

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-139-153

RESEARCHES REVIEW OF MODELLING ADAPTIVE AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS COMPONENTS

A. B. Karakayev, G. A. Galiev

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The results of collection, analysis and generalization of scientific materials that describe development of adaptive models of electrical power system components control are provided in the paper. The following topical problems are distinguished: creation of aggregated intelligent electrical power system with active-adaptive network; distributed electrical energy generation problem; development of flexible alternating current transmission systems; tasks of reducing the cost of the sophisticated systems analysis; metaprogramming methods application; instrumentation of genetic algorithms; the correlation problem between reliability indicators and control depth factor of ship electrical equipment; technical diagnostic systems optimization; raise of reliability by means of technical conditions forecast and malfunctions prevention; control algorithms optimization; artificial neural networks appliance; energy consumption short-term forecasting methods based on artificial neural networks appliance; active learning systems; weak parts detection during transient phenomena; modelling the processes control under non-deterministic disturbances; expert systems development problems; solving the modelling problems by various software means. It is noticed that the majority of different problems are economical and technical. On the other hand, a few tasks provide ecological function. Moreover, educational and social problems are almost not presented. Some perspective research fields are described. Namely, development of methodology based on complex system approach to the analysis of electrical power systems, artificial neural networks libraries application at C++ and Java projects, realization of electrical power systems fuzzy-neural adaptive model with reduced requirements for the computing power of hardware with the possibility of using the model for staff training.

Keywords: adaptive models, electrical power systems, distributed electrical power generation, genetic algorithms, forecasting the technical condition, artificial neural networks, active learning systems, expert systems, system concept, fuzzy-neural models.

For citation:

Karakayev, Aleksandr B., and Gleb A. Galiev. "Researches review of modelling adaptive automatic control systems of electrical power systems components." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 139–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-139-153.

УДК 621.3.078.4

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОМПОНЕНТАМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. Б. Каракаев, Г. А. Галиев

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Представлены результаты анализа и обобщения научных работ, описывающего разработку адаптивных моделей управления компонентами электроэнергетических систем. Выявлены следующие актуальные проблемы: создание единой интеллектуальной электроэнергетической системы с актив-но-адаптивной сетью; проблема распределенной генерации электроэнергии; разработка гибких систем

передачи переменного тока; задачи снижения затрат на анализ сложных систем; использование методов метапрограммирования; применение эволюционных (генетических) алгоритмов; проблема зависимостей между показателями надежности и показателем глубины контроля судового электрооборудования; оптимизация системы использования средств технической диагностики; повышение надежности посредством прогнозирования технического состояния электроэнергетической системы и предотвращения отказов; оптимизация алгоритмов управления; использование искусственных нейронных сетей в задачах повышения надежности; методика краткосрочного прогнозирования энергопотребления на базе искусственных нейронных сетей; системы активного обучения; проблемы решения задачи выделения слабых звеньев при переходных процессах в электроэнергетических системах; моделирование управления процессами при недетерминированных возмущающих воздействиях; проблемы разработки экспертных систем; решение задач моделирования различными программными средствами. Выявлены следующие перспективные направления исследования: разработка методики моделирования, основанной на комплексном системном подходе к анализу электроэнергетических систем; вопрос соотношения быстродействия и точности моделей электроэнергетических систем; широкое распространение прогностических адаптивных моделей; применение библиотек искусственных нейронных сетей в проектах C++ и Java; реализация нейронечеткой адаптивной модели электроэнергетических систем с пониженными требованиями к вычислительной мощности технических средств с возможностью использования модели для подготовки персонала.

Ключевые слова: адаптивные модели, электроэнергетические системы, распределенная генерация электроэнергии, эволюционные алгоритмы, прогнозирование технического состояния, искусственные нейронные сети, системы активного обучения, экспертные системы, системный подход, нейронечеткие модели.

Для цитирования:

Каракаев А. Б. Обзор исследований моделирования адаптивных систем автоматического управления компонентами электроэнергетических систем / А. Б. Каракаев, Г. А. Галиев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 139–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-139-153.

Введение (Introduction)

Задача построения наиболее эффективных моделей систем автоматического управления элементами электроэнергетических систем является достаточно актуальной в настоящее время, поскольку повышается уровень энерговооруженности судов и, соответственно, уровень автоматизации. В связи с этим на первый план выходит задача оптимального управления и повышения надежности. Одним из подходов может стать формирование новой технологической платформы — интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью [1], [2].

Целью данной работы являлось определение ключевых проблем в данной области. Были поставлены и решены следующие задачи:

- сформулированы основные критерии, характеризующие проблематику в области построения наиболее эффективных моделей систем автоматического управления элементами электроэнергетических систем;
- на основании обзора соответствующих работ выделены наиболее перспективные направления дальнейших исследований.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для проведения сравнительного анализа научной литературы выделены (рис. 1) следующие критерии содержания научных исследований: повышение качества электроэнергии оптимизация энергоснабжения [1]–[3]; исследование и реализация концепции интеллектуальных электроэнергетических систем (ЭЭС) [4]–[9]; решение проблем обеспечения и повышения надежности функционирования ЭЭС, оптимизации процессов диагностирования и прогнозирования [10]–[19]; применение искусственных нейронных сетей (ИНС) в электроэнергетике (ЭЭ) [20]–[26]; моделирование адаптивных систем автоматического регулирования (САР) [27]–[35]; проектирование экспертных систем [36]–[40]. Рассмотрим данные вопросы подробнее.



Рис. 1. Основные критерии содержания научных исследований

Повышение качества электроэнергии, оптимизация энергоснабжения. Одной из наиболее актуальных современных концепций является идея создания единой интеллектуальной ЭЭС с активно-адаптивной сетью [1]. В рамках рассмотрения данной проблемы вводится понятие *распределенной генерации* — совокупности источников тепловой и электрической энергии мощностью не более нескольких тысяч киловатт, максимально приближенных к потребителям, что исключает необходимость создания электрических и тепловых сетей, а значит, снижает потери энергии [2]. Этому же вопросу посвящена работа [3], в которой изучены следующие вопросы. Рассмотрена задача управления региональной ЭЭС. Проведено описание компонентов системы. Определена основная задача — оптимизация алгоритмов управления. Предложен вариант ее решения, основанный на оценке текущего состояния и прогнозировании. Представлен процесс прогнозирования потребления электроэнергии региональной ЭЭС. Реализация модели осуществлена средствами C# и платформы .Net. Предложены срезы интерфейсов. Рассмотрены различные варианты прогнозирования: при помощи коэффициента роста / спада спроса и нейронечеткое прогнозирование.

