

Мультиагентное оптимальное управление электрическими сетями с активными потребителями и возобновляемыми источниками энергии



На совместном заседании Научно-технического совета НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике, подготовленном секцией «Активные системы распределения электроэнергии и распределённые энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС», был рассмотрен вопрос «Мультиагентное оптимальное управление электрическими сетями с активными потребителями и возобновляемыми источниками энергии».

В работе приняли участие представители Научно-технического совета НП «НТС ЕЭС», ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», АО «НТЦ ФСК ЕЭС», НИК С6 РНК СИГРЭ, ФГБУН «ИСЭМ СО РАН», ФГБУН «ИНЭИ РАН», Комитета ВИЭ РосСНИО, ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», ФГБОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», Общевойсковой академии ВС РФ, ООО «Инженерный центр «Энергосервис», ФГБОУ ВО «Нижегородский ГТУ им. Р.Е. Алексеева», ООО «ЛУКОЙЛ-ЭНЕРГО-СЕТИ», ООО «РТСофт-СТ».

Открывая заседание, председатель Секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределённые энергетические ресурсы» (АСРЭ и РЭР) НП «НТС ЕЭС», руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределённой энергетики ФГБУН «Институт энергетических исследований РАН», д.т.н. **П.В. Илюшин** отметил, что тематика доклада является актуальной, так как всё большее число промышленных и непромышленных потребителей становятся активными, т.е. могут изменять

собственное электропотребление во времени, реагируя на сигналы оптового рынка электроэнергии. Это обусловлено как внедрением собственных объектов распределённой генерации, так и автоматизированных систем управления технологическими процессами.

Кроме того, в рамках реализации государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики осуществляется поддержка проектов сооружения генерирующих объектов на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Эти генерирующие объекты в виде ветровых и солнечных электростанций интегрируются в распределительные сети среднего и высокого напряжения.

Представленные в докладе алгоритмы и разработки реализованы в программно-вычислительном комплексе АНАРЭС, который в настоящее время активно совершенствуется коллективом авторов.

С докладом «Мультиагентное оптимальное управление электрическими сетями с активными потребителями и возобновляемыми источниками энергии» выступил к.т.н., научный сотрудник Отдела электроэнергетических систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, руководитель разработки ПВК «АНАРЭС» **А.В. Домышев**.

Он подчеркнул, что в работе рассматривается вопрос оптимального управления нормальными электрическими режимами электроэнергетических систем (ЭЭС) при наличии значительного количества элементов, режим которых является стохастическим во времени, устройств распределённого управления, таких как «активные потребители», включая агрегаторов управления спросом и объекты ВИЭ. Существующие в настоящее время технические решения для оптимального управления электрическими режимами не в полной мере удовлетворяют новым обстоятельствам. Для оптимального управления электрическими режимами в ЭЭС требуются быстродействующие модели, которые вместе с тем позволяют обеспечивать прогнозирование режимов на временной горизонт около суток.

Актуальной задачей в этом направлении является математическое обоснование построения оптимальной структуры мультиагентного управления, поскольку существующие методы мультиагентного управления, как правило, ограничиваются оптимизацией передачи информации между агентами.

Методы планирования режимов, в том числе с учётом вероятностного характера параметров режима, достаточно хорошо проработаны. Для управления же в темпе процесса требуются быстродействующие методы оптимизации с учётом изменения параметров режима во времени, то есть методы динамической оптимизации.

Оптимальное управление электрическими сетями при наличии активных потребителей и объектов ВИЭ целесообразно проводить с помощью двухуровневой архитектуры управления. На нижнем уровне решается задача оптимального управления, учитывающая технологические особенности объектов ВИЭ и локальные алгоритмы управления. На верхнем уровне решается задача оптимизации в темпе процесса на модели, в которой объекты ВИЭ и активные потребители представлены стохастическими величинами.

Управление на уровне объектов ВИЭ достаточно хорошо проработано и, в первую очередь, определяется технологией производства электроэнергии. Так, для ветровой электростанции на этом уровне решаются следующие задачи: управление механической энергией вращения отдельных ветроэнергетических установок (регулирование срыва потока, активное регулирование срыва потока, регулирование по тангажу), регулирование выдачи мощности в ЭЭС, групповое оптимальное управление ветровой электростанцией. Для солнечной электростанции решаются задачи: оптимальное управление напряжением на фотоэлектрических модулях; регу-

лирование выдачи мощности в ЭЭС; групповое оптимальное управление солнечной электростанцией.

Архитектура алгоритмов управления была применена в комплексе интеллектуального управления напряжением в Магаданской энергосистеме.

Проведено сравнение результатов прогнозирования с применением искусственных нейронных сетей (ИНС) и традиционных алгоритмов прогнозирования на основе регрессии. Прогнозирование с использованием ИНС показало лучшие результаты.

Для учёта вероятностного характера исходных данных предложено применять Байесовский вариант ИНС с использованием метода Байесовского обратного распространения. Данная архитектура показывает хорошие результаты при прогнозировании небольшого количества взаимосвязанных параметров режима.

Для прогнозирования всех параметров режима предложена архитектура искусственной нейро-аналитической сети, полученная путём кластеризации ИНС в соответствии с топологией сети по критерию электрической близости. Кластеры объединялись аналитическим слоем, в котором выполнялась одна итерация расчёта установившегося режима для обеспечения условия баланса мощности.

Рассмотрена возможность мультиагентного решения задачи оптимального управления нормальными режимами. Предложено построение оптимальной системы мультиагентного управления при условии, что может быть сформулирована единая целевая функция. Агенты в мультиагентной системе управления при этом используют одинаковые целевые функции, аналогичные глобальной.

Представленные результаты исследования выполнены с целью применения мультиагентного управления для автоматического управления напряжением и реактивной мощностью в Магаданской энергосистеме для внедрения их в разработанный программно-аппаратный комплекс.

В обсуждении доклада и прениях приняли участие М.А. Рабинович, В.Э. Воротницкий (АО «НТЦ ФСК ЭЭС»), Ю.П. Гусев, М.Г. Тягунов, Р.М. Хазихметов (ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»), А.Г. Фишов (ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»), Н.А. Беляев (АО «Техническая инспекция ЭЭС»), К.В. Сулов (ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»), А.В. Родионов (ООО «Инженерный центр «Энергосервис»), Г.Б. Гулиев (Азербайджанский технический университет), О.Р. Кивчун (ФГБОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»),

А.В. Симонов (ООО «РТСофт-СТ»), С.В. Грибков (Комитет ВИЭ РосСНПО), А.Б. Осак (ФГБУН «ИСЭМ СО РАН»), П.В. Илюшин (НП «НТС ЕЭС», ФГБУН «ИНЭИ РАН»).

Главный научный сотрудник АО «НТЦ ФСК ЕЭС», д.т.н. **М.А. Рабинович** отметил, что существуют известные оптимальные алгоритмы прогнозирования. Например, для стационарных процессов существуют алгоритмы Винера — Колмогорова, а для нестационарных процессов — фильтры Калмана. Такие алгоритмы дают оптимальную оценку при условии, что характер прогнозируемых процессов на этапе прогнозирования не меняет свои основные характеристики. Следовало бы аргументированно обосновать, за счёт чего предложенные методы позволяют получить лучший результат.

Главный научный сотрудник АО «НТЦ ФСК ЕЭС», д.т.н., профессор **В.Э. Воротницкий** указал на то, что в докладе подробно рассмотрены различные подходы и методы оптимизации электрических режимов в ЭЭС. При этом остается неясным, какие параметры оптимизируются. Он также обратил внимание на то, что если рассматривать мультиагентные системы, то задача оптимизации становится многоцелевой. При этом в сетях с объектами ВИЭ задача в меньшей степени будет оптимизационной, а больше будет связана с устойчивостью функционирования, надёжностью электроснабжения и качеством электроэнергии. Постановку задачи исследования следовало бы сместить в область применения объектов ВИЭ, то есть к мультиагентной постановке.

Заведующий кафедрой электрических станций ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», к.т.н., доцент **Ю.П. Гусев** обратил внимание на возможности и перспективы практического использования предлагаемой модели мультиагентного управления. По его словам, остался неясным вопрос о востребованности предлагаемых моделей управления в ЭЭС. Он так-

же отметил, что при организации централизованного управления напряжением, в частности, в Магаданской энергосистеме, необходимо учитывать её структуру, на основе чего определять целесообразность такого управления.

Профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», д.т.н., профессор **М.Г. Тягунов** отметил, что можно ставить задачу в стохастической постановке, учитывая особенности объектов ВИЭ, а можно не применять в ЭЭС такие установки, а использовать установки с управляемой генерацией, т.е. совместно с системами накопления электрической энергии. При этом в ЭЭС останутся стохастические факторы, в большей степени определяемые поведением активных потребителей. Он также обратил внимание на то, что в озвученной автором постановке задачи предполагается непрерывность целевой функции и её дифференцируемость. Однако могут возникать ситуации множества экстремумов целевой функции и это следует учитывать при оптимизации. Он отметил перспективность темы научного исследования, а также то, что авторы поставили перед собой большую задачу, которая является крайне актуальной, поэтому работа над ней должна быть продолжена.

Профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», к.т.н. **Р.М. Хазиахметов** отметил, что авторам следовало бы представить формулировку целевой функции в более чётком виде, с её обоснованием. Для распределительных сетей в качестве целевых функций может выступать и минимизация потерь электроэнергии, и повышение надёжности электроснабжения потребителей, и др.

Профессор кафедры автоматизированных электроэнергетических систем ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический универси-



Слева направо:
Денис Качинский,
Дмитрий Крупнев,
Расим Хазиахметов

тет», д.т.н., профессор **А.Г. Фишов** отметил, что для начала было бы полезно сформулировать понятия мультиагентного управления. При наличии общей целевой функции можно говорить о централизованном и децентрализованном управлении, которое, в том числе, может выполняться мультиагентным методом в интересах одного субъекта с использованием интеллектуальных агентов. При мультиагентном управлении мы приходим к ситуации, когда единственного субъекта уже нет, а есть много субъектов со своими целями (электросетевые компании, генерирующие компании, филиалы СО ЕЭС, активные потребители, объекты ВИЭ и др.). В этом случае необходима многоцелевая оптимизация с решением компромиссной задачи. Агентов в этом случае объединяют только общий режим и общие правила взаимодействия. В настоящее время мы ещё далеки от формулировки общих правил для ЭЭС и всех других субъектов. Он также обратил внимание на то, что поле применения мультиагентных систем достаточно широкое. Не отрицая представленных в докладе результатов, следует отметить, что само развитие и практическое применение мультиагентных алгоритмов требует сдвижки идеологии управления ЭЭС от централизованного управления в сторону децентрализованного мультиагентного управления.

Начальник службы АО «Техническая инспекция ЕЭС», к.т.н. **Н.А. Беляев** задал вопрос по результатам стохастической оптимизации и их отличию от детерминированной постановки. Результатом стохастической оптимизации является математическое ожидание и распределение вероятности. Он также отметил, что было бы хорошо рассмотреть устойчивость метода прогнозирования к редким аномальным событиям в электрической сети (отказы, массовые социальные явления и др.).

Заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники ФГБОУ ВО «Иркутский нацио-

нальный исследовательский технический университет», д.т.н., доцент **К.В. Суслов** задал вопрос о том, насколько будет точным прогноз режима для Магаданской энергосистемы? Он отметил, что при формировании прогноза следует учитывать состав оборудования в ЭЭС.

Начальник отдела аналитики и обработки данных ООО «Инженерный центр «Энергосервис», к.т.н. **А.В. Родионов** отметил, что необходимо учитывать аппаратные требования к системе сбора и передачи данных при проектировании мультиагентной системы. Он обратил внимание на то, что если говорить о прогнозировании режимов ЭЭС в темпе процесса, то следует учитывать ошибку прогноза для последующего его улучшения.

Декан факультета «Энергетика и автоматика» Азербайджанского технического университета, к.т.н., доцент **Г.Б. Гулиев** отