

На правах рукописи



Сидоренко Евгений Васильевич

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ В
СИСТЕМЕ ВНУТРЕННЕГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ АЭС НА
ОСНОВЕ АППАРАТА НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель:	Бурковский Виктор Леонидович, доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Чернецкая Ирина Евгеньевна, доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой вычислительной техники Юго- Западного государственного университета Извеков Евгений Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики Воронежского государственного аграрного университета им. императора Петра I
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет»

Защита диссертации состоится «07» апреля 2023 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета 99.2.031.03, созданного на базе ВГТУ, ВГУ, и ЛГТУ, по адресу: г. Воронеж, Московский проспект, 14, аудитория 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте www.cchgeu.ru.

Автореферат разослан «14» февраля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., профессор



С.Ю. Белецкая

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность работы. Взаимосвязанные технологические процессы транспортировки и использования энергоресурсов применительно к внутреннему энергопотреблению АЭС сопряжены с организацией продвинутых средств автоматизации, позволяющих реализовать оптимизацию режимов функционирования элементов внутри них. Основным параметром эффективности данного процесса служит параметр - напряжение питания в совокупности с минимизацией потерь активной мощности. Вместе с тем, обязательным условием служит поддержание в заданных ограничениях частоты питающей сети.

Существенная амортизация электрических и связанных с ними тепловых сетей, плановый рост мощностей энергоустановок приёмников электроэнергии, повышение неравномерностей при транспорте перетоков мощности энергоресурсов во времени и направлениям многократно повышают размерность и сложность задач, которые решаются при регулировании энергораспределения на различных уровнях многоиерархичной системы управления (СУ). Обязательным условием, предъявляемым к СУ, в этом случае, является обеспечение решения задач как организации технологии, так и диспетчеризации.

Локальные подсистемы энергораспределения являются неотъемлемыми элементами глобальных образований электроэнергетических систем (ЭЭС). Существенная доля локальных ЭЭС приходится на технологические структуры обеспечения собственных нужд производственных предприятий и производств. В рамках данной работы рассмотрен такой класс подобных локальных подсистем, как – внутреннее энергоснабжение атомных электростанций (АЭС). На данные локальные ЭЭС по существующим оценкам приходится порядка 1,5 % всех энергоресурсов, потребляемых в данном сегменте в РФ .

Существенные резервы повышения качественных и количественных показателей распределения технологических перетоков мощности и снижения потерь электроэнергии в системах внутреннего энергопотребления АЭС (собственные нужды атомных электростанций и инфраструктуры, связанной с ними) заключается в модернизации и совершенствовании средств интеллектуализации программно-алгоритмических элементов СУ, построенных иерархическим образом. Отдельный акцент при этом отводится реализации современных

математических методов и средств организации информационных технологий в ходе организации «Умных сетей» – Smart Grid.

Рассматриваемые СУ в локальных системах внутреннего энергопотребления АЭС должны обладать адаптивными свойствами, что на практике организуется с помощью создания элементов автоматизированной системы диспетчерского управления (АСДУЭ), в которой производится накопление и анализ информационных потоков о локальной ЭЭС с целью выработки оптимальных воздействий в силовых элементах (передача и потребление электроэнергии и мощности).

В современных источниках исследованию аппаратной части структуры и элементов локальных ЭЭС отведено большое количество публикаций. В частности, отметим работы В.Э. Воротницкого, Ю.С. Железко, А.И. Зайцева, Ю.Г. Шакиряна, А.К. Шидловского, В.Н. Казанцева. Значительной проблемой при реализации данных наработок к вопросу оптимизации локальных ЭЭС энергораспределения применительно к собственным нуждам АЭС, является выполнение требования экономической целесообразности при высоком уровне капиталовложений в короткие сроки, что делает подобные инвестпроекты малопривлекательными с точки зрения заинтересованных лиц и оборачиваемости активов.

Аспектам оптимального управления, например, разработке математических методов и алгоритмов с повышенной точностью функционирования применительно к локальным ЭЭС посвящены работы Б.И. Аюева, В.Л. Бурковского, А.З. Гамма, С.Л. Подвального.

Отдельно отметим, что в настоящее время очень мало внимания уделяется учёту и последующему анализу неопределённых и слабоформализуемых факторов, влияющих на функционирование систем собственного энергопотребления АЭС. Основной упор осуществляется на оптимизацию функционирования частных элементов локальных ЭЭС, практически без реальной оценки взаимосвязей между смежными иерархическими структурами передачи, трансформации и потребления электрической энергии и мощности. Подобная ситуация, как следствие, является причиной чрезмерной энергоёмкости энергетики РФ.

Решение поставленной выше задачи с технико-экономической точки зрения наиболее перспективно при реализации планомерного внедрения адаптивных аппаратно-программных элементов СУ. Данное обстоятельство вызвано отмеченной ранее неприемлемостью исключительно аппаратной повсеместной модернизации. Аппаратно-программные АСДУЭ

энергопотребления собственных нужд АЭС позволят, с одной стороны, получить высокие показатели по экономии потерь электроэнергии и мощности, а, с другой, – добиться приемлемой экономической рентабельности.

В этой связи, актуальность темы диссертационного исследования продиктована необходимостью дальнейшего развития средств управления процессами передачи и потребления электроэнергии на основе реализации современного аппарата нечетких нейронных сетей для обеспечения качественного прогнозирования и оптимизации собственного энергопотребления АЭС.

Тематика диссертационного исследования соответствует одному из основных научных направлений ФГБОУ ВО ВГТУ «Вычислительные комплексы и проблемно-ориентированные системы управления».

Целью диссертационного исследования является снижение потерь электрической энергии и мощности, а также повышение качества переходных процессов в системах энергопотребления собственных нужд АЭС с помощью разработанных алгоритмов функционирования и моделей на основе ИНС и ННС, которые учитывают неопределённость при определении оптимальных режимов работы локальных элементов ЭЭС, в частности, с помощью класса – нечёткие нейронные регуляторы (ННР).