Исследование и реализация концепции интеллектуальных электроэнергетических систем. Концепция интеллектуальных ЭЭС представляет их основанными на активно-адаптивных электрических сетях (ЭС), характерными элементами которых являются гибкие системы передачи переменного тока (FACTS) и устройства постоянного тока высокого напряжения (ПТВН) [4]. Существуют два вида статических преобразователей: тока и напряжения. Преимуществами преобразователя напряжения являются: быстродействие, возможность работать при несимметрии, хорошая электромагнитная совместимость. Интеллектуальные ЭЭС на основе активно-адаптивных ЭС могут быть успешно применены для питания подводных кабелей с высоким емкостным сопротивлением, передачи электроэнергии на большие расстояния, увеличения мощности ЭС, передачи электроэнергии между несинхронизированными ЭЭС, уменьшения сечения проводов и высоты вышек. Однако существует проблема обеспечения надежности работы интеллектуальной ЭЭС на основе ПТВН и проблема моделирования таких систем (моделирование режимов без декомпозиции и ограничения во времени, необходимость точного решения нелинейных систем дифференциальных уравнений высокого порядка, взаимосвязь с внешними интерфейсами). Решение данных

проблем может быть найдено путем применения гибридного моделирования, как совокупности аналогового, цифрового и физического методов. В работе [4] представлен алгоритм построения модели синхронного гибридного процессора для решения указанной проблемы со следующими свойствами: универсальность и структурность модели. Также приведены результаты моделирования, которые показывают применимость данной концепции с единственным ограничением состоящим в том, что изменение схемы ЭЭС приводит к необходимости конструктивного изменения модели.

Разработке темы интеллектуальных сетей посвящены работы [5]–[7]. В [6] рассмотрены перспективы развития электроэнергетики в области разработки ЭЭС Smart Grid, характеризующихся большим количеством параметров. Вследствие этого рассмотрены проблемы децентрализации и необходимости решения априорно противоречивых задач, процессы изменения и проблемы применения, эрозия границ *человек – система*, штатный характер отказов. Все это ограничивает применение традиционных методов программирования, среди которых особенно сложными являются: согласование порядка внесения изменений, подстройка интерфейсов программного доступа к модулям под окружение, обеспечение интегральной производительности. Решение данной проблемы предложено в области метапрограммирования.

В рамках решения задачи снижения затрат на анализ сложных систем предложено использование следующих методов метапрограммирования: разработка, управляемая моделями, аспектно-ориентированный подход. Практическое использование данного подхода реализовано при проектировании математического обеспечения интеллектуальных ЭЭС. Для решения данной задачи предложены алгоритмы, основанные на теории категорий.

Решение проблем обеспечения и повышения надежности функционирования электроэнергетических систем, оптимизации процессов диагностирования и прогнозирования. К вопросу о применении сложных и наукоемких методов моделирования ЭЭС можно отнести рассмотрение ряда алгоритмов оптимизации параметров и мест установки устройств управления передачей ЭЭ [8]. В [9] представлена актуальность применения методов искусственного интеллекта для решения задач оптимизации. Более подробно рассмотрен процесс применения эволюционных (генетических) алгоритмов (ГА). Выделены преимущества применения ГА: быстроедействие, не требуют ограничений на оптимизируемую функцию, простота понимания и компьютерной реализации, гибкость. Сформулирована задача применения FACTS в ЭЭС в данный момент времени: минимизация потерь мощности, учесть ограничения установившегося режима и предельные ограничения значений параметров реактивной мощности, комплексных напряжений. Представлен обобщенный алгоритм решения задачи и результаты моделирования для стандартной 30-узловой схемы IEEE: шесть ТЭС и двадцать четыре нагрузочные станции. Однако данный метод имеет ограничение точности оптимизации.

Задачи оптимизации являются одним из основных направлений исследований в электротехнике в настоящее время, поскольку позволяют получить значительную экономию затрат на проектирование и эксплуатацию ЭЭС, что является достаточно актуальной проблемой, поскольку с 1990 г. в России удельный расход топлива увеличился на 10 – 20 %, потери в ЭС выросли в 1,5 раза, понизилась эффективность использования гидроэнергетических ресурсов, выросли затраты на поддержание качества электроэнергии [10]. В работе [10] выполнены обзор и сравнение методов оптимизации по критериям: быстроедействие – надежность. Определены значимые проблемы в области проектирования ЭЭС: ошибочность проектных решений, которая может проявляться по прошествии длительного времени эксплуатации, а также недостаточная определенность и достоверность исходной информации. Рассмотрены следующие задачи оптимизации проектирования ЭЭС: номинальное напряжение сети, качество электроэнергии, величина потерь, определение системы напряжений для региона, нахождение оптимального радиуса действия распределительной сети, величина мощности компенсаторов. Также представлены задачи при модернизации и реконструкции сетей: выбор оптимальных трансформаторов, замена проводов и т. д. Описаны методы решения многокритериальных задач оптимизации, выбора критериев оптимизации. Например, при решении задачи оптимизации режимов эксплуатации для некоторого периода критерием являются потери энергии, а для текущего момента — потери мощности.

Исследование основных зависимостей между показателями надежности и показателем глубины контроля судового электрооборудования (СЭО) проведено в работе [11]. Предложено рассмотреть показатель глубины контроля работоспособности и поиска дефектов как основного показателя контролепригодности, выполнена оценка коэффициента готовности, определена основная составляющая времени восстановления — время поиска дефекта. Предложено соотношение между глубиной контроля и временем поиска дефекта, приведены ограничения на определение исходных значений данных параметров, описан алгоритм поиска дефекта и приведена формула расчета оптимального коэффициента готовности. Определены зависимости между сложностью объекта и коэффициентом глубины контроля. Предложен алгоритм увеличения коэффициента глубины контроля для различных значений сложности объекта. Выявлены параметры, характеризующие надежность и уровень контролепригодности ЭО: среднее время восстановления, коэффициент готовности, величина сложности объекта, среднее время оценки работоспособности и поиска дефекта, коэффициент простоя. Приведенный анализ позволяет выбрать стратегии повышения надежности оборудования за счет изменения глубины контроля. Выполнен проверочный расчет по предложенной модели.

Сложность математического моделирования в части определения стратегии ограничения нагрузки при оптимальном распределении дефицита мощности в ОЭС [12] обусловлена неоднозначностью решения задач, зависящих от математических моделей, а также стратегий выбора управляющих воздействий. В [13] предложено использование нелинейных моделей и активной частотной стратегии. Основная задача в рамках предложенной работы сводится к анализу баланса мощности и энергии. Показана приоритетность исследования баланса мощности. Определена проблема в решении задачи балансовой надежности, а именно ограниченная пропускная способность межсистемных связей. Предложена вероятностная модель ЭЭС с биномиальным законом распределения вероятностей состояний генераторов. Показана проблема выбора алгоритма расчета балансовой надежности для существенно различающихся результатов проведенных расчетов по различным моделям, которая заключается в отсутствии эталонного метода расчета балансовой надежности. Рассмотрен ряд стратегий расчета, выделены и рекомендованы активная частотная стратегия и алгоритм обеспеченного спроса.

В работе [14] рассмотрены особенности щеточно-контактного аппарата современных генераторов. Определена важная задача щеточно-контактного аппарата мощных агрегатов: равномерное распределение тока, снимаемого с кольца. Сформулированы основные проблемы для решения данной задачи. Рассмотрены вопросы эксплуатации щеточно-контактного аппарата. Обоснована актуальность задачи повышения его надежности. Предложена система использования средств технической диагностики. Рассмотрены особенности устройства измерительного преобразователя. Представлена схема приемника сигнала от измерительного преобразователя. Определены характеристики АЦП. Указана возможность соединения с ЭВМ посредством специального ПО.

