

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АСТУЭ И УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ****Е.А. Энгель (Абакан)**

Электроэнергетические объекты современной энергетики работают в условиях постоянно изменяющихся климатических, нагрузочных и случайных воздействий, являются сложными, нелинейными техническими объектами (в том числе многорежимными, состоящими из семейства разнородных структурных или функциональных подсистем) вследствие чего моделирование и управление ими классическими методами в условиях воздействия различных внешних и внутренних факторов неопределенности затруднено, в то время как интеллектуальные методы обеспечивают требуемое качество управления [1]. Новая виртуальная реальность, обеспечиваемая технологиями моделирования нелинейных электроэнергетических объектов (НЭО) и возникшая как результат развития интеллектуальных технологий управления в электроэнергетике, представляет новый вид информационной производственной деятельности электроэнергетических систем. Энергосбережение НЭО – комплексная проблема, сопряженная с повышением эффективности мониторинга и управления актуальность которой утверждена на федеральном уровне как приоритетного направления развития науки, технологий РФ, в соответствии с законом №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» и в рамках 8 технологических платформ, принятых правительственной комиссией по высоким технологиям и инновациям.

Эффективность систем автоматического управления НЭО при внешних возмущающих воздействиях обеспечивается двумя традиционными способами: основным методом теории инвариантности (Г.М. Уланов, Б.Н. Петров, А.Г. Ивахненко, В.В. Солодовников) – комбинированным управлением с вводом в контур НЭО производных от задающих и возмущающих воздействий; методами исследования зависимости свойств систем управления от изменения параметров НЭО теории чувствительности (Р.М. Юсупов, М. Вукобратович). Однако, применение указанных методов (оптимальных, экстремальных, стохастических и т. д.) существенно затруднено и ограничено в условиях нечеткой, неточной информации поскольку НЭО не формализуем [1]. Методы анализа и синтеза нелинейных систем исследовались в работах ученых: А.М. Ляпунова, Р. Калмана, А.А. Воронова, А.А. Красовского, А.П. Крищенко, Н.Б. Филимонова и других ученых. В последние годы в сложных технических системах постепенно интеллектуальные регуляторы на базе нечеткой, нейросетевой или нейро-нечеткой технологии эффективно заменяют широко используемые аналоговые ПИД-регуляторы [1].

Классические методы управления вследствие описания большим количеством дифференциальных уравнений (приводящего к увеличению объемов расчетов и времени их обработки) не могут существенно повысить качество, быстродействие и точность управления НЭО в условиях нечеткой, неточной информации, а управление на основе нечеткой логики и нейросетей обеспечивает следующие преимущества (А.И. Галушкин, В.Г. Редько, В.А. Терехов): идентификация режимов посредством эффективного анализа статических и динамических характеристик; простота оптимизации сложных законов управления, минуя процесс разработки математических моделей НЭО [1]. Указанные недостатки традиционных технологий управления на фоне преимуществ нечетких и нейросетевых методов актуализируют разработку эффективной энергосберегающей технологии моделирования автоматизированной

системы технического учета электроэнергии (АСТУЭ) и управления НЭО на базе адаптивного нейроконтроллера в условиях воздействия различных внешних и внутренних факторов неопределенности.

Значительный научный вклад в теорию и практику создания нечетких и нейросетевых систем управления внесли ученые: Л. Заде, Д.А. Поспелов, В.Г. Редько, В.А. Терехов, Ю.А. Борцов, Ф. Вассерман, Н. Хассоун, А.И. Галушкин Макаров И. М., Лохин В. М, Манько С. В., Романов М. П., Ситников М. С. и др. Интеллектуальная электроэнергетическая система с активно-адаптивной сетью разрабатывается на основе интеллектуальных методов, в том числе прогнозирования, в исследованиях ученых Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН: Н.Н. Бахтадзе, И.Б. Ядыкина, Е.М. Максимова, Н.Е. Максимовой и др. [2]. В рамках концепции интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью целесообразна интеграция АСТУЭ с интеллектуальной системой автоматического управления (ИСАУ) НЭО. Актуальность решения данной проблемы на основе адаптивного нейроконтроллера [1] обусловлена появлением класса НЭО, для которых традиционные технологии управления оказываются непригодными.