Задачи исследования. Для достижения данной цели в работе поставлены следующие задачи:

- осуществить анализ работы элементов локальных объектов собственных нужд АЭС, имеющей своей целью оценку перспектив повышения эффективности систем управления перетоками электроэнергии и мощности;

- оценить степень влияния неопределенных и слабоформализуемых факторов в процессах передачи, трансформации и преобразования потоков электроэнергии и мощности, а также описать их в терминах аппарата ННС;

- разработать имитационные модели, а также эффективные алгоритмы управления распределением электрической энергией и мощностью на базе ИНС (ННС), как основного элемента систем управления данного технологического процесса;

- реализовать модели оптимизации СУ локальных энергораспределительных объектов собственных нужд АЭС по показателю минимума потерь активной мощности; вместе с тем, осуществить синтез ННР локальных элементов АСДУЭ;

- создать элементы программного обеспечения, обеспечивающих реализацию алгоритмов управления и нечёткого регулирования при распределении активной и реактивной мощности в объектах собственных нужд АЭС, нечётких регуляторах;

- разработать программно-аппаратный комплекс, позволяющий осуществлять моделирование и последующий анализ эффективности применяемых средств СУ в локальных объектах собственных нужд АЭС с привлечением базы ННС.

Объект исследования: процессы управления распределением электрической энергии и мощности в системе энергоснабжения собственных нужд АЭС.

Предмет исследования: модели и алгоритмы управления процессами распределения электрической энергии и мощности в условиях существенных неопределенностей в работе технологических объектов АЭС.

Методы исследования базируются на применении аппарата теории математического моделирования, нейронных сетей и их модификации: нечётких-нейронных сетей, теории управления, теории системного анализа, теории управления, теоретических основ электротехники.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

П.4 Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация.

П.6 Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления.

П.15 Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСТПП и др.).

Научная новизна:

В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

- способ формального описания потоков энергоресурсов в локальных ЭЭС, отличающийся возможностью учёта неопределённых и слабоформализуемых факторов в базисе ИНС и ННС;

- нечёткие нейронные модели анализа состояния технологических процессов распределения энергоресурсов (электроэнергии и активной мощности), отличающиеся повышенными показателями точности

прогнозирования, а также имеющие возможность свободного масштабирования как во временной, так и в предметной области (различные элементы внутреннего энергоснабжения АЭС);

- алгоритм обучения ННС, отличающийся реализацией вариации градиентного метода, а также метода наименьших квадратов с максимальным учётом динамических свойств локальных элементов ЭЭС с присущей им существенной степенью влияния неопределённых и слабоформализуемых факторов;

- алгоритмы локальной оптимизации элементов передачи, трансформации и потребления энергоресурсов, а также элементов внутреннего энергоснабжения АЭС: трансформаторного оборудования, энергонагрузки узлов потребления ресурсов и осуществляющие минимизацию потерь электрической энергии и активной мощности на основе метода Ньютона–Рафсона;

- универсальные нечеткие регуляторы, отличающиеся возможностью комплексного учета значимых факторов, влияющих на качество организации регулирования перетоков энергоресурсов в конкретных условиях реализации систем внутреннего энергоснабжения Нововоронежской АЭС;

- структура программно-аппаратного обеспечения технологического процесса преобразования потоков энергоресурсов, а также прогнозирования и последующего анализа, отличающиеся возможностью обеспечения улучшенных показателей качества (точность прогнозирования и качество интеграции с пакетами углубленной оценки, в частности – Matlab) в сравнении с применяемыми в настоящее время в системах внутреннего энергоснабжения АЭС комплексами: РАП ОС и Rasrt-Win.

Практическая значимость работы. Разработанные в работе модели анализа, а также алгоритмы управления технологическими процессами перетоков энергоресурсов и средства их интеллектуализации (в виде элементов программно-аппаратного комплекса), позволяют повысить эффективность функционирования локальных АСДУЭ. Кроме того, данные алгоритмы могут быть применены для масштабирования реализации элементов Smart Grid к локальным ЭЭС в условиях существенного влияния на качество процессов соответствующих неопределённостей.

Применение результатов, полученных в рамках работы, становится целесообразным применительно к оптимизации перетоков электроэнергии и активной мощности в условиях неопределённых и слабоформализуемых

факторов, что осуществляется посредством минимизации потерь активной мощности в распределённых элементах ЭЭС.

Результаты диссертации могут быть использованы в проектных и научно-исследовательских организациях, занимающихся разработкой средств управления производственными объектами АЭС.

Положения, выносимые на защиту:

- способ формализованного описания процедур оптимизации энергоресурсов в локальных элементах ЭЭС по показателю минимума потерь электроэнергии, обеспечивает качество управления в условиях существенной неопределённости возмущающих факторов;

- модификация алгоритма Ньютона – Рафсона в структуре ННС для организации процесса оптимизации, обеспечивает построение НР локальных элементов управления внутренним энергоснабжением АЭС;

- нечёткие нейронные модели и регуляторы на их основе реализуют реальные условия применительно к конкретным элементам локальных ЭЭС;

- программно-аппаратная реализация предложенных моделей и алгоритмов управления технологическими процессами преобразования потоков энергоресурсов позволяет осуществлять прогнозирование состояния и последующий анализ.

Реализация результатов работы:

Результаты исследований нашли практическое внедрение в рамках системы управления производственными объектами обеспечения собственных нужд Нововоронежской АЭС.

Прогнозный эффект от внедрения достигается посредством повышения точности и качества управления, и может быть представлен в виде уменьшения абсолютного значения потерь активной мощности в сопоставлении с применяемыми в настоящее время (классическими) версиями АСДУЭ.

Отметим, что результаты исследования были внедрены в учебный процесс кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах Воронежского государственного технического университета в таких дисциплинах, как: «Системный анализ», «Методы искусственного интеллекта в управлении», «Теория систем управления».