Однако повышение надежности возможно не только путем использования средств технической диагностики, но и посредством прогнозирования технического состояния ЭЭС и предотвращения отказов [15]–[19]. В работе [15] рассмотрены вопросы управления региональной ЭЭС. Проведено описание компонентов системы. Определена основная задача оптимизации алгоритмов управления. Предложен вариант ее решения на основе оценки текущего состояния и прогнозирования. Представлен процесс прогнозирования потребления электроэнергии региональной ЭЭС. Реализация модели осуществлена средствами C# и платформы .Net. Предложены срезы интерфейсов. Рассмотрены различные варианты прогнозирования: при помощи коэффициента роста / спада спроса и нейро-нечеткое прогнозирование.

Вопросы организации ЭЭС, ценовая модель оптового рынка электроэнергии и мощности, модель оптимального функционирования ЭЭС рассмотрены в работе [16]. Представлены алгоритмы оптимизации модели: минимума математического ожидания, минимума среднеарифметических затрат, минимальных / максимальных затрат. Показана сложность внедрения прогностических моделей для конечного потребителя и в блок генерации. Предложено повышение точности централизованного прогнозирования как средство решения данной проблемы.

Применение искусственных нейронных сетей в электроэнергетике. Использование ИНС в задачах повышения надёжности показано в [20], [21]–[24]. В [20] представлена методика краткосрочного прогнозирования энергопотребления ЭЭС на базе ИНС. Предложена модель ИНС, отвечающая требованиям поставленной задачи. Определено значение допустимой погрешности прогнозирования на базе ИНС (2,1 %). Обоснована целесообразность применения данной модели. В работе [22] обоснована необходимость оптимизации процесса функциональной диагностики. Рассмотрены существующие системы и методы диагностики. Определены недостатки этих методов. Предложена модель диагностирования на основе ИНС. Разработана принципиальная схема ИНС. На основе проведенного расчета по данной модели сделан вывод о целесообразности использования ИНС для создания адаптивных систем защиты и диагностики.

Однако, как отмечалось ранее, усложнение структуры ЭЭС приводит к увеличению контролируемых параметров и, следовательно, к усложнению вычислений и математических моделей. Для более экономичного машинного обучения можно использовать системы активного обучения. В рамках данного подхода машина сама принимает участие в выборе данных для обучения. Однако имеются значительные проблемы практического применения активного обучения: редкость использования данного подхода и соответственно, недостаточная развитость сложных алгоритмов обучения; выбор из общего пула данных не одного, а нескольких параметров за итерацию; зашумленность данных для обучения (результаты измерения, оценки экспертов); различная стоимость получения данных; различие между запросом и обучаемой моделью; многозадачное активное обучение; изменяющиеся или неизвестные классы моделей. Все это накладывает ограничения на применение обозначенного подхода [25], [26].

Моделирование адаптивных систем автоматического регулирования. В работе [27] рассмотрена математическая модель ЭЭС, позволяющая определять слабые звенья, приводящие к нарушению статической устойчивости. Приведен алгоритм решения задачи выделения слабых звеньев при переходе ЭЭС в новое состояние, характеризующееся некоторым запасом устойчивости вследствие введения новых элементов в систему, изменения уставок регуляторов возбуждения генераторов, форсировки емкостных компенсаторов, изменения режимов работы системы и т. д. Рассмотрены задачи моделирования режимных и структурных мероприятий, обеспечивающих повышение запаса устойчивости системы. Предложен способ оценки эффективности изменения структуры системы, основанный на авторском методе решения линейных матричных уравнений. Результаты применения данного алгоритма к конкретной модели энергосистемы позволяют выполнить локализацию элементов ЭЭС, изменение параметров которых наиболее сильно влияет на изменение устойчивости системы.

Определение запасов статической апериодической устойчивости ЭЭС в стохастической постановке проведено в [28]. Приводится анализ устойчивости ЭЭС, включающий определение предельных режимов, границ областей устойчивости, оценку величины запаса устойчивости. Определены границы применимости данных параметров при решении практических задач. Показана необходимость нахождения нового параметра для организации быстродействующих методов оценки запаса устойчивости – критическое направление утяжеления. Предложен стохастический подход к решению поставленной задачи. Показана проблема при моделировании подобного решения: получение тривиального (нулевого) решения. Предложены пути ее решения. Выполнено численное моделирование по предложенной методике, показывающее увеличение риска нарушения устойчивости при росте размаха колебаний нагрузки, отключении одного из генераторов ЭЭС (наброс нагрузки), отключении линии электропередачи (сброс нагрузки). Предложены следующие результаты: различие моделирования в стохастической и детерминированной постановке, завышенное значение запаса устойчивости при увеличении дисперсии.

Работа [29] посвящена моделированию управления процессами в сложных системах при недетерминированных возмущающих воздействиях. В ней разработана модель ЭЭС с генераторами, приводимыми в действие газодизельными двигателями с микропроцессорным управлением. В рамках модели решаются задачи управления, обеспечения качества ЭЭ. Моделирование выполнено посредством Proteus, Matlab. Рассмотрены предпосылки применения газодизельных

двигателей в автономных ЭЭС судов и буровых платформ. Определены сложности их использования: высокая степень зависимости частоты вращения от нагрузки, что не позволяет использовать распространенные регуляторы частоты вращения при параллельной работе генераторных агрегатов. Рассмотрен вопрос применения механических и электронных регуляторов частоты вращения. Обоснована целесообразность исследования вопроса распределения нагрузки и параллельной работы на математической модели. Сформулирована проблема анализа устойчивости работы генераторов. Предложена модель газодизельного двигателя и системы управления. В результате моделирования определено, что реализация контроля углового положения роторов генераторов и моментов на валу каждого двигателя обеспечивает распределение мощности в статических и динамических режимах, установлены наилучшие условия параллельной работы генераторов.

Моделирование ЭЭС с генераторами, приводимыми в действие газовыми и паровыми турбинными установками (соответственно ГТУ и ПТУ) проведено в [30], рассмотрены проблемы обеспечения регулировочных характеристик генераторов, приводимых ГТУ и ПТУ. Определена необходимость моделирования установок. Рассмотрены особенности моделирования ГТУ и ПТУ: упрощение модели до момента синхронизации с сетью большой мощности, управление с оценкой рассогласования по частоте (резервно — по скорости вращения), скорость изменения мощности, определяемая регуляторами температуры, ускорения и скорости вращения. Выявлена проблема дефицита исходных данных, связанных с неполной информацией о системах регулирования. Получение данной информации определяется экспериментальными измерениями и прогностическими моделями. Рассмотрены вопросы повышения надежности функционирования установок. Приведены различные модели ГТ. Выполнен сравнительный анализ. Сформулированы рекомендации к моделированию переходных процессов. Обоснована необходимость моделирования генератора совместно с приводным двигателем. Показана важная роль моделирования системы автоматического управления.