Формирование нейросетевой топологии (задаваемой количеством нейронов и слоев) – серьезная математическая проблема, основанная на использовании свойств аппроксимируемой функции, решается в данном исследовании методом структурно-параметрического синтеза интеллектуальной системы управления в виде нечеткой селективной нейросети [3], нейросетевая топология которой формируется в соответствии с топологией структурных или функциональных подсистем НЭО, на основе нейро-эволюционного подхода, в том числе с использованием технологии ENSO, предложенной Р. Миккелайненом. Методы интеллекта управления среднего уровня (обработка инструктивных правил) разработанной нечеткой селективной нейросети используют нечеткую логику, развиваемую исследованиями Л. Заде, Н.Г. Ярушкиной и других ученых. Методы низшего уровня интеллекта управления разработанной нечеткой селективной нейросети развивают многоцелевые эволюционные вычисления, исследуемые в работах Р. Мииккулайнена, Ивахненко А. Г. и других ученых, однако имеют ряд отличий: 1) реализовано взаимодействие низшего (нейросетей) и среднего (обработки инструктивных правил базы знаний) уровней интеллекта управления в форме связи соответствующих (нейросетевых и нечетких) слоев нечеткой селективной нейросети; 2) метод настройки низшего уровня (нейросетей) нечеткой селективной нейросети составляет масштабируемый (в зависимости от ограничений по вычислительным ресурсам, горизонта управления, а также значений критериев устойчивости и эффективности системы управления НЭО) сценарий настройки, сочетающий этапы оптимизации (реализуемые методами локальной оптимизации (квазиНьютоновские) и/или глобальной оптимизации (в том числе обеспечивающие возможность снижения размерности задачи)) и эволюции (реализующие многоуровневую кооперативную коэволюцию с использованием технологий NEAT, ENSO [4] и разработанных алгоритмов кросс-валидации, использующих критерий несмещенности метода группового учета аргументов, предложенного Ивахненко А. Г.)

Системное моделирование сложных НЭО и систем управления ими позволяет заменить реальный эксперимент, который невозможно произвести без нарушения требований безопасности энергосистем ввиду их высокой стоимости, на эксперимент с «виртуальной реальностью» – моделью системы управления НЭО вместе с интегрированной АСТУЭ.

В работах Ванга (Wang), Вичерта (Wichert), Родольфо (Rodolfo), Джереми (Jérémy) и других предлагаются отдельные решения по моделированию систем управления НЭО, в том числе состоящих из семейства разнородных структурных или функциональных подсистем, однако в них не используется агрегирование информации о состоянии указанных подсистем и прогнозирование состояния НЭО, что снижает эффективность используемых подходов. Новизна данного исследования заключается в разработке и создании энергосберегающей технологии моделирования АСТУЭ и управления НЭО с улучшенными показателями эффективности, в сравнении с существующими аналогами. Новизна сопряжена с обеспечением решения ключевых задач: формализации исходных данных и цели управления; создания адекватной интеллектуальной модели объекта управления; реализации алгоритма управления, гарантирующего требуемое качество управления и возможного изменения цели управления в неполнозаданных условиях при случайном характере внешних возмущений.

Математическое обеспечение разработанной энергосберегающей технологии моделирования АСТУЭ и управления НЭО основано на использовании комплекса моделей НЭО и энергосистемы, а также адаптивного нейроконтроллера, реализуемых средствами Matlab Simulink. Моделирование энергосберегающей технологии АСТУЭ на базе адаптивного нейроконтроллера реализуется настроенной нечеткой селективной нейросетью, осуществляющей оптимальное энергосбережение на основе прогнозирующей двойственной нейросети (при сохранении эффективности и устойчивости ИСАУ НЭО). Дважды двойственные нейросетевые структуры эффективно распараллеливают решение задач прогнозирования, оптимизации и устойчивости НЭО, что существенно сокращает вычислительные затраты по сравнению с традиционными способами вычисления градиентов.

В данном исследовании на основе разработанного метода синтеза адаптивного нейроконтроллера [1] (для управления НЭО) последний реализован как блок Subsystem адаптивного нейроконтроллера Simulink Matlab т.е. предложен вариант решения актуальной научной проблемы, требующей обработки знаний о поведении сложного НЭО, извлечение которых основано на использовании интеллектуальных вычислений, имитационных процедур моделирования и методов глобальной оптимизации. Блоки Subsystem ИСАУ и адаптивного нейроконтроллера Simulink обеспечивают простоту модификации и легкую встраиваемость в существующие модели НЭО Simulink.

Структурно-параметрический синтез формирует ИСАУ в виде нечеткой селективной нейросети, включающей: нейро-нечеткую базу знаний и адаптивный нейроконтроллер. Разработанный метод посредством гибридных вычислений реализует структурные и функциональные аспекты управления НЭО более эффективно, в сравнении с традиционными методами идентификации (метод частотных характеристик, метод временных характеристик, метод наименьших квадратов, метод статистических корреляционных функций), линеаризующими дифференциальные уравнения, вследствие чего описание системы управления НЭО является приближенным и снижает точность идентификации.

