameters by using particle swarm optimization // International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 10, no. 2. – P. 571–584. DOI: 10.34218/IJARET.10.2.2019.054

43. Optimal Placement and Tuning Approach for Design of Power System Stabilizers and Wide Area Damping Controllers Considering Transport Delay / Y. Matsukawa, M. Watanabe, H. Takahashi, Y. Mitani // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51, no. 32. – P. 534–539. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.477

44. Didier G., Leveque J. Study of optimal combination between SFCL location and PSS type to improve power system transient stability // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2016. – Vol. 77. – P. 158–165. DOI: 10.1016/j.ijepes.2015.11.007

45. Мартиросян А.А., Зотова М.В., Кормилицын Д.Н. Выбор места установки и законов регулирования устройств продольной емкостной компенсации для повышения устойчивости электроэнергетической системы // Вестник Иванов. гос. энергетич. ун-та. – 2017. – № 4. – С. 30–36. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.4.030-036

46. Determination of optimal location of facts device to improve integration rate of wind energy in presence of mbpss regulator / B. Dhouib, Z. Alaas, O. Kahouli, H.H. Abdallah // IET Renewable Power Generation. – 2020. – Vol. 14, no. 17. – P. 3526–3540. DOI: 10.1049/iet-rpg.2020.0679

47. Hadavi S., Mansour M.Z., Bahrani B. Optimal Allocation and Sizing of Synchronous Condensers in Weak Grids with Increased Penetration of Wind and Solar Farms // IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems. – 2021. – Vol. 11, no. 1. – P. 199–209. DOI: 10.1109/JETCAS.2021.3053554

48. Определение мгновенных параметров электрического режима с повышенной частотой дискретизации / А.С. Бердин, А.А. Дмитриева, П.Ю. Коваленко, М.Д. Сенюк // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2020. – № 1 (82). – С. 137–146.

49. Artificial Intelligent Based Damping Controller Optimization for the Multi-Machine Power System: A Review / M.A. Hannan, N.N. Islam, A. Mohamed, M.S.H. Lipu, P.J. Ker, M.M. Rashid, H. Shareef // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 39574–39594. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2855681

50. Бурмистров А.А., Хлямов В.А., Поляхов Н.Д. Сравнительный анализ системных стабилизаторов // Управление режимами Единой энергосистемы России: сб. докл. Открытой всерос. НТК / под ред. В.И. Решетова. – М.: Изд-во, НЦ ЭНАС, 2002. – С. 194–201.

51. Юрганов А.А. Некоторые соображения о статье Ф.Л. Когана «Особенности сильного регулирования возбуждения синхронных генераторов в сложной энергосистеме» // Электрические станции. – 2019. – № 7 (1056). – С. 36–37.

52. Климова Т.Г., Николаева О.О. Исследование автоматических регуляторов возбуждения синхронного генератора с различными сигналами каналов стабилизации по частоте // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2021. – № 2 (65). – С. 110–115.

53. СТО 59012820.29.160.20.004-2019. Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов / АО «СО ЕЭС». – М., 2019. – 27 с.

## References

1. 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 [Analy-

sis 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

2. Iliushin P.V., Simonov A.V. O funktsionirovanii raspredelennykh istochnikov energii s silovymi preobrazovateliami v sostave energosistem i izolirovannykh energoraionov [Functioning of power converter-equipped distributed energy sources in power systems and islanded area]. *Releinaia zashchita i avtomatizatsiia*, 2020, no. 2 (39), pp. 30-38.

3. Govorun M.N., Goriachevskii K.S., Mikhailenko A.F., Satsuk E.I., Sinianskii I.V. Koordinatsiia raboty protivoovariinoi avtomatiki i sistemy monitoringa zapasov ustoiichivosti [Coordination of the emergency control with the stability control system]. *Izvestiia NTTs Edinoi energeticheskoi sistemy*, 2020, no. 2 (83), pp. 22-33.