Важным решением является создание модели САР в среде Matlab на основе простейших электронных устройств [31]. В работе рассматривается процесс смены элементной базы систем автоматического управления. Приведены примеры современных устройств и систем. Рассмотрены преимущества и недостатки цифровой техники. Обоснована актуальность разработки современных САР. Предложены предпосылки к моделированию простейших электронных компонентов. Моделирование ведется средствами Matlab. Приводятся модели различных цифровых компонентов САР. Предложена дальнейшая разработка данного направления исследований, создание модели микроконтроллера на базе предложенных моделей и в дальнейшем создание модели САР.

Новый подход к регулированию напряжения и реактивной мощности в энергосистеме по минимуму потерь предложен в работе [32]. Рассмотрены вопросы применения САР с использованием цифровой элементной базы. Определены задачи САР в статическом и динамическом режимах ЭЭС. Поставлена проблема регулирования напряжения и реактивной мощности в реальном времени. Рассмотрено современное состояние уровня оптимизации в данном вопросе. Указаны следующие недостатки: необходимость расчета установившегося режима для устранения погрешностей измерения, сложность поиска оптимальных напряжений. Предложен метод решения данных проблем.

В статье [33] описана методика применения адаптивного нечеткого контроллера для регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока. Для анализа выбран двигатель постоянного тока с постоянными магнитами. Применение именно методики нечеткого моделирования обуславливается неполной информацией о моделируемой системе. Показана проблема настройки параметров контроллера. Моделирование выполняется на базе Arduino DUE, определена конструкция нечеткого адаптивного ПИ-контроллера, рассмотрена методика моделирования и применения Arduino. Результаты работы показывают преимущества предложенного метода при моделировании изменения нагрузки на 30 и 60 %.

В статье [34] поставлена задача разработки программных средств расчёта по обеспечению устойчивости ЭЭС. Подобный адаптивный алгоритм использован в работе [35]. Обоснована актуальность исследований по моделированию адаптивного алгоритма управления САУ ГТУ. Постав-

лена задача оптимизации частоты тока синхронного генератора. Предложена математическая модель синхронного генератора. Представлена быстро решаемая модель ГТУ на основе модели СГ и статических характеристик, полученных экспериментально. Выполнено ограничение применения данного подхода для задач с точностью 2–5 %. Определены передаточные функции регулятора. Выполнена настройка регулятора. Проведено моделирование, на основании которого показано, что применение адаптивного регулятора приближает характеристики ГТУ к эталонным.

Проектирование экспертных систем. Сложность технических процессов приводит к необходимости разработки экспертных систем [36]–[38]. Определенные проблемы развития ЭЭС: увеличение параметров контроля, разнородность функциональных целей, сложность выбора оптимального решения в условиях многокритериальных оценок, обосновывают необходимость разработки адаптивных экспертных систем в области электроэнергетики [39].

В работе [39] приведены различные методы моделирования. Предложено использовать метод частных критериев. Среди критериев выделены: суммарные затраты (экономический критерий), годовая потеря электроэнергии (технический критерий), экономические потери от нарушения энергоснабжения (техничко-экономический критерий), площадь используемой территории (социально-экономический критерий). Представлены методы расчета указанных критериев, диаграмма моделирования. Решение задачи моделирования проведено средствами C#. На основании проведенного моделирования предложено использовать данный метод для разработки автоматизированной системы принятия решений.

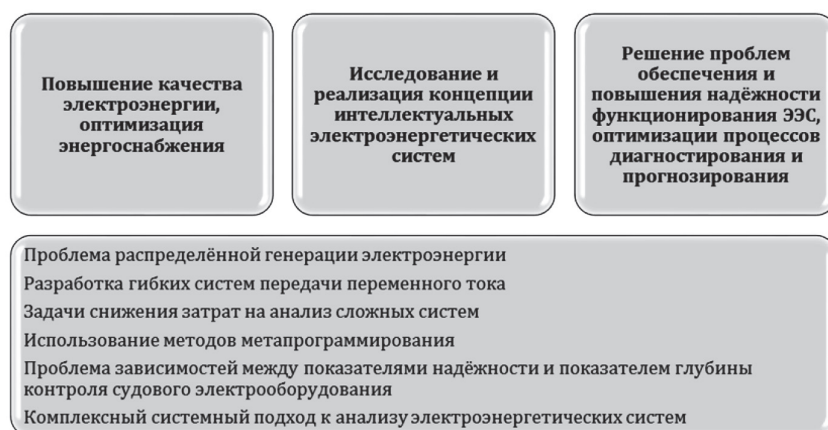
Многокритериальные системы принятия решений на основе нечетких множеств описаны в статье [40]. Проведен сравнительный анализ литературы, посвященной данной теме, проведена оценка производительности различных моделей. Отмечено, что в реальных условиях значения критериев недетерминированы и не могут быть определены точно, что приводит к необходимости использования нечетких множеств. Анализ выполнен по следующим критериям: количество альтернатив, признаков; метод выбора весов критериев из различных распределений; уровень нечеткости. Конечные результаты анализа были получены путем применения *tau-b* корреляции Кендалла и ро-теста Спирмана посредством соответствующего ПО.

Фаззификация (введение нечеткости) матриц принятия решений выполнена средствами Matlab с использованием треугольной функции принадлежности. Предложена формула для оценки веса подзаключений, метод нахождения компромисса в условиях нечеткости. Были исследованы следующие методы: ELECTRE, TOPSIS, SAW, WPM, ANP, VIKOR, CP. При этом результаты моделирования ELECTRE и VIKOR отличались от остальных. В работе показана необходимость выбора методики применения нечетких множеств для каждой задачи в отдельности.

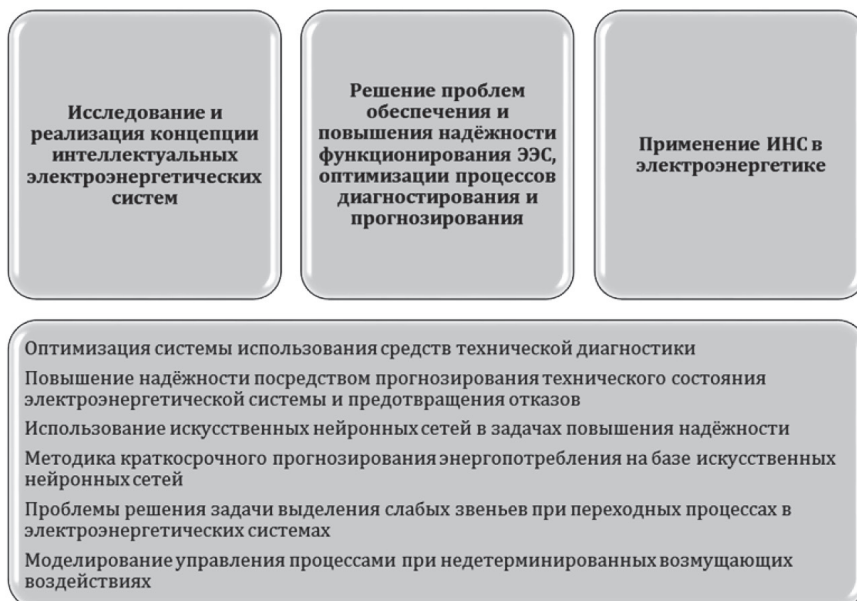
Обсуждение (Discussion)

В ходе рассмотрения выделенных критериев актуальных исследований им в соответствии были поставлены различные проблемы (рис. 2).

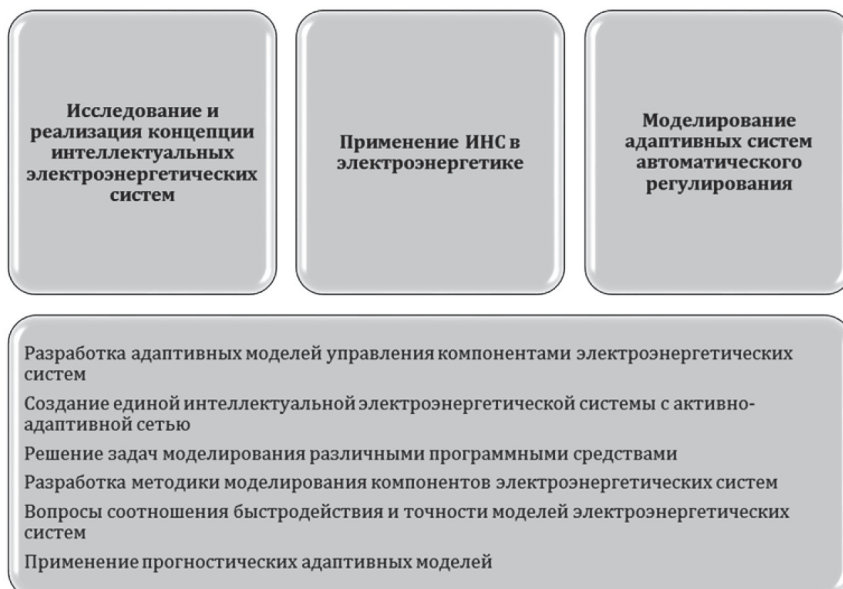
а)



б)



в)



г)

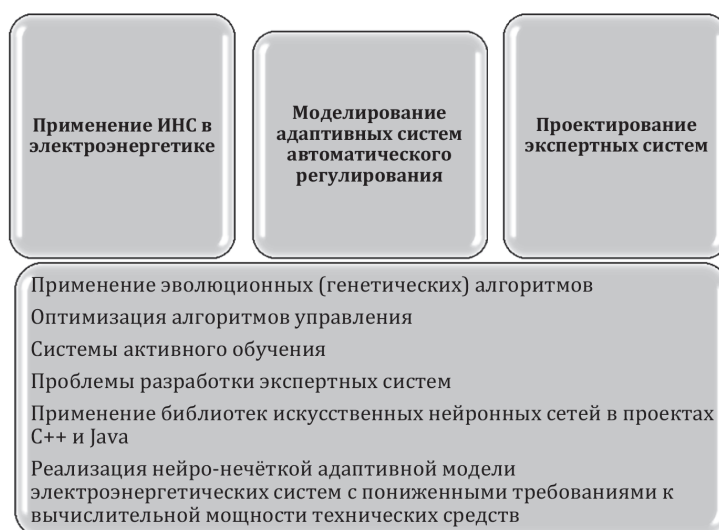


Рис. 2. Соответствие проблем и критериев направления исследований:
а — этап 1; б — этап 2; в — этап 3; г — этап 4

Распределение библиографических источников по выделенным для исследования темам в рамках данного обзора представлено на рис. 3. Можно отметить сравнительно небольшое количество статей, посвященных повышению качества электроэнергии, оптимизации энергопотребления. В действительности, данная проблема является частью более широкого класса задач, а именно реализации концепции интеллектуальных ЭЭС. С этой областью исследований тесно связаны темы моделирования адаптивных САР, проектирования экспертных систем, повышения надежности ЭЭС. Частным случаем ряда представленных задач является методика применения ИНС в ЭЭ.

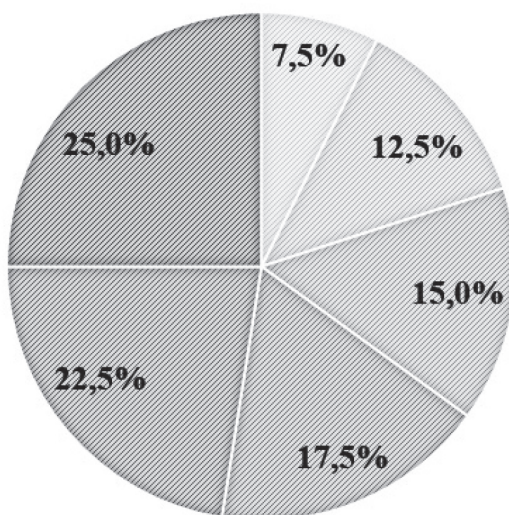


Рис. 3. Распределение источников по выделенным темам: повышение качества электроэнергии, оптимизация электроснабжения — 7,5 %; проектирование экспертных систем — 12,5 %; исследование и реализация концепции интеллектуальных электроэнергетических систем — 15 %; применение искусственных нейронных сетей в электроэнергетике — 17,5 %; моделирование адаптивных систем автоматического регулирования — 22,5 %; решение проблем обеспечения и повышения надежности функционирования ЭЭС, оптимизация процессов диагностирования и прогнозирования — 25 %

Выводы (Conclusions)

1. На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы: ряд проблем в области электротехники, электротехнических комплексов и систем в настоящее время вызывает большой интерес у исследователей.

2. Рассмотренная литература определяет следующую тематику актуальных исследований: концепция распределенной генерации электроэнергии, задача создания интеллектуальных электроэнергетических систем, исследования в области повышения надежности, оптимизация средств технического диагностирования и прогнозирования, разработка адаптивных систем автоматического управления, оптимизация устойчивости работы генераторных агрегатов, экспертные системы и лабораторно-тренажерные комплексы.

3. Данные задачи обуславливают применение различных наукоемких методов моделирования и оптимизации: генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети, теория нечетких множеств, метод агрегативного моделирования, теория категорий, многокритериальные задачи, стохастические модели, метод частных критериев, линейные матричные уравнения, детерминированные модели, быстрорешаемые модели (совокупность упрощенной математической модели и статических характеристик моделируемого объекта).

4. Следует также уделить внимание используемым для моделирования техническим и компьютерным средствам: большая часть задач решается в среде Matlab; реализация генетических алгоритмов, методов нечетких множеств, ИНС осуществляется также на языках Python, R. Однако проводятся разработки библиотек для языков C++ и Java. Применение языка C# и платформы Net

для реализации вышеуказанных алгоритмов менее предпочтительна из-за сложности кроссплатформенного применения. Менее широко используются пакеты Mathcad, DIgSILENT Power Factory, Fazonord. Возможна также реализация ИНС на базе платформы Arduino DUE. Однако в основе своей большинство задач имеет строго экономическую или технико-экономическую направленность. Довольно узкий класс задач нацелен на выполнение экологической функции и совсем малая часть исследований в данной области имеет образовательную и социальную направленность.

5. В результате критического анализа и оценки результатов научных исследований были выявлены следующие перспективные направления исследования: разработка методики моделирования, основанной на комплексном системном подходе к анализу ЭЭС; проблема создания единой интеллектуальной ЭЭС с активно-адаптивной сетью; соотношение быстродействия и точности моделей ЭЭС; повышение точности оптимизации процессов; разработка моделей, менее чувствительных к неполной определенности и недостаточной достоверности исходной информации; широкое распространение прогностических адаптивных моделей; соотношение применения библиотек ИНС в проектах C++ и Java; реализация нейро-нечеткой адаптивной модели ЭЭС с пониженными требованиями к вычислительной мощности технических средств с возможностью использования модели для подготовки персонала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А. Новая эпоха в энергетике и умные сети / А. Кузнецов // Наука и инновации. — 2017. — № 8 (174). — С. 22–27.
2. Головищиков В. О. Распределенная генерация (включая возобновляемые источники энергии), как элемент интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью / В. О. Головищиков, С.З. Закирова // Современные технологии и научно-технический прогресс. — 2016. — Т. 1. — С. 86–87.
3. Булатов Ю. Н. Прогностические регуляторы для установок распределенной генерации / Ю. Н. Булатов, А.В. Крюков, В.Х. Нгуен // Системы. Методы. Технологии. — 2016. — № 1 (29). — С. 63–69. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-1-63-69.
4. Гусев А. С. Гибридная модель вставки постоянного тока / А. С. Гусев [и др.] // Энергия единой сети. — 2016. — № 2 (25). — С. 52–61.
5. Дубенко Ю. В. Обзор современной элементной базы в рамках концепции «умных» сетей / Ю. В. Дубенко, Ю. Н. Тимченко, Н. Н. Тимченко // Политематический сетевой электронный научный журнал кубанского государственного аграрного университета. — 2016. — № 121. — С. 1595–1607. DOI: 10.21515/1990-4665-121-096.
6. Ковалёв С. П. Применение метапрограммирования для повышения технологичности больших автоматизированных систем / С. П. Ковалёв // Информатика и ее применения. — 2016. — Т. 10. — № 1. — С. 56–66. DOI: 10.14357/19922264160105.
7. Халилов Э. Д. О моделировании режимов электроэнергетических систем с устройствами FACTS / Э.Д. Халилов // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — 2017. — Т. 60. — № 4. — С. 341–351. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-341-351.
8. Булатов Ю. Н. Применение генетических алгоритмов для настройки автоматических регуляторов установок распределенной генерации / Ю. Н. Булатов, А. В. Крюков // Информационные и математические технологии в науке и управлении. — 2016. — № 2. — С. 30–45.
9. Поляхов Н. Д. Определение параметров и мест установки устройств управления передачей электроэнергии / Н. Д. Поляхов, И. А. Приходько, И. В. Швыров // Автоматизация в электроэнергетике и электро-технике. — 2016. — Т. 1. — С. 106–111.
10. Хасанзода Н. Оценка эффективности функционирования распределительных сетей при оптимизация режимов электроэнергетических систем / Н. Хасанзода // Архивариус. — 2016. — Т. 2. — № 1 (5). — С. 9–13.
11. Каракаев А. Б. Исследование основных зависимостей между показателями надежности и показателем глубины контроля судового электрооборудования / А. Б. Каракаев, А. В. Луканин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 180–192. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-180-192.
12. Беляев Н. А. Расчет показателей балансовой надежности энергосистем с учетом переменной топологии электрической сети / Н. А. Беляев, Н. В. Коровкин, В. С. Чудный // Электричество. — 2016. — № 4. — С. 4–10.

13. *Обоскалов В. П.* Математические модели и стратегии ограничения нагрузки при оптимальном распределении дефицита мощности в ОЭС / В. П. Обоскалов, Р. Т. Валиев, С. А. Гусев // Известия Российской Академии Наук. Энергетика. — 2017. — № 4. — С. 25–36.
14. *Марков А.М.* Автоматизированная система мониторинга основных параметров щёточно-контактного аппарата электроэнергетического турбогенератора / А.М. Марков // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Технические науки. — 2016. — № 3. — С. 32–40.
15. *Бурковский В. Л.* Реализация программного комплекса прогнозирования уровня регионального энергопотребления / В. Л. Бурковский, В. Н. Крысанов, А. Л. Руцков // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2016. — Т. 12. — № 3. — С. 41–47.
16. *Крысанов В. Н.* Функционально-алгоритмическая организация систем регионального энергопотребления / В. Н. Крысанов, А. Л. Руцков, О. Ш. М. Шукур // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2016. — Т. 12. — № 1. — С. 44–49.
17. *Стеклов А. С.* Прогнозирование технического состояния судовых электроэнергетических систем / А. С. Стеклов, А. В. Серебряков, В. Г. Титов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2016. — № 5. — С. 21–26. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.5.021-026.
18. *Kozarević S.* Use of fuzzy logic for measuring practices and performances of supply chain / S. Kozarević, A. Puška // Operations Research Perspectives. — 2018. — Vol. 5. — Pp. 150–160. DOI: 10.1016/j.orp.2018.07.001
19. *Lan J.* Priority degrees for hesitant fuzzy sets: Application to multiple attribute decision making / J. Lan, R. Jin, Z. Zheng, M. Hu // Operations Research Perspectives. — 2017. — Vol. 4. — Pp. 67–73. DOI: 10.1016/j.orp.2017.05.001.
20. *Алексеева И. Ю.* Повышение надежности электроэнергетических систем на основе нейронных технологий / И.Ю. Алексеева // Электротехнические системы и комплексы. — 2016. — № 3 (32). — С. 15–19. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-3(32)-15-19.
21. *Каменев А. С.* Нейро моделирование как инструмент интеллектуализации энергоинформационных сетей / А. С. Каменев, С. Ю. Королев, В. Н. Сокотущенко; под ред. В. В. Бушуева. — М.: Энергия, 2012. — 124 с.
22. *Пономарев В. А.* Комплексный метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе использования искусственных нейронных сетей / В. А. Пономарев, И. Ф. Суворов // Новости электротехники. — 2011. — № 2.
23. *Торопов А. С.* Прогнозирование почасового электропотребления региональной энергосистемы с использованием искусственных нейронных сетей / А. С. Торопов, А. Н. Туликов // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2017. — Т. 21. — № 5 (124). — С. 143–151. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-5-143-151.
24. *Yin J.* Partial orientation and local structural learning of causal networks for prediction / J. Yin, Y. Zhou, C. Wang, P. He, C. Zheng, Z. Geng // Causation and Prediction Challenge. — 2008. — Pp. 93–105.
25. *de Abril I. M.* Supervised neural network structure recovery / I. M. de Abril, A. Nowe // Neural Connections Workshop. — 2015. — Pp. 37–44.
26. *Settles B.* From theories to queries: Active learning in practice / B. Settles // Active Learning and Experimental Design workshop In conjunction with AISTATS 2010. — 2011. — Pp. 1–18.
27. *Абдурахманов А. М.* Алгоритм оперативного определения слабых звеньев сети, приводящих к нарушению статической устойчивости / А. М. Абдурахманов, К. А. Зимин, В. Н. Рябченко // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. — 2016. — Т. 3. — № 3. — С. 20–26.
28. *Крюков А. В.* Определение запасов статической аperiodической устойчивости электроэнергетических систем в стохастической постановке / А. В. Крюков, В. В. Сенько, Е. О. Тихомиров // Вестник Иркутского Государственного технического ун-та. — 2016. — № 4 (111). — С. 125–135. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-4-125-135.
29. *Черный С. Г.* Моделирование управления процессами в сложных системах при недетерминированных возмущающих воздействиях / С. Г. Черный, А. А. Жиленков // Автоматизация процессов управления. — 2016. — № 1 (43). — С. 37–46.
30. *Бахмисов О. В.* Выбор моделей газотурбинных и парогазовых установок для исследования процессов в ЭЭС / О. В. Бахмисов, О. Н. Кузнецов // Электричество. — 2016. — № 9. — С. 15–22.
31. *Пионкевич В. А.* Математическое моделирование элементов цифровой электроники для решения задач автоматического управления в энергетике / В. А. Пионкевич // Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. — 2016. — № 4 (111). — С. 136–144. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-4-136-144.

