

## МУЛЬТИАГЕНТНАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИММУННАЯ СИСТЕМА ИЭС ААС

Ю.И. Моржин (НТЦ ОАО «ФСК»), И.Б. Ядыкин, Н.Н. Бахтадзе (ИПУ РАН)

*Рассматриваются вопросы разработки интеллектуальной системы управления электроэнергетической системы (ЭЭС) России с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС) на методов интеллектуального прогнозирования. Для предотвращения нарушения устойчивости работы ЭЭС и распознавания внешних и внутренних угроз предлагается концепция создания единой интеллектуальной иммунной системы для ЭЭС с ААС на основе мультиагентного подхода.*

*Ключевые слова:* интеллектуальная электроэнергетическая система, активно-адаптивная сеть, динамическое прогнозирование, нарушения статической устойчивости, адаптивное управление, иммунная система.

На заседании круглого стола «Умные сети – проекты будущего» Международного экономического форума в Санкт-Петербурге в 2011 г. Председатель правления федеральной сетевой компании ОАО ФСК ЕЭС О. Бударгин отметил, что создание активно-адаптивной сети как основы интеллектуальной электроэнергетической системы России является определяющим фактором обеспечения надежности, энергобезопасности, устойчивого повышения эффективности использования энергетического потенциала России.

В условиях возрастающих требований к надежности и качеству энергоснабжения и развития технологий генерации наряду с растущим износом основного технологического оборудования распределительных сетей эффективным решением проблем регулирования является создание интеллектуальных сетей. Понятие «интеллектуальные» сети означает совокупность энергетических и информационно-коммуникационных технологий, предоставляющих возможность более эффективного распределения энергии и контроля энергопотребления за счет обмена и интеллектуального управления технологической и маркетинговой информацией.

### Интеллектуальная электроэнергетическая система с активно-адаптивной сетью

ИЭС ААС энергосистема нового поколения, целью которой является обеспечение эффективного использования всех видов ресурсов (природных, социально-производственных и человеческих) для надежного, качественного и эффективного энергоснабжения потребителей энергии за счет гибкого взаимодействия ее субъектов (всех видов генерации, электрических сетей и потребителей) на основе современных технологических средств и единой интеллектуальной системы управления.

Сложность управления ЕНЭС сегодня настолько высока, что полностью централизованное управление становится неэффективным из-за наличия огромных потоков информации, когда слишком много времени тратится на ее передачу в центр, и принятие там решений. Системы управления включают ряд подсистем, обладающих различными функциональными характеристиками и взаимодействующих с различными группами операторов, часто территориально удаленными друг от друга. Поэтому некоторые элементы организационного управления должны быть переданы от центра к периферии с четким разграничением прав и информационного доступа.

Анализ современных методов разработки систем управления, силовых технических устройств энергосистемы и программно-аппаратных средств позволяет использовать в качестве системного решения мультиагентный подход [1]. В соответствии с такой концепцией система управления Единой национальной (общероссийской) электрической сети (ЕНЭС) России верхнего уровня должна представлять собой координирующую информационно-управляющую систему, функционирующую на основе соответствующих стандартизованных протоколов и интерфейсов взаимодействия.

Архитектура системы управления становится модульной, интероперабельной и расширяемой. Она строится на использовании вложенных сетевых кластеров мультиагентной системы (МАС) вертикальной интеграции, в которых работают интеллектуальные автономные агенты различного функционального назначения.

Основой функционирования интеллектуальной системы управления становится динамическая оценка и интеллектуальное прогнозирование состояния электроэнергетических систем (ЭЭС) с целью адаптивного управления и динамической поддержки принятия решений.

Функционирование энергосистемы характеризуется следующими факторами:

- частое приближение ЭЭС к предельным по устойчивости переходным режимам;
- незначительный временной интервал для принятия решений диспетчером;
- необходимость координации управления в локальных сетях крупных потребителей и глобальной электрической сети;
- необходимость автоматизации восстановления режима ЭЭС.