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-практических конференциях: Альтернативная и интеллектуальная энергетика – 2018 сб. тр. междунар. научн. – практ. конф. Воронежский

государственный университет; Антропоцентрические науки: инновационный взгляд на образование и развитие личности – материалы IX Международной научно-практической конференции, 2019; Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве. Труды Международной научно-практической конференции, посвящённой памяти д.т.н., профессора Зайцева Александра Ивановича 21-23 ноября 2019; Альтернативная и интеллектуальная энергетика материалы II Международной научно-практической конференции 16-18 сентября 2020; Intellectualization of Production Facilities Management in Conditions of Uncertainty. In: Silhavy, R., Silhavy, P., Prokopova, Z. (eds) Data Science and Intelligent Systems. CoMeSySo 2021. Lecture Notes in Networks and Systems (Zurich, Switzerland, 17 November 2021, а также на научных семинарах кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах ВГТУ (2018-2022 г.г.)

Публикации. Результаты, выполненных в диссертации исследований, изложены в 12 работах, из них 3- в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 4 публикации в изданиях, индексируемых в базе цитирования Scopus, 1-свидетельстве о регистрации программы для ЭВМ. В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично соискателю принадлежат: в [3,7,9,11] – анализ элементов локальных объектов внутреннего энергоснабжения АЭС; в [1,2,6,10] – алгоритмы функционирования моделей управления процессами перетоков энергоресурсов применительно к объекту приложения; в [4,5,12] – модели и аппаратные средства оптимизации элементов локальных ЭЭС.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Общий объём диссертации 165 страниц, в том числе 44 рис., 9 таблиц; в дополнение к основной части оформлено 6 приложений на 35 страницах. Библиографический список включает 148 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении подтверждена актуальность темы диссертационной работы, поставлены и описаны цели, задачи, научная новизна, практическая значимость, результаты внедрения, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе произведён комплексный анализ элементов современных электроэнергетических систем (ЭЭС) применительно к

локальным структурам технологического процесса распределения, трансформации и потребления потоков электроэнергии и мощности. Отдельно отмечен процесс энергопотребления собственных нужд АЭС. Отмечены главные показатели качества и эффективности рассматриваемых процессов, в частности: значение напряжения питания, а также многокритериальный показатель – величина потерь активной электроэнергии (мощности) – её минимизация. При этом, обязательным требованием является поддержание стабильности важнейшей характеристики ЭЭС: частоты питающей сети.

Детально осуществлено рассмотрение структуры узлов энергопотребления. Отмечены существующие модели распределённых локальных ЭЭС (в частности, внутреннего энергоснабжения АЭС).

Особо стоит отметить описание элементов концепции Smart Grid в базе искусственных нейронных (ИНС) и нечётких нейронных сетей (ННС), а также регуляторов на их основе. Подобные элементы естественным образом позволяют учесть факторы неопределённости и неполноты информации, влияющих на степень потребления энергоресурсов.

Так, на рис. 1 приведена структурная схема построения элементов АСДУЭ внутреннего энергопотребления АЭС на базе применения методов ИНС (ННС). Следует отметить наличие в подобной системе модулей, призванных учесть организационно - технические и геолого – климатических факторы неопределённости, влияющие на управление локальной ЭЭС.

Данная структура состоит из следующих модулей:

- уровень типовых элементов: СУ распределительного энергокомплекса, ЛЭП; объектов потребления электрической энергии и мощности (различные типы электрической нагрузки);
- уровень объединения нескольких типовых модулей: блоки передачи энергоресурсов, узлы электроснабжения, факторы внешней среды;
- СУ верхнего уровня: представляют собой организацию методологии и подходов в комплексной оптимизации вышеотмеченных модулей после определения соответствующих управляющих воздействий на анализ динамики параметров локальной ЭЭС.

Подобная система позволяет наиболее гибко учесть многообразие изменяющихся внешних и внутренних предпосылок для формирования оптимального электропотребления на объектах собственных нужд НВ АЭС.

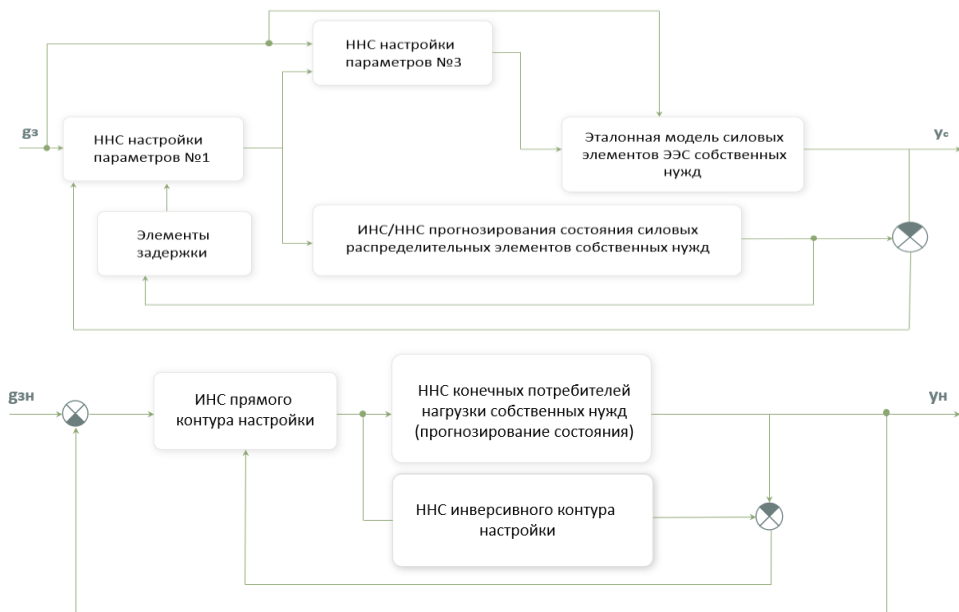


Рис. 1 Структурная схема построения элементов АСДУЭ внутреннего энергопотребления АЭС на базе применения методов ИНС (ННС)

Подробно осуществлено выделение цели и задач исследования, которые основаны на применении адаптивных ИНС и ННС моделей регулирования динамики энергораспределения в объектах собственных нужд НВ АЭС.

Во второй главе подробно рассмотрены вопросы управления потоков электроэнергии и мощности в локальных распределительных объектах на основе ННС как базы, направленной на повышение энергоэффективности и качества оптимизации систем энергораспределения в части организации соответствующих структурных элементов АСДУЭ.

Стек задач, связанных с управлением динамикой потоков активной электроэнергии и мощности в локальных ЭЭС в оперативном режиме, является наиболее сложным в решении. Это связано с необходимостью учёта онлайн влияния, оказываемого неопределёнными и слабоформализуемыми факторами (функциональные зависимости динамики

от сезонности, дня недели, потребности производственных предприятий, степень освещённости) на структурные элементы рассматриваемых систем.

Для решения отмеченных задач видится наиболее эффективным применение ННС и нечётких нейронных регуляторов (ННР) на их основе. В основу функционирования подобных систем предлагается интеграция алгоритма Мамдани совместно с применением рекуррентной нейронной сети (1):

$$F^k : \text{если } q(t-1) \text{ есть } Q_1^k \text{ и, ..., и } q(t-r) \text{ есть } Q_r^k, \quad (1) \\ \text{то } \mathcal{Y}(t) = A^k, k=1, 2, \dots, n$$

где F^k – набор правил; $q(t) = (q_1(t), \dots, q_m(t))$ – вектор входных переменных; $\mathcal{Y}(t)$ – вектор выходной величины; Q_1^k, Q_r^k – области значений входных (предпосылочных) значений; A^k – множество выходной (заключительной) части правил.

ННС, предлагаемая в качестве базовой в данной работе, является гибридным методом, который совмещает подходы нечётких сетей для отображения сложноформализуемых нелинейных правил, и ИНС – для решения задачи аппроксимации. Подобная организация решает одновременно две задачи: придаёт нелинейной аппроксимации (ИНС) существенно большие возможности при работе с нечёткими входными данными; а также в целом существенно повысить точность прогнозирования временных рядов в сравнении с использованием каждого метода по отдельности.

На рис. 2 представлен алгоритм, отражающий оптимизацию локальных систем распределения электроэнергии и мощности, реализованный на базе метода Ньютона – Рафсона.

Опишем подробнее алгоритм оптимизации элементов собственных нужд НВ АЭС:

Шаг 1. Задаётся первоначальный вектор определяемых переменных в предшествующие дискреты времени, в частности – величины активной и реактивной мощности.

Шаг 2. Производится проверка граничных условий.

Шаг 3. Осуществляется прогноз активной - $P_{ННРi}(U^{(P)}; \theta^{(P)})$ и реактивной $Q_{ННРi}(U^{(P)}; \theta^{(P)})$ мощностей в будущих периодах с помощью ННР.

Шаг 4. Определяется вектор невязки мощностей в узлах, для которых $f(F^p)$ - является вектором небалансов p -ой итерации; $\bar{P}(U^p), \bar{Q}(U^p)$ – значения активной и реактивной мощности в узле.

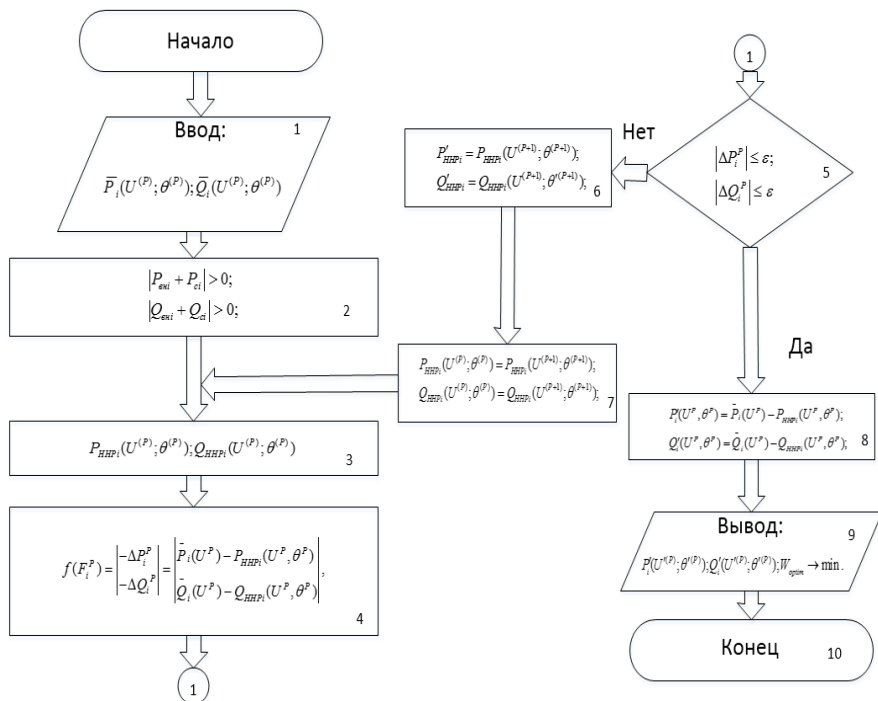


Рис. 2 Блок – схема алгоритма оптимизации по критерию минимума потерь активной мощности элементов электроснабжения собственных нужд НВ АЭС

Шаг 5. Осуществление анализа обучения с заданной погрешностью: $|\Delta P^p| \leq \varepsilon; |\Delta Q^p| \leq \varepsilon$. При условии выполнения отмеченного условия, расчёт завершается выдачей результатов оптимизированных параметров потоков мощности: 8,9; в противном случае производится переход к шагу 6.

Шаг 6. Поиск корректировочных параметров векторов активной и реактивной мощности с помощью ННР.

Шаг 7. Ввод скорректированных векторов активной и реактивной мощности, которые были получены с помощью повторного (уточняющего) цикла ННР.

Изменяемыми показателями в рассмотренном алгоритме служат модуль и амплитуда напряжения в расчётных узлах, а также - настройки ННР, которые входят в подсистемы управления энергоресурсами в ЭЭС.

Реализованная модификация ННС, с учётом выбора термов входных и выходных переменных, алгоритмов функционирования и использованием соответствующих обучающих выборок, позволяет осуществлять управление динамикой энергоснабжения собственных нужд АЭС с более высокими показателями качества, чем в случае применения стандартного в таких случаях подхода «прогнозного коэффициента роста/спада» (регрессионная модель). Как следствие, элементы АСДУЭ, построенные на основе подобных адаптивных методов, позволят добиться лучшей оптимизации по показателю минимизации потерь активной электроэнергии и мощности.

Третья глава подробно отражает алгоритмические решения, принятые в рамках настройки ННС и ННР в рамках создания системы диспетчерского управления внутренним энергоснабжением АЭС (на конкретном примере – технологические процессы на НВ АЭС).

В частности, представлена оптимизационная модель управления динамикой распределения энергоресурсов, реализованная посредством метода Лагранжа, а также Ньютона-Рафсона. Даны оценки качественных и количественных свойств обоих типов реализации в контексте использования в рамках систем внутреннего энергопотребления АЭС.

Динамика локальных структурных элементов ЭЭС полноценно и удобно может быть рассмотрена в виде статических характеристик нагрузки (СХН) в разные временные дискреты:

$$\begin{cases} P(U) = P_{ном}(U)[a_0 + a_1 \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}}\right) + a_2 \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}}\right)^2 + \dots + a_n \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}}\right)^n + \xi_P(U)]; \\ Q(U) = Q_{ном}(U)[b_0 + b_1 \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}}\right) + b_2 \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}}\right)^2 + \dots + b_n \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}}\right)^n + \xi_Q(U)]; \end{cases} \quad (2)$$

где $P(U), Q(U)$ - фактическое значение активной и реактивной мощности; $P_{ном}(U), Q_{ном}(U), U_{ном}$ - номинальные значения активной и реактивной мощности, а также напряжения; $\xi_P(U), \xi_Q(U)$ - функции

активной и реактивной мощности от неопределённых факторов; $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ - коэффициенты технологических параметров; U - напряжения питания, как функция от времени.

Модель минимизации потерь активной мощности в распределительных элементах потребления локальных ЭЭС представляется наиболее целесообразным реализовать в виде:

$$W = \sum_{i=1}^k W_i = \sum_{i=1}^k \left[\frac{\sqrt{P_i(U)^2 + Q_i(U)^2} \cdot R_{ji}}{U_i^2} \cdot \left(\frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta U_{\%i}}{100}\right)^2} - 1 \right) + \Delta P_{xci} \cdot T_{pi} \cdot \left(\frac{U_i}{U_{номi}} \right)^2 + \Delta p_{корi} \cdot L_i \cdot k_{Uкорi} \right] \rightarrow \min, \quad (3)$$

где W - потери активной мощности в элементах внутреннего энергоснабжения АЭС; R_j, L - эквивалентные активное сопротивление, а также протяжённость соответствующих структурных элементов энергораспределительных систем; $\Delta U_{\%}$ - изменение значения напряжения питания в процентном выражении от номинала; ΔP_{xci} - мощность потерь холостого хода; T_{pi} - фактическое время работы оборудования; $\Delta p_{корi}$ - удельные потери на корону; $k_{Uкорi}$ - коэффициент потерь на корону.

Обязательно выполнение следующих граничных условий:

$$\begin{cases} |P_{внi} + P_{ci}| > 0; \\ |Q_{внi} + Q_{ci}| > 0; \\ i = 1, \dots, k; \end{cases} \quad (4)$$

где $P_{внi}, Q_{внi}$ - внутренние, а P_{ci}, Q_{ci} - внешние величины активной и реактивной мощности элементов внутреннего энергоснабжения АЭС.

Основными модулями являются база данных распределения параметров энергосистемы в прошлых дискретах - $P(i)$; данные об изменении режимов внутреннего энергоснабжения АЭС; экспертная система актуализации векторов учёта параметров энергораспределения - $M(i), S(i)$; а также ННР управления распределением мощности. Задачей АСДУЭ служит расчёт вектора $P(i+r)$ на будущий период $-(i+r)$ относительно текущего i -го момента времени.

Структура организации ННР процесса управления распределением мощности в системе внутреннего энергоснабжения АЭС приведена на рис.3.

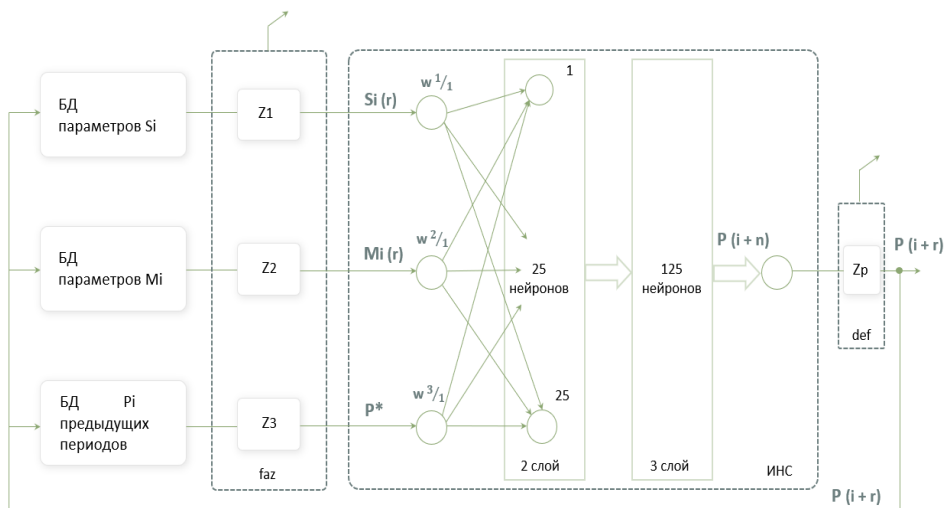


Рис. 3 Структура организации ННР управления распределением мощности в системе внутреннего энергоснабжения АЭС

Входные параметры ННР: вектора циклических, а также случайных факторов среды - $M(i)$, а также плановая структура (режимность) локальных элементов внутреннего энергоснабжения АЭС (набор конкретных средств передачи и потребления электрической энергии и мощности) - $S(i)$. Ещё одним входным вектором является база данных предшествующих периодов, отсортированная по дням недели.