Блок Subsystem ИСАУ Simulink поддерживает:

- диагностическое функционирование ИСАУ в виде настроенной нечеткой селективной нейросети, обеспечивающей (на основе нейро-нечеткой базы знаний нечеткой селективной нейросети, включающей прогнозирующие двойственные нейросети) идентификацию с прогнозированием динамики НЭО и эффективное управление НЭО на базе адаптивного нейроконтроллера; указанное диагностическое функционирование на основе идентифицируемого

режима и прогнозируемого состояния НЭО, обеспечивает формирование эффективного управляющего воздействия, минимизирующего потери; для совмещения указанных функций решена актуальная проблема организации взаимодействия низшего и среднего уровней управления НЭО в следующем виде: нейросетевая обработка информации (низший уровень управления), нечеткая идентификация на ее основе режима НЭО, его прогнозируемого состояния (средний уровень управления) и нейроуправление (низший уровень управления, наименее вычислительно затратный) с учетом идентифицируемого режима;

- анализ устойчивости ИСАУ НЭО, составляющий обобщенный критерий устойчивости как нечетко-возможностную свертку частных критериев: устойчивости нейросетевой и неопределенности нечеткой подсистем; разработанный критерий устойчивости нейросетевой подсистемы управления использует нечетко-возможностную свертку следующих сравнений: если для каждого нейрона значение двойственного элемента больше значения дважды двойственного, то (производные первого порядка, разложенные в ряд Тэйлора, доминируют над производными второго порядка в  $\xi$  приближении, на основании чего делается вывод, что влияние производных высших порядков в этой области ничтожно) подсистема нейроуправления устойчива; с целью выбора наилучшего семантического пространства для идентификации НЭО разработанный критерий неопределенности нечеткой подсистемы отражает неопределенность семантического пространства как степень взаимного пересечения составляющих его нечетких множеств, формирующих БЗ нечеткой селективной нейросети; в сравнении с традиционными критериями устойчивости Ляпунова разработанные критерии формируются автоматически и гибко учитывают устойчивость разнородных подсистем управления;
- коррекцию адаптивного нейроконтроллера и нейро-нечеткой базы знаний нечеткой селективной нейросети в режиме реального времени при снижении запасов устойчивости (on-line, вычислительные затраты незначительны), корректируются весовые коэффициенты нейронов выходного слоя, имеющие линейную активационную функцию в соответствии с решением (относительно весовых коэффициентов нейронов выходного слоя) линейного матричного уравнения.

Энергосберегающая технология моделирования АСТУЭ и управления НЭО обеспечивает создание технологических знаний. Комплекс операций со знаниями в разработанной интеллектуальной технологии включает в себя следующие виды операций:

- 1) генерация и конфигурирование новых моделей;
- 2) генерация нелинейных моделей НЭО;
- 3) проведение автоматизированного эксперимента с виртуальными моделями;
- 4) генерация ИСАУ НЭО и частичная коррекция адаптивного нейроконтроллера и нейро-нечеткой базы знаний нечеткой селективной нейросети.

Расчитанные при моделировании значения параметров фотоэлектрического энергокомплекса соответствуют эталонным значениям с погрешностью менее 3 %. Сравнение с теоретическими и практическими результатами изысканий отечественных и зарубежных исследователей качественных и количественных результатов моделирования Simulink модели фотоэлектрического энергокомплекса выявило адекватность и эффективность разработанной ИСАУ на базе адаптивного нейроконтроллера. Анализ выходных характеристик фотоэлектрического

энергокомплекса в стандартных условиях, а также при различных уровнях освещённости, показал соответствие данных моделирования теоретическим и имеющимся экспериментальным значениям (погрешность результатов моделирования в серии 150 экспериментов не превысила 7 %).

При моделировании в среде Simulink Matlab разработанной интеллектуальной системы автоматического управления фотоэлектрическим энергокомплексом на базе адаптивного нейроконтроллера выявлены следующие достоинства: поддерживает режим реального времени; настроенные гибридные вычислительные структуры позволяют обрабатывать зашумленные данные, моделируя экспериментальные данные (полученные напрямую с датчиков фотоэлектрического энергокомплекса); снижение потерь фотоэлектрической системы в условиях случайных возмущений и резкого изменения внешних воздействий в среднем на 21 % в сравнении с системой управления на основе ПИД-регуляторов.

Представленная Simulink модель может быть использована как интеллектуальный имитатор фотоэлектрического энергокомплекса. Указанный интеллектуальный имитатор не только обеспечивает вычисление основных характеристик фотоэлектрической системы, но и оценивает изменение характеристик фотоэлектрического энергокомплекса в целом при различных воздействиях, приближая тем самым испытания к реальным условиям эксплуатации сложных фотоэлектрических систем.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №14-41-04025 p\_сибирь\_a*

#### **Литература**

1. Макаров И. М., Лохин В. М, Манько С. В., Романов М. П., Ситников М. С. Устойчивость интеллектуальных систем автоматического управления // Приложение к журналу «Информационные технологии». – 2013. – № 2.
2. Бахтадзе Н. Н., Моржин Ю. Н., Ядыкин И. Б. Мультиагентная интеллектуальная иммунная система электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 4. – С. 61–64.
3. Е.А. Энгель. Интеллектуальная система управления фотоэлектрическим комплексом на базе адаптивного нейроконтроллера // Энергобезопасность и энергосбережение, №2, 2015, с.32-38.
4. Miikkulainen R., Valsalam V. K., Hiller J., MacCurdy R., Lipson H. Constructing controllers for physical multilegged robots using the ENSO neuroevolution approach // Evolutionary Intelligence. – 2012. – № 5.