4. Sitnikov S.A., Shaitor N.M., Gorpichenko A.V., Dubkov E.A. Analiz problem energosistemy s vysokoi dolei solnechnoi generatsii [Analysis of problems of the power system with a high proportion of solar generation]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni M.T. Kalashnikova*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 87-95. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-87-95

5. Busarello L., Musca R. Impact of the High Share of Converter-Interfaced Generation on Electromechanical Oscillations in Continental Europe Power System. *IET Renewable Power Generation*, 2020, vol. 14, no. 19, pp. 3918-3926. DOI: 10.1049/iet-rpg.2020.0489

6. Kogan F.L. Osobennosti sil'nogo regulirovaniia vozbuzhdeniia 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.

7. Nedolivko A.V., Beliaev A.N. Povyshenie dinamicheskoi ustoiichivosti tranzitnykh elektroperedach peremennogo toka na osnove primeneniia dannykh monitoringa perekhodnykh rezhimov [Improving the inertia transient stability based on wide area measurement system data]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 4 (254), pp. 106-115.

8. Kriukov O.V., Guliaev I.V., Teplukhov D.Iu. Sposob stabilizatsii raboty sinkhronnykh mashin s ispol'zovaniem virtual'nogo datchika

nagruzki [Method for stabilizing the operation of synchronous machines using a virtual load sensor]. *Elektrotehnika*, 2019, no. 7, pp. 2-7.

9. Elliott R.T., Arabshahi P., Kirschen D.S. A Generalized PSS Architecture for Balancing Transient and Small-Signal Response. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, vol. 35, no. 2, pp. 1446-1456. DOI: 10.1109/TPWRS.2019.2938205

10. Prakash T., Singh V.P., Mohanty S.R. A synchrophasor measurement based wide-area power system stabilizer design for inter-area oscillation damping considering variable time-delays. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2019, vol. 105, pp. 131-141. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.08.014

11. Liu Z., Yao W., Wen J. Enhancement of power system stability using a novel power system stabilizer with large critical gain. *Energies*, 2017, vol. 10, iss. 4. DOI: 10.3390/en10040449

12. Shokouhandeh H., Jazaeri M. Robust design of fuzzy-based power system stabiliser considering uncertainties of loading conditions and transmission line parameters. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2019, vol. 13, no. 19, pp. 4287-4300. DOI: 10.1049/iet-gtd.2018.6194

13. Sedoikin D.N., Iurganov A.A. Adaptivnyi avtomaticheskii regulator vozbuzhdeniia na osnove nechetkogo approksimatora v rezhime nedovozbuzhdeniia sinkhronnoi mashiny [An adaptive automatic excitation regulator based on fuzzy approximation operating with an under-excited generator]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo politehnicheskogo universiteta Petra Velikogo. Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 22-29. DOI: 10.18721/JEST.240202

14. Beliaev A.N., Pereslytskikh O.O., Polushkin V.S. Sintez tsentralizovannogo adaptivnogo reguliatora vozbuzhdeniia na osnove neuronnykh setei metodom obucheniia s podkrepleniem [Synthesis of a centralized adaptive power system stabilizer based on neural networks by reinforcement learning]. *Izvestiia NTTs Edinoi energeticheskoi sistemy*, 2020, no. 2 (83), pp. 42-53.

15. Kahouli O., Jebali M., Alshammari B., Abdallah H.H. PSS design for damping low-frequency oscillations in a multi-machine power system with penetration of renewable power generations. *IET Renewable Power Generation*, 2019, vol. 13, no. 1, pp. 116-127. DOI: 10.1049/iet-rpg.2018.5204

16. Khizhniakov Iu.N., Iuzhakov A.A. Neuro-nechetkii regulator napriazheniia ob"ekta upravleniia [Neuro-fuzzy voltage controller for the

object of management]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*, 2011, vol. 54, no. 12, pp. 51-56.