В качестве выхода ННР организован вектор прогнозирования распределения полной мощности в оперативном горизонте на заданные интервалы будущих дискретов.

Отмечен факт достижения расчётной ошибки прогнозирования динамики энергопотребления собственных нужд НВ АЭС в краткосрочном и среднесрочном периодах до значений (1,5 – 3) %, при минимизации потерь активной мощности в распределительных элементах.

В четвёртой главе произведён синтез нечётких нейронных регуляторов (ННР) на основе базы ННС, адаптированной в рамках методов оптимизации системы «в целом», рассмотренных в третьей главе.

Для оптимизации режимов по напряжению и реактивной мощности, как правило, используется алгоритм, содержащий 2 базовых блока – представлена на рисунке 4:

- интерфейсный модуль, который организован с учётом пользовательского удобства и высокого качества адаптивности под индивидуальные настройки;
- расчетный модуль, осуществляющий непосредственный расчёт элементов внутреннего энергоснабжения АЭС с целью определения оптимальных значений.

В первом блоке реализуется формирование базы данных исходных параметров силовых автотрансформаторов, трансформаторов, шунтирующих реакторов, батарей статических конденсатор на подстанциях, ЛЭП и основных потребителей электрической мощности.

Во втором блоке организован расчёт установившегося режима с помощью формирования матриц узловых проводимостей, характеризующих узловые токи источников, через которых, как следствие, осуществляется решение уравнений относительно неизвестных значений узловых напряжений.

Подробно рассмотрены структура ННР, функции принадлежности термов входных переменных, типы функций активации, применяемые для организации оптимизационного блока.

Наилучшие результаты в рамках проведённых исследований показала реализация ННР по принципу управляющей ННС, функционирующей на основе задающего воздействия, а также выхода корректирующей ИНС (представляющей собой эталонную модель объекта управления) совместно с ошибкой управления, получаемой непосредственно от объекта управления.

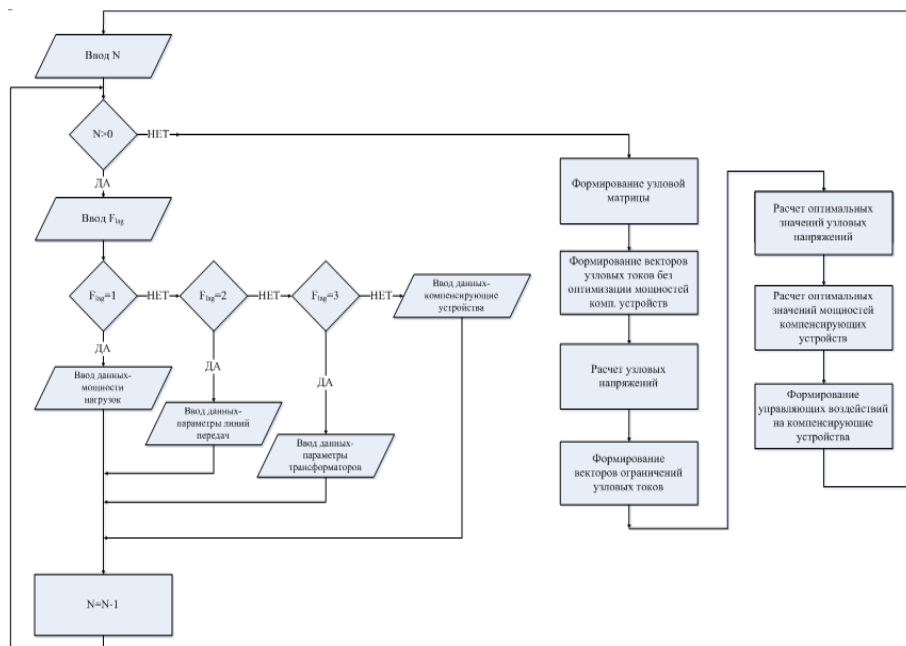


Рис. 4 Структура функционирования оптимизационного алгоритма ННР управления распределением активной мощности в локальной ЭЭС собственных нужд НВ АЭС

На рис.5 отражена структурная схема ННР, использующего фактическую динамику вектора управляющей функций в i -тый дискрет времени – $g_{эл.}(i)$, а также выход эталонной модели объекта управления – $y_{ov}(i)$. Адаптивность данного решения обеспечивается с помощью векторов подстройки: ω_1, ω_2 , которые осуществляют корректировку входных термов и активационных функций.

Так как $g_{эл.}(i)$ и $y_2(i+r)$ входят в структуру векторов $P(i), M(i), S(i)$ для ННР, приведённой на рис.3, их структура аналогична отмеченной ранее тройке векторов.

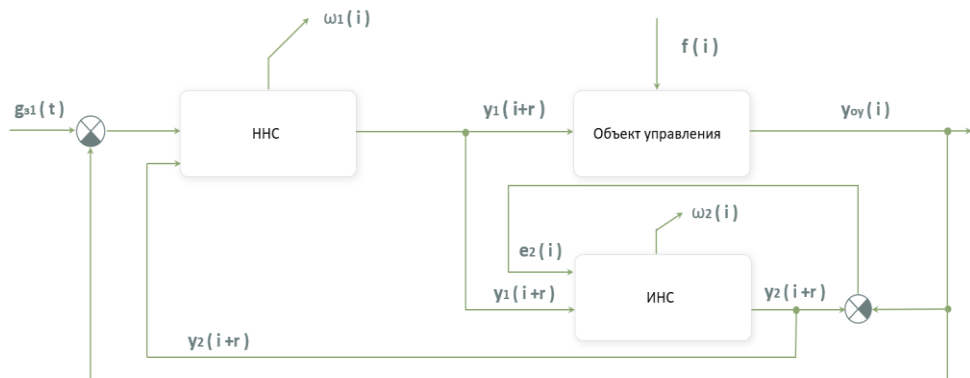


Рис.5 Структурная схема ННР на основе эталонной модели, а также ИНС для организации различных уровней иерархии в рамках систем внутреннего энергоснабжения АЭС

В рамках исследования было осуществлено варьирование термов принадлежности переменных входных векторов. В результате наилучшие результаты по показателю точности модели показала П-образная функция принадлежности. Отметим, что выходной терм был организован в виде линеаризованной величины.

Эталонная модель при данном подходе организована в виде ИНС, являющейся многослойным персептроном, и функционирующей на базе алгоритма скоростного обратного распространения ошибки. Структура сети является переменной, имеет взаимосвязь с объектом управления – системой внутреннего энергоснабжения АЭС.

На примере имитационных моделей в ПО Matlab, осуществлено построение ННР применительно к объектам передачи, трансформации и потребления энергоресурсов, а также узла энергоснабжения собственных нужд НВ АЭС. Дана оценка эффективности полученных систем по показателю минимизации потерь активной электроэнергии и мощности в сравнении с классическими реализациями регуляторов на основе подхода «прогнозного коэффициента роста/спада» (регрессионная модель).

В пятой главе рассмотрена программно-аппаратная реализация управления перетоками электрической энергии и мощности в системах внутреннего энергоснабжения НВ АЭС. Приводится детальная структура, а также стадии функционирования данного комплекса.

На рис. 6 приведена структура программного комплекса контроля динамики распределения потоков мощности в системе внутреннего энергоснабжения НВ АЭС.

Проработан пользовательский интерфейс, позволяющий оперативно решать задачи, стоящие перед АСДУЭ с одновременным решением основной задачи по оптимизации величины потерь энергоресурсов в системе внутреннего энергоснабжения АЭС.

В элементах разработанного программного обеспечения заложена опция глубокой интеграции выходных прогнозных данных по энергопотреблению локальными объектами внутреннего энергоснабжения НВ АЭС как в оперативном, так и в среднесрочном режиме в инструментарий стандартных приложений Microsoft Office.

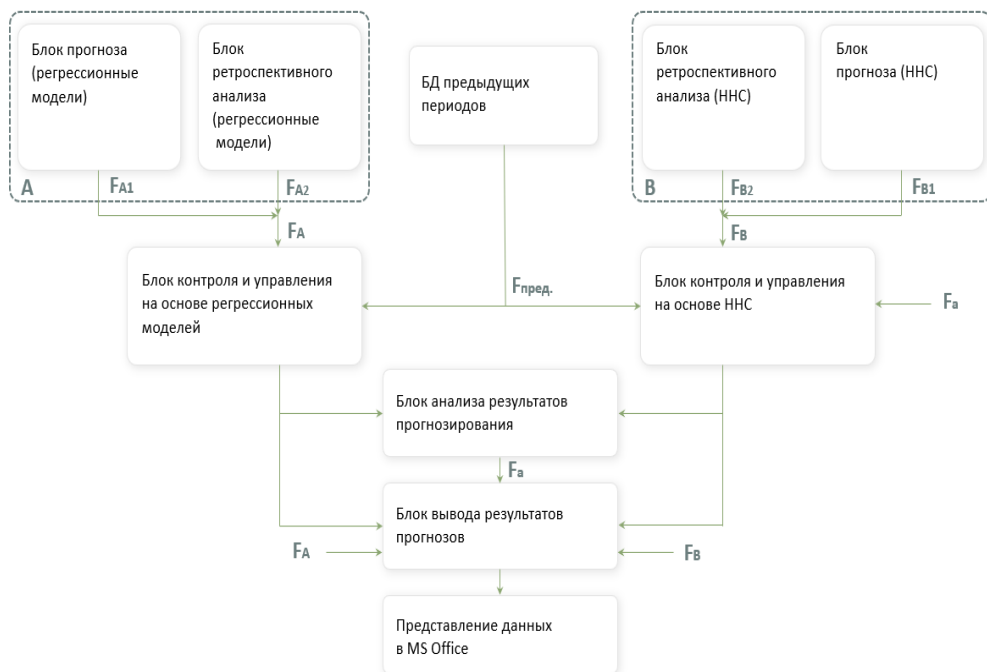


Рис.6 Структура программного комплекса контроля динамики распределения потоков мощности

На рис.7 на примере зимнего режимного дня показаны результаты функционирования разработанного комплекса.

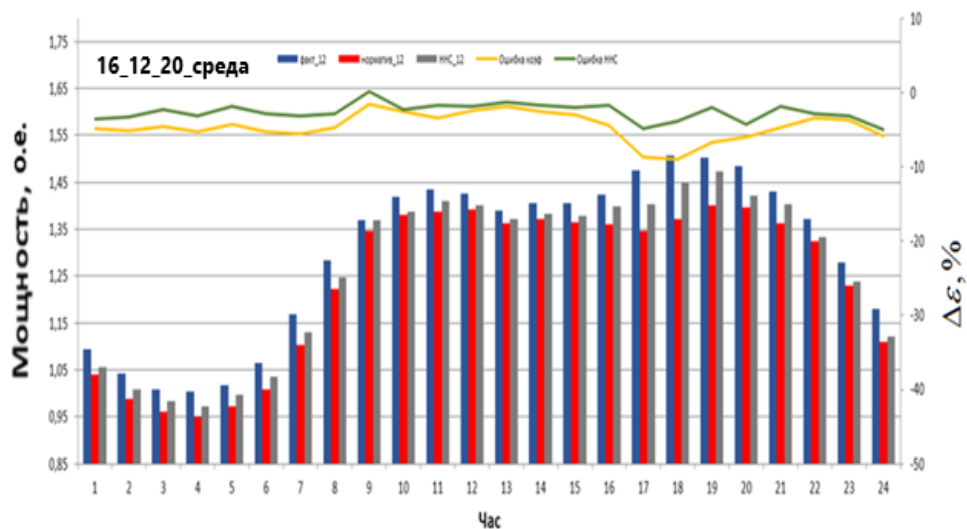


Рис.7 Прогнозирование динамики энергопотребления в системе внутреннего энергоснабжения АЭС (16.12.20– режимный день/будни): фактическое значение / нормативное значение / показатели ННС в о.е. от номинальной нагрузки; ошибка работы систем прогнозирования на базе нормативного подхода в сопоставлении с ННС в %

Результаты исследования демонстрируют факт достижения ошибки прогнозирования на основе реализации оптимизационной модели, организованной по критерию минимума потерь активной мощности в системе собственного энергоснабжения АЭС с применением ННС, составляющей (1,5 – 3) % от фактического значения.

Организация подобных систем управления позволит существенно повысить экономическую эффективность применяемых в настоящее время методов и регламентов для обеспечения снабжения отмеченного класса электроэнергетических систем. Точность планирования систем собственного энергоснабжения АЭС в данный момент (до внедрения алгоритмов на основе ННС) составляет (10 – 17) % от фактического значения.

Заключение

В результате проведенных исследований в работе получены следующие основные результаты:

1. Разработан способ формализованного описания потоков энергоресурсов, контролируемых СУ внутреннего энергоснабжения АЭС, отличающийся возможностью учёта неопределённых факторов посредством ННС.

2. Разработаны нечёткие нейронные модели управления процессами распределения энергоресурсов, которые отличаются более высокими показателями точности прогнозирования и анализа, как в оперативном, так и в среднесрочном периодах по сравнению с существующими результатами на основе регрессионных моделей.

3. Разработан алгоритм настройки ННС, который основан на применении градиентных методов в совокупности с методом наименьших квадратов, в рамках которого есть возможность учёта неопределённых факторов производственных объектов внутренних потребительских ресурсов АЭС.

4. Разработаны и апробированы алгоритмы локальной оптимизации элементов ЭЭС (трансформаторное оборудование, узловая энергонагрузка), осуществляющие минимизацию потерь электрической энергии и активной мощности по методу Ньютона – Рафсона.

5. Произведено построение универсальных НР, которые позволяют комплексно учитывать значимые факторы неопределённости, влияющие на качество организации регулирования перетоков энергоресурсов в конкретных условиях реализации систем внутреннего энергоснабжения Нововоронежской АЭС.

6. Разработано программно-аппаратное обеспечение процессов управления потоками энергоресурсов, прогнозирования их состояния и последующего анализа, отличающиеся высокими показателями качества и удобным пользовательским интерфейсом.

Научные публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Сидоренко Е.В. Применение нечётких нейронных сетей для оптимизации функционирования промышленных предприятий / Е.В. Сидоренко, А. Л. Руцков, А.В. Бурковский, О.О. Желтикова // Системы управления и информационные технологии. – 2019.– № 2 (76). – С. 40-43.

2. Сидоренко Е.В. Повышение эффективности управления потреблением собственных нужд АЭС с применением нейронных сетей / Е.В. Сидоренко, А. Л. Руцков, Акиндинова Е. В. // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2019.– № 5. – С. 39-42.

3. Сидоренко Е.В. Реализация элементов программно-алгоритмического комплекса оптимизации технологических процессов на базе адаптивных методов / Е.В. Сидоренко, А. Л. Руцков, В.Л. Бурковский, Я. П. Фёдоров // Энергетические системы. – 2019.– № 1. – С. 169-175.

Научные публикации, индексируемые в Scopus

4. Sidorenko E. V., Burkovsky V. L., Bocharov V.Z. and Dobrynin S. L. 2021 Intellectualization of production facilities management in conditions of uncertainty. – COMESYSO: Proceedings of the computational methods in systems and software 526 –536.

5. Sidorenko E. V., Kozhin A. S., Danilov A.D., Burkovsky V. L. and Burkovsky A. V. 2020 Reactive power balancing transformers in control systems for electric drives of direct and alternating current. – IOP Conference series: Materials science and engineering 62056.

6. Sidorenko E. V., Rutskov A. L., Burkovsky V. L. and Fedorov Y. P. 2020 Elements realization of software algorithmic system optimization of technological processes based on adaptive methods. – IOP Conference series: Materials science and engineering 012034.

7. Sidorenko E. V., Kozhin A. S., Danilov A.D., Burkovsky V. L. and Gusev K. Yu. 2020 Investigation of automatic electric drives balancing transformers with lead control angles. – IOP Conference series: Materials science and engineering 62054.

Свидетельства о регистрации электронного ресурса

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016662274 от 13.05.2022 «Программа прогнозирования выработки и потребления электрической энергии в объектах собственных нужд АЭС» / Е.В. Сидоренко, А.Л. Руцков, В.Л. Бурковский.

Публикации в трудах международных и всероссийских конференций

9. Сидоренко Е.В. Интеллектуализация управления внутренними потребительскими ресурсами АЭС на основе нейронных сетей / Е. В. Сидоренко, А.Л. Руцков, В. Л. Бурковский // Альтернативная и интеллектуальная энергетика – 2018 сб. тр. междунар. научн. – практ. конф. Воронежский государственный университет, 2018. - С. 56-57.

10. Сидоренко Е.В. Разработка методов оптимизации объектов для передачи электроэнергии с использованием нечетких нейронных сетей / Е. В. Сидоренко // Антропоцентрические науки: инновационный взгляд на образование и развитие личности – материалы IX Международной научно-практической конференции, 2019. - С. 513-515.

11. Сидоренко Е.В. Повышение эффективности предприятий на основе реализации аппаратно-программного комплекса прогнозирования энергопотребления / Е.В. Сидоренко, А. Л. Руцков, В.Л. Бурковский // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве. Труды Международной научно-практической конференции, посвящённой памяти д.т.н., профессора Зайцева Александра Ивановича 21-23 ноября 2019. – С. 179 – 182.

12. Сидоренко Е.В. Улучшение гармонического состава входного тока компенсационного преобразователя / Е.В. Сидоренко, В.Л. Бурковский, А. С. Кожин // Альтернативная и интеллектуальная энергетика материалы II Международной научно-практической конференции 16-18 сентября 2020. – С. 257 – 258.

Подписано в печать 03.02.2023
Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.
Усл. печ. л. 1,0 Тираж 100 экз. Заказ №
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»
394006 Воронеж, 20-летия Октября, 84