Перечисленные факторы требуют использования новых стратегий управления, основанных на автоматическом удержании режима энергосистемы в безопасном состоянии с гарантированным запасом устойчивости. Данную стратегию можно реализовать путем комплексного использования интеллектуальной автоматической системы определения степени статической устойчивости ЭЭС и интеллектуальной автоматической системы поддержания гарантированной устойчивости ЭЭС [2]. Использование мультиагентного подхода позволяет реализовать эту комплексную стратегию управления, что приведет к пересмотру действующих нормативных запасов устойчивости в сторону их уменьшения и расширит в перспективе пропускную способность ЭЭС.

Наряду с обеспечением гарантированного запаса устойчивости ЭЭС важнейшими задачами управления являются распознавание внешних и внутренних угроз, их географическая локализация и определение степени опасности.

**Распознавание внешних и внутренних угроз и их географическая локализация, определение степени опасности и автоматического самовосстановления ЭЭС**

Принципиально важным преимуществом ИЭС ААС является ее способность предвидеть возникающие внешние и внутренние угрозы и мгновенно реагировать на них, добиваясь их ликвидации или уменьшения степени их воздействия на функционирование ИЭС ААС в нормальных, предаварийных, аварийных и послеварийных режимах. Подобными свойствами обладает иммунная система животного, в частности, человека, поэтому интеллектуальную мультиагентную систему, входящую в ИЭС ААС можно назвать «иммунной». Существующая автоматическая система управления и система противоаварийной защиты ЭЭС не обладает в полной мере подобными свойствами, хотя ее отдельные функции в существенно усеченном виде реализуют функции «иммунной» интеллектуальной системы. Кроме того, на стадии планирования режимов с помощью моделирования предусматривается способность к самовосстановлению (нечувствительность) системы при отключении одной из линий; сами нагрузки выбираются с некоторыми запасами по отношению к ожидаемым пиковым значениям.

Перечислим типы внешних угроз: терроризм, киберугрозы, природные катаклизмы, техногенные катастрофы, и типы внутренних угроз: появление нерасчетных возмущений, угроза возникновения и развития каскадной аварии, угроза нарушения устойчивости в нормальных/переходных режимах, угроза нарушения термической устойчивости, угроза неправильных решений и/или действий оперативного персонала.

К основным функциям подсистемы относятся: обнаружение места возникновения и степени опасности угрозы; локализация и изоляция угрозы; превентивное адаптивное управление; реконфигурация системы управления.

В системе могут также реализовываться следующие функции:

- прием, обработка, архивирование и представление информации персоналу (агент мониторинга состояния окружающей среды и внутреннего состояния энергосистемы с использованием базы знаний);
- формирование эталонной модели текущего режима (агент формирования прогнозирующей эталонной модели);
- выявление опасного отклонения состояния от прогнозируемого состояния эталонной модели и его локализация (агент прогноза опасного состояния энергосистемы);
- прогноз потенциальной аварийной ситуации (агент ассоциативного поиска прецедента).

Отметим, что разнообразие типов угроз делает невозможным создание универсальной «иммунной» интеллектуальной системы.

Таким образом, повышение энергоэффективности функционирования ИЭС ААС не представляется реализуемым без создания глобальной иммунной системы [3] с ААС, которая позволит в автоматическом режиме осуществлять не только самовосстановление после аварий, но и осуществлять комплекс превентивных мер по их предотвращению. Такой подход реализует существенное продвижение к реализации стратегии предаварийного управления с одновременным повышением эффективности.

*Функции интеллектуальной иммунной ЭЭС с ААС*

- Мониторинг состояния окружающей среды и внутреннего состояния энергосистемы с пополнением базы технологических знаний (прием, обработка, архивирование и представление информации персоналу).
- Мониторинг степени статической устойчивости электрической сети в РВ. Данная система осуществляет вычисление запасов статической устойчивости в ЕНЭС в РВ и выдает рекомендации диспетчеру для поддержания заданных запасов статической устойчивости в ЕНЭС и восстановления нормального режима после сбитой аварии. В основе технологии лежит разработанный в ИПУ РАН метод грамианов определения степени устойчивости линейных динамических систем.
- Настройка в РВ прогнозирующей модели динамики текущего режима.
- Выявление опасного отклонения состояния системы от прогнозируемого состояния модели и его локализация (агент прогноза опасного состояния энергосистемы).
- Прогноз аварийной ситуации (на основе интеллектуального ассоциативного поиска прецедента).
- Расчет управляющих воздействий и формирование рекомендаций по предотвращению развития угрозы и самовосстановления нормального режима (система интеллектуального ассистента оператора).

**Динамическая оценка состояния и формирование прогнозирующей модели текущего режима**

В условиях возрастающих требований к надежности и качеству энергоснабжения оптимизация режимов работы энергообъектов заключается в организации оптимальной загрузки, обеспечении нормативных запасов устойчивости на основе динамического анализа устойчивости, минимизации потерь электроэнергии, предотвращении или снижении холостых сбросов, и, как результат — обеспечении высокого уровня надежности энергосистемы в целом. Такие требования можно обеспечить на основе управления с прогнозирующими динамическими моделями. Например, в системах предаварийного управления должны быть использованы краткосрочные прогнозы, которые служат основой для формирования диспетчерских графиков и определения необходимых объемов и размещения резервов мощности в энергосистеме. Для реализации такого управления необходимы системы, позволяющие прогнозировать состояние энергосистемы на основе информации из БД по текущей выработке, потреблению и резервным мощностям.

Поддержка принятия решений об управлении и/или формирование управляющих воздействий при реше-

нии различных технологических задач осуществляется на основе интеллектуальных алгоритмов идентификации нелинейных динамических моделей. Алгоритмы основаны на индуктивном обучении: ассоциативном поиске аналогов на базе интеллектуального анализа архивов технологических параметров режимов энергосистемы (Data Mining) и базы технологических знаний.

Построение прогнозирующей модели методом ассоциативного поиска динамического объекта на каждом такте осуществляется на основе знаний, формируемых из технологических данных. Такой подход реализует возможность использования дополнительной априорной информации об объекте. В целях увеличения быстродействия алгоритма (что является одним из ключевых показателей качества работы алгоритмов) и существенной экономии вычислительных ресурсов должно осуществляться обучение системы. Критерий отбора входных векторов из архива для построения виртуальной модели в данный момент времени по текущему состоянию объекта определяет выбор метода кластеризации.

При разработке алгоритмов эффективно использование методов нечеткой логики. Таким образом, новые методы предполагают использовать для идентификации реального объекта моделирование поведения лица, принимающего решение, основанное на формализации технологических знаний.

#### **Мультиагентный подход к разработке интеллектуальной иммунной ЭЭС с ААС**

Разработка интеллектуальной иммунной системы не только опирается на мультиагентную технологию в аспекте программной реализации, но использует ее в качестве идеологии организации взаимодействия подсистем разного уровня и разного функционального назначения в мега-системе управления.

Особенность мультиагентных технологий заключается в принципиально новом подходе к решению системой управления функциональных задач. МАС могут быть позиционированы как самоорганизующиеся системы. Такие возможности особенно важны, в частности, для реализации концепции предаварийного управления ЕНЭС. Выделим следующие факторы актуальности применения МАС в построении ААС, обусловленные функциональными особенностями последних:

- наличие огромных информационных потоков на фоне сложности организации самой энергосистемы и ее функциональности;
- решаемые задачи или разрабатываемые системы неоднородны и распределены;
- в глобальной МАС управления ЕНЭС предусмотрены возможности и средства адаптации к изменениям среды, в том числе путем модификации ее структуры и параметров непосредственно в ходе его функционирования;
- эволюция ПО характеризуется разработкой автономных взаимодействующих модулей;
- если информация и ресурсы ее обработки распределены по различным узлам сети, то могут применяться параллельные вычисления, что позволяет не только на порядок экономить вычислительные ре-

сурсы, но и способствует резкому увеличению быстродействия;

- применяется распределенная структура БД.

Интеллектуальные агенты в системах управления ЕНЭС решают задачи управления нетрадиционными оптимизационными методами, а на основе интеллектуального анализа технологической информации в РВ.

#### **Интеллектуальная система группового регулирования активной и реактивной мощности виртуальной электростанции местной торговой площадки**

Наряду с основными вышеперечисленными функциями глобальной интеллектуальной иммунной ЭЭС с ААС целесообразно разрабатывать системы группового управления, реализующие следующие цели:

- поддержание заданных системным оператором диспетчерских графиков напряжения в заданном коридоре при аварийном отключении источников распределенной генерации (например, ВИЭ или аварии в сети, или на одном из источников генерации) – системная услуга внутри локальной энергосистемы;
- предоставление через распределенные и магистральные сети резервной активной и реактивной распределенной генерации локальной энергосистемы в качестве внешней системной услуги генерации на оптовом рынке электроэнергии и мощности.

Выделим следующие механизмы достижения означенных целей:

- использование свободной распределенной генерации за определенную плату для поддержания необходимого баланса активной и реактивной мощности виртуальной электростанции;
- применение коллективных стратегий МАС, представляющих отдельные электростанции – продавцов системной услуги – с целью оптимизации режима и восстановления указанных балансов.

В виртуальной энергосистеме должны быть предусмотрены источники резервной распределенной генерации или энергии аккумуляторов большой емкости для целей стабилизации частоты и восстановления баланса активной и реактивной мощности.

#### **Интеллектуальная автоматическая система регулирования частоты и перетоков мощности (ИАРЧМ)**

Нарушение устойчивости работы ЭЭС, вызванное изменением нагрузки, ее характера, короткими замыканиями и т. д. приводит к народнохозяйственному ущербу из-за необходимости отключения линий, питающих потребителей. Для недопущения подобных ситуаций используется автоматическая система предотвращения нарушения устойчивости, выполняющая действия по повышению пропускной способности линий электропередач, изменения настройки автоматических регуляторов возбуждения, мощности турбогенераторов и др. Архитектура этих систем представляет собой гибкую структуру, состоящую из вложенных сетевых кластеров МАС вертикальной интеграции. Выделим следующие основные уровни иерархии, в каждом из которых функционируют подсистемы различного назначения, реализованные на базе МАС: подстанций, Центров управления сетями, Центра управ-

ления регионального сегмента, Центра координирующего (глобального) сегмента.

Наряду с формированием вертикальных слоев в иерархии MAC, выделяются горизонтальные слои, определяющие географическое расположение MAC одинакового функционального назначения.

**Режим определения угрозы нарушения устойчивости ЭЭС MAC безопасности**

MAC безопасности обнаруживает место возникновения и величину небаланса мощности и определяет зоны ответственности MAC регионального информационных и управляющих кластеров, управляющих кластеров распределительных сетей и потребителей (формирование группы агентов). Особенно важной является функция географической координации интеллектуальных автоматических систем определения степени статической устойчивости локальных энергосистем, которая обеспечивает контроль не только степени устойчивости критического фрагмента энергосистемы, но и степени устойчивости соседних локальных энергосистем  $i=1,2...n$ .

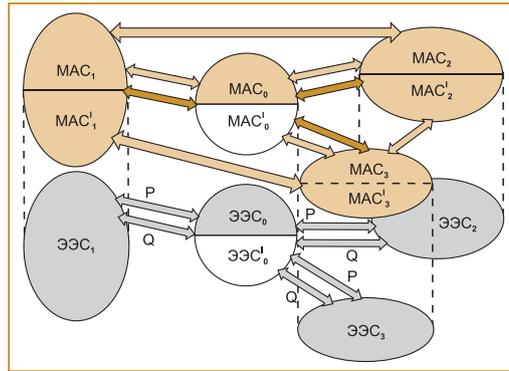
**Режим коллективного планирования превентивных действий**

Несколько систем ( $n$ ), построенных на базе мультиагентной технологии планируют совместные действия в РВ с целью восстановления рабочего режима с гарантированной степенью устойчивости (рисунок). Эти действия могут включать анализ возможных сценариев действий MAC управления по восстановлению нормального режима и формирование оптимального плана. Для реализации сценариев используют платформы моделирования и оптимизации в РВ.

**Режим координированного управления адаптивными интеллектуальными агентами с целью восстановления нормального режима**

Оптимальный план управления восстановлением нормального режима должен быть исполнен агентами нижнего уровня MAC, которые исполняют действия превентивного характера (совместные действия), например, путем координированного управления системами возбуждения генераторов в соседних энергосегментах.

При возникновении асинхронного хода (распознавание) MAC изолированной энергосистемы выполняет действия (формирование группы агентов



Структурная схема четырехрайонной интеллектуальной энергосистемы до и после (пунктир стрелки, белый цвет) "посадки на ноль" энергосистемы, где ЭЭС0... ЭЭС3 – ЭЭС четырех географически смежных районов; MAC0... MAC3 – MAC управления четырех географически смежных районов; ЭЭС0 и MAC0 – ЭЭС и MAC центрального энергорайона после "посадки на ноль"

и планирование) по предотвращению посадки генераторов на нуль (наиболее тяжелая системная авария, которая может возникнуть вследствие большого дефицита активной мощности), поддержанию автономного энергоснабжения изолированной энергосистемы и восстановления синхронного хода (совместные действия).

Основное преимущество использования мультиагентных технологий в такой ситуации состоит в исключении человеческого фактора в режимах ситуационного управления и повышении системной надежности за счет своевременной и быстрой реконфигурации управляющих кластеров при отказах сетевого или вычислительного оборудования.

**Выводы**

Интеллектуальные иммунные системы нового поколения потребуют разработки и поэтапного внедрения:

- новых интеллектуальных электронных приборов и программно-аппаратных средств (soft sensors) для раннего обнаружения отдельных типов угроз;
- программно-аппаратных средств вероятностной оценки рисков возникновения предаварийного и аварийного режима;
- питающих сетей, обладающих развитыми возможностями их реконфигурации;
- ПО различного назначения на базе мультиагентных технологий;
- новых методов визуализации угроз, чтобы операторы быстро реагировали на уровень риска угрозы.

Создание ИЭС ААС с развитыми функциями иммунной системы потребует привлечения больших объемов инвестиций, однако конечная выгода для потребителей, энергетических компаний, государства и общества обеспечит многократный возврат инвестиций, включая повышение надежности, безопасности, живучести, качества электроэнергии и снижение нагрузки на окружающую среду.

**Список литературы**

1. Rehtanz C. (2003) Autonomous Systems and Intelligent Agents in Power System Control and Operation. Springer-Verlag, New York.
2. Pourbeik P., Bahrman M., John E., Wong W. (2006). Modern Countermeasures to Blackouts, IEEE Power & Energy Magazine. 4 (5).
3. Khosrow Moslehi, Ranjit Kumar Vision of a self-healing power grid. ABB Review 4/2006.

Моржин Юрий Иванович – д-р техн. наук, зам. ген. директора ОАО «НТЦ электроэнергетики»,

Ядыкин Игорь Борисович – д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией,

Бахтадзе Наталья Николаевна – д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией ИПУ РАН.

Контактные телефоны: (495) 334-90-31, 334-92-01.

E-mail: Jad@ipu.ru bahfone@ipu.ru. Http://www.ntc-power.ru http://www.ipu.ru