32. Тамазов А. И. Новый подход к регулированию напряжения и реактивной мощности в энергосистеме по минимуму потерь / А. И. Тамазов // *Электричество*. — 2016. — № 8. — С. 29–36.
33. Zaki A. M. Embedded two level direct adaptive fuzzy controller for DC motor speed control / A. M. Zaki, M. El-Bardini, F. A. S. Soliman, M. M. Sharaf // *Ain Shams Engineering Journal*. — 2018. — Vol. 9. — Is. 1. — Pp. 65–75. DOI: 10.1016/j.asej.2015.10.003.
34. Авраменко В.Н. Автоматизация расчета дозированных управляющих воздействий в адаптивной автоматике обеспечения устойчивости ЭЭС / В. Н. Авраменко, Н. Т. Юнеева // *Научные труды Винницкого национального технического университета*. — 2016. — № 1. — С. 8–13.
35. Зиятдинов И. Р. Исследование адаптивного алгоритма управления газотурбинными установками с учетом динамики синхронного генератора / И. Р. Зиятдинов, Б. В. Кавалеров, И. А. Крылова // *Современные наукоемкие технологии*. — 2016. — № 8–2. — С. 225–231.
36. Бордюг А. С. Моделирование элементов идентификации и контроля параметров системы для интеллектуальной поддержки принятия решений / А. С. Бордюг, И. Л. Титов, А. А. Железняк // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2016. — № 3. — С. 75–85.
37. Кацадзе Т. Л. Принятие решений по рациональному регулированию режимов неоднородных электрических сетей / Т. Л. Кацадзе // *Научные труды Винницкого национального технического университета*. — 2016. — № 1. — С. 14–19.
38. Стеклов А. С. Разработка модели экспертной системы диагностирования и прогнозирования технического состояния судовых электроэнергетических систем / А. С. Стеклов, А. В. Серебряков, В. Г. Титов // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. — 2016. — Т. 3. — № 2. — С. 24–27.
39. Семенова Н. Г. Математические модели частных критериев и их программная реализация в оценке принимаемого решения по развитию системы электроснабжения промышленного района города / Н. Г. Семенова, А. Д. Чернова // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. — 2016. — № 4. — С. 94–99.
40. Zamani-Sabzi H. Statistical and analytical comparison of multi-criteria decision-making techniques under fuzzy environment / H. Zamani-Sabzi, J. P. King, C. C. Gard, S. Abudu // *Operations Research Perspectives*. — 2016. — Vol. 3. — Pp. 92–117. DOI: 10.1016/j.orp.2016.11.001.

REFERENCES

1. Kuznetsov, Aleksandr. “A new era in energy and smart networks.” *Science and Innovations* 8(174) (2017): 22–27.
2. Golovshchikov, V. O., and S. Z. Zakirova. “Distributed generation (including renewable energy), as an element of intellectual power system with active-adaptive network.” *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress* 1 (2016): 86–87.
3. Bulatov, Yu. N., A. V. Kryukov, and Van Khuan Nguen. “Forecasting controls for distributed generation plants.” *Systems. Methods. Technologies* 1(29) (2016): 63–69. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-1-63-69
4. Gusev, A. S., A. O. Sulaimanov, R. A. Ufa, A.S. Vasil’ev, N.G. Lozinova, and O. V. Suslova. “Gibridnaya model’ vstavki postoyannogo toka.” *Energiya edinoi seti* 2(25) (2016): 52–61.
5. Dubenko, Yurii Vladimirovich, Yurii Nikolaevich Timchenko, and Nikolai Nikolaevich Timchenko. “A review of the current element base within the concept of smart grids.” *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University* 121 (2016): 1595–1607. DOI: 10.21515/1990-4665-121-096.
6. Kovalyov, Sergey P. “Metaprogramming to increase manufacturability of large-scale software-intensive systems.” *Informatics and Applications* 10.1 (2016): 56–66. DOI: 10.14357/19922264160105.
7. Halilov, E.D. “On the Simulation of Modes of Electric Power Systems with FACTS Devices.” *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations* 60.4 (2017): 341–351. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-341-351.
8. Bulatov, Yury N., and Andrey V. Kryukov. “Application of genetic algorithms for setting adjustment controllers of distributed generation plants.” *Information and mathematical technologies in science and management* 2 (2016): 30–45.
9. Polyakhov, N.D., I.A. Prikhodko, and I.V. Shvyrov. “Determination of the parameters and place of the installation flexible AC transmission systems.” *Avtomatizatsiya v elektroenergetike i elektrotekhnike* 1 (2016): 106–111.
10. Khasanzoda, Nasrullo. “Assessment of efficiency of functioning of distributive networks at optimization of the modes of electrical power systems.” *Arkhiarius* 2.1(5) (2016): 9–13.

11. Karakaev, Aleksandr Bakhtirevich, and Andrey Vladimirovich Lukanin. "Investigation main dependences between indicators of reliability and indicator of ship electroequipment control depth." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(37) (2016): 180–192. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-180-192.
12. Belyaev, N. A., N. V. Korovkin, and V. S. Chudnyi. "Calculating Power System Balance Reliability Indicators Taking into Account Variable Electric Network Topology." *Electricity* 4 (2016): 4–10.
13. Oboskalov, V. P., R. T. Valiev, and S. A. Gusev. "Mathematical models and strategies of load shedding for optimal distribution of power short age in united electrical power system." *Thermal Engineering* 4 (2017): 25–36.
14. Markov, A. M. "Automatic system monitoring of the main parameters brush-contact device turbo-alternator." *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* 3 (2016): 32–40.
15. Burkovskii, V. L., V. N. Krysanov, and A. L. Rutskov. "Sales program complex prediction of the regional level of energy consumption." *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 12.3 (2016): 41–47.
16. Krysanov, V. N., A. L. Rutskov, and Omar Shukur Makhmud Shukur. "Functional and algorithmic organization systems of regional energy consumption." *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 12.1 (2016): 44–49.
17. Steklov, A. S., A. V. Serebryakov, and V.G. Titov. "Forecasting technical condition of ship electric power systems." *Vestnik IGEU* 5 (2016): 21–26. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.5.021-026.
18. Kozarević, Safet, and Adis Puška. "Use of fuzzy logic for measuring practices and performances of supply chain." *Operations Research Perspectives* 5 (2018): 150–160. 10.1016/j.orp.2018.07.001.
19. Lan, Jibin, R. Jin, Z. Zheng, and M. Hu. "Priority degrees for hesitant fuzzy sets: application to multiple attribute decision making." *Operations Research Perspectives* 4 (2017): 67–73. DOI: 10.1016/j.orp.2017.05.001.
20. Alekseeva, Inna Yu. "Improving The Reliability of Electric Energy Systems on The Basis of Neural Technologies." *Electrotechnical Systems and Complexes* 3(32) (2016): 15–19. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-3(32)-15-19.
21. Kamenev, A. S., S. Yu. Korolev, and V. N. Sokotushchenko. *Neiromodelirovanie kak instrument intellektualizatsii energoinformatsionnykh setei*. M: Energiya, 2012.
22. Ponomarev, V. A., and I. F. Suvorov. "Kompleksnyi metod diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigateli na osnove ispol'zovaniya iskusstvennykh neuronnykh setei." *Novosti elektrotekhniki* 2 (2011).
23. Toropov, Andrei S., and Aleksandr N. Tulikov. "Forecasting of regional power supply system power consumption per hour using artificial neural networks." *Proceedings of Irkutsk State Technical University* 21.5(124) (2017): 143–151. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-5-143-151.
24. Yin, Jianxin, Y. Zhou, C. Wang, P. He, C. Zheng, and Z. Geng. "Partial orientation and local structural learning of causal networks for prediction." *Causation and Prediction Challenge*. 2008. 93–105.
25. de Abril, Ildefons Magrans, and Ann Nowe. "Supervised neural network structure recovery." *Neural Connectomics Workshop*. 2015. 37–44.
26. Settles, Burr. "From theories to queries: Active learning in practice." *Active Learning and Experimental Design workshop In conjunction with AISTATS 2010*. 2011. 1–18.
27. Abdurakhmanov, A.M., K.A. Zimin, and V.N. Ryabchenko. "The Operational Definition Algorithm of Weak Links Network, Leading to Violation of the Small Signal Stability." *Russian Internet Journal of Electrical Engineering* 3.3 (2016): 20–26.
28. Kryukov, Andrei, Vladislav Senko, and Evgeniy Tikhomirov. "Determination of aperiodic static stability margins of electrical power systems based on a stochastic approach." *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 4(111) (2016): 125–135. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-4-125-135.
29. Chernyi, Sergei Grigorievich, and Anton Aleksandrovich Zhilenkov. "Processes control modeling in complex systems in case of indeterminate perturbation actions." *Automation of Control Processes* 1(43) (2016): 37–46.
30. Bakhmisov, Oleg Vladimirovich, and Oleg Nikolayevich Kuznetsov. "Experimental Comparison and Selection of Models of Gas Thruster Units and Combined Cycle Plants for Investigating Processes in Electric Power Systems." *Elektrichestvo* 9 (2016): 15–22.
31. Pionkevich, Vladimir. "Mathematical modeling of digital electronics elements to solve automatic control problems in power engineering." *Proceedings of Irkutsk State Technical University* 4(111) (2016): 136–144. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-4-136-144.
32. Tamazov, Aleksandr Iosifovich. "A New Approach to Control of Voltages and Reactive Power in a Power System Based on the Minimal Loss Criterion." *Elektrichestvo* 8 (2016): 29–36.

33. Zaki, Ahmad M., Mohammad El-Bardini, F. A. S. Soliman, and Mohammed Mabrouk Sharaf. "Embedded two level direct adaptive fuzzy controller for DC motor speed control." *Ain Shams Engineering Journal* 9.1 (2018): 65–75. DOI: 10.1016/j.asej.2015.10.003.
34. Avramenko, Vladimir Nikolaevich, and Nataliya Takhirdzhanovna Yuneeva. "Avtomatizatsiya rascheta dozirovannykh upravlyayushchikh vozdeistvii v adaptivnoi avtomatike obespecheniya ustoichivosti ees." *Nauchnye trudy Vinnitskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta* 1 (2016): 8–13.
35. Ziyatdinov, I. R., B. V. Kavalero, and I. A. Krylova. "Research of gas turbine units adaptive control algorithms to the dynamics of the synchronous generator." *Modern high technologies* 8-2 (2016): 225–231.
36. Bordyug, Aleksandr Sergeevich, Ivan Leonidovich Titov, and Aleksandr Aleksandrovich Zheleznyak. "Modeling elements for identification and control of the system parameters for intellectual decision-making support." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2016): 75–85.
37. Katsadze, Teimuraz Luarsabovich. "Prinyatie reshenii po ratsional'nomu regulirovaniyu rezhimov neodnorodnykh elektricheskikh setei." *Nauchnye trudy Vinnitskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta* 1 (2016): 14–19.
38. Steklov, A. S., A. V. Serebryakov, and V. G. Titov. "Developing a Model of Expert System Diagnostics and Forecasting Technical Condition of Ship Electric Power Systems." *Russian Internet Journal of Electrical Engineering* 3.2 (2016): 24–27.
39. Semenova, N. G., and A. D. Chernova. "Mathematical models for multiple criteria and its software for evaluating decisions on development of electric power supply of industrial city's district." *Intellect. Innovation. Investments* 4 (2016): 94–99.
40. Zamani-Sabzi, Hamed, James Phillip King, Charlotte C. Gard, and Shalamu Abudu. "Statistical and analytical comparison of multi-criteria decision-making techniques under fuzzy environment." *Operations Research Perspectives* 3 (2016): 92–117. DOI: 10.1016/j.orp.2016.11.001.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каракаев Александр Бахтыреевич — доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: aleksandr.karakaev@list.ru,
kaf_ose@gumrf.ru
Галиев Глеб Андреевич — аспирант
Научный руководитель:
Каракаев Александр Бахтыреевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: veilagbelg@mail.ru, kaf_ose@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Karakayev, Aleksandr B. — Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: aleksandr.karakaev@list.ru,
kaf_ose@gumrf.ru
Galiev, Gleb A. — Postgraduate
Supervisor:
Karakayev, Aleksandr B.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: veilagbelg@mail.ru, kaf_ose@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2019 г.
Received: November 27, 2019.