17. Muljono A.B., Ginarsa I.M., Nrartha I.M.A., Dharma A. Coordination of adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) and type-2 fuzzy logic system-power system stabilizer (T2FLS-PSS) to improve a large-scale power system stability. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 76-86. DOI: 10.11591/ijece.v8i1.pp76-86

18. Sreedivya K.M., Aruna Jeyanthi P., Devaraj D. Improved Design of Interval Type-2 Fuzzy based Wide Area Power System Stabilizer for Inter-area Oscillation Damping. *Microprocessors and Microsystems*, 2021, vol. 83, 103957 p. DOI: 10.1016/j.micpro.2021.103957

19. Zhou J., Ke D., Chung C.Y., Sun Y. A Computationally Efficient Method to Design Probabilistically Robust Wide-Area PSSs for Damping Inter-Area Oscillations in Wind-Integrated Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, vol. 33, no. 5, pp. 5692-5703. DOI: 10.1109/TPWRS.2018.2815534

20. Tashchilin V.A. Analiz i vybor parametrov stabilizatsii ustroystv regulirovaniia vozbuzhdeniia s ispol'zovaniem metodov identifikatsii [Analysis and selection of stabilization parameters of excitation control devices using identification methods]. Ph. D. thesis. Ekaterinburg, 2018, 139 p.

21. Rigatos G., Siano P., Melkikh A., Zervos N. A nonlinear H-infinity control approach to stabilization of distributed synchronous generators. *IEEE Systems Journal*, 2018, vol. 12, no. 3, pp. 2625-2663. DOI: 10.1109/JSYST.2017.2688422

22. Kumar A. Nonlinear AVR for power system stabilisers robust phase compensation design. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2020, vol. 14, no. 21, pp. 4927-4935. DOI: 10.1049/iet-gtd.2020.0092

23. Ayman M., Soliman M. Robust multi-objective PSSs design via complex Kharitonov's theorem. *European Journal of Control*, 2021, vol. 58, pp. 131-142. DOI: 10.1016/j.ejcon.2020.07.008

24. Faraji A., Hesami Naghshbandy A. A combined approach for power system stabilizer design using continuous wavelet transform and SQP algorithm. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2019, vol. 29, no. 3, e2768 p. DOI: 10.1002/etep.2768

25. Sabo A., Wahab N.I.A., Othman M.L., Jaffar M.Z.A.M., Acikgoz H., Beiranvand H. Application of neuro-fuzzy controller to replace smib and interconnected multi-machine power system stabilizers. *Sustainability (Switzerland)*, 2020, vol. 12, no. 22, pp. 1-42. DOI: 10.3390/su12229591

26. Zhang G., Hu W., Cao D., Huang Q., Yi J., Chen Z., Blaabjerg F. Deep Reinforcement Learning-Based Approach for Proportional Resonance Power System Stabilizer to Prevent Ultra-Low-Frequency Oscillations. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, vol. 11, no. 6, pp. 5260-5272. DOI: 10.1109/TSG.2020.2997790

27. Gurikov O.V., Zelenin A.S., Kabanov D.A. Razrabotka metodiki nastroyki 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.

28. Filimonov N.Iu., Iurganov A.A. Metod vybora parametrov i nastroyki kanalov avtomaticheskikh reguliatorov vozbuzhdeniia [The choice of time constants of stabilization channels in the structure of the automatic excitation regulator]. *Izvestiia NTTs Edinoi energeticheskoi sistemy*, 2019, no. 2 (81), pp. 43-52.

29. Idrisov R.R., Tashchilin V.A., Chusovitin P.V., Pazderin A.V. Ispol'zovanie metoda D-razbieniia dlia analiza nastroek ARV v rezhime real'nogo vremeni [Application of D-decomposition in real-time for AVR settings analysis]. *Elektroenergetika glazami molodezhi: materialy VII Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (19-23 September 2016)*. Kazan': Kazanskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet, 2016, vol. 3, pp. 212-215.

30. Ayman M., Soliman M. Decentralised design of robust multi-objective PSSs: D-decomposition approach. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2020, vol. 14, no. 23, pp. 5392-5406. DOI: 10.1049/iet-gtd.2019.1415

31. Butti D., Mangipudi S.K., Rayapudi S. Model Order Reduction Based Power System Stabilizer Design Using Improved Whale Optimization Algorithm. *IETE Journal of Research*, 2021. DOI: 10.1080/03772063.2021.1886875

32. Verdejo H., Pino V., Kliemann W., Becker C., Delpiano J. Implementation of particle swarm optimization (PSO) algorithm for tuning of power system stabilizers in multimachine electric power systems. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 8, 2093 p. DOI: 10.3390/en13082093

33. Chekhonadskikh A.V. Oblast' stabilizatsii nelineinoy modeli sinkhronnogo generatora s PID2-reguliatorom vozbuzhdeniia [Stability area of a synchronous generator nonlinear model with multiparametric excitation controller]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly RF*, 2020, no. 4(49), pp. 51-61. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-51-61

34. Mohandes B., Abdelmagid Y.L., Boiko I. Development of PSS tuning rules using multi-objective optimization. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2018, vol. 100, pp. 449-462. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.01.041

35. Prikhod'ko M.A., Bulatov Iu.N., Ignat'ev I.V. Adaptivnyi blok soglasovannoi nastroiiki avtomaticheskikh regulatorov vzbuzhdeniia i chastoty vrashcheniia generatorov elektrostantsii [Adaptive block for coordinated tuning of automatic controllers of excitation and rotational speed of generators of power plants]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2015, vol. 1, pp. 71-75.

36. Marinescu B., Petesch D. Three-level coordination in power system stabilization. *Electric Power Systems Research*, 2014, vol. 111, pp. 40-51. DOI: 10.1016/j.eprsr.2014.01.019

37. Hatziaargyriou N., Milanovic J.V., Rahmann C., Ajarapu V., Canizares C., Erlich I., Hill D., Hiskens I., Kamwa I., Pal B., Pourbeik P., Sanchez-Gasca J.J. Definition and Classification of Power System Stability Revisited and Extended. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, vol. 36, iss. 4, pp. 3271-3281. DOI: 10.1109/TPWRS.2020.3041774

38. Golov V.P., Gradov N.A., Kormilitsyn D.N., Skoropeeva E.S., Churkina Iu.O. Vybor koeffitsientov regulirovaniia avtomaticheskogo regulatora vzbuzhdeniia dlia sokhraneniia kolebatel'noi ustoiichivosti elektroenergeticheskoi sistemy s upravliaemoi liniei elektropredachi [Selecting of automatic excitation control regulation factors for maintaining oscillatory stability of a power engineering system with a controlled power transmission line]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2017, no. 5, pp. 27-36. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.5.027-036

39. Kang R.D., Martinez E.A., Viveros E.C. Coordinated tuning of power system controllers using parallel genetic algorithms. *Electric Power Systems Research*, 2021, vol. 190, 106628 p. DOI: 10.1016/j.eprsr.2020.106628

40. Guesmi T., Alshammari B.M., Almalaq Y., Alateeq A., Alqunun K. New coordinated tuning of svc and pss in multimachine power system using coyote optimization algorithm. *Sustainability (Switzerland)*, 2021, vol. 13, no. 6, 3131 p. DOI: 10.3390/su13063131

41. Baadji B., Bentarzi H., Bakdi A. Comprehensive learning bat algorithm for optimal coordinated tuning of power system stabilizers and static VAR compensator in power systems. *Engineering Optimization*, 2020, vol. 52, no. 10, pp. 1761-1779. DOI: 10.1080/0305215X.2019.1677635

42. Sharma A., Kumar R. Optimum location of PSS and its parameters by using particle swarm optimization. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 571-584. DOI: 10.34218/IJARET.10.2.2019.054

43. Matsukawa Y., Watanabe M., Takahashi H., Mitani Y. Optimal Placement and Tuning Approach for Design of Power System Stabilizers and Wide Area Damping Controllers Considering Transport Delay. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 32, pp. 534-539. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.477

44. Didier G., Leveque J. Study of optimal combination between SFCL location and PSS type to improve power system transient stability. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2016, vol. 77, pp. 158-165. DOI: 10.1016/j.ijepes.2015.11.007

45. Martirosian A.A., Zotova M.V., Kormilitsyn D.N. Vybor mesta ustanovki i zakonov regulirovaniia ustroystv prodol'noi emkostnoi kompensatsii dlia povysheniia ustoichivosti elektroenergeticheskoi sistemy [Selection of installation sites and law of control for controlled series compensation devices in order to improve electric power system stability]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2017, no. 4, pp. 30-36. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.4.030-036

46. Dhouib B., Alaas Z., Kahouli O., Abdallah H.H. Determination of optimal location of facts device to improve integration rate of wind energy in presence of mbpss regulator. *IET Renewable Power Generation*, 2020, vol. 14, no. 17, pp. 3526-3540. DOI: 10.1049/iet-rpg.2020.0679

47. Hadavi S., Mansour M.Z., Bahrani B. Optimal Allocation and Sizing of Synchronous Condensers in Weak Grids with Increased Penetration of Wind and Solar Farms. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 199-209. DOI: 10.1109/JETCAS.2021.3053554

48. Berdin A.S., Dmitrieva A.A., Kovalenko P.Iu., Seniuk M.D. Opredelenie mgnovennykh parametrov elektricheskogo rezhima s povyshennoi chastotoi diskretizatsii [Defining the instantaneous parameters of the electric mode with an increased sampling rate]. *Izvestiia NTTs Edinoi energeticheskoi sistemy*, 2020, no. 1 (82), pp. 137-146.

49. Hannan M.A., Islam N.N., Mohamed A., Lipu M.S.H., Ker P.J., Rashid M.M., Shareef H. Artificial Intelligent Based Damping Controller Optimization for the Multi-Machine Power System: A Review. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 39574-39594. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2855681

50. Burmistrov A.A., Khliamkov B.A., Poliakhov N.D. Sravnitel'nyi analiz sistemnykh stabilizatorov [Comparative analysis of system stabilizers]. *Upravlenie rezhimami Edinoi energosistemy Rossii. Sbornik dokladov Otkrytoi vsrossiiskoi NTK*. Ed. V.I. Reshetova. Moscow: NTs ENAS, 2002, pp. 194-201.

51. Iurganov A.A. Nekotorye soobrazheniia o stat'e F.L. Kogana "Osobennosti sil'nogo regulirovaniia возбуждениia sinkhronnykh generatorov v slozhnoi energosisteme" [About article of F.L. Kogan "Features of strong excitation control of synchronous generators in a complex power system"]. *Elektricheskie stantsii*, 2019, no. 7 (1056), pp. 36-37.

52. Klimova T.G., Nikolaeva O.O. Issledovanie avtomaticheskikh regulatorov возбуждениia sinkhronnogo generatora s razlichnymi signalami kanalov stabilizatsii po chastote [Research of the synchronous generator automatic excitation controller with various signals of frequency based stabilization channels]. *Elektroenergiia. Peredacha i raspredelenie*, 2021, no. 2 (65), pp. 110-115.

53. STO 59012820.29.160.20.004-2019. Trebovaniia k sistemam возбуждениia i avtomaticheskim regulatoram возбуждениia sil'nogo deistviia sinkhronnykh generatorov [STO 59012820.29.160.20.004-2019. Requirements for excitation systems and automatic excitation controllers of strong action of synchronous generators]. Moscow, AO "SO EES", 2019, 27 p.

### **Сведения об авторах**

**Аскарлов 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 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 B. 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 V. 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 M. 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 str., e-mail: chikishev\_e@mail.ru).

**Aleksey A. 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 E. 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 27.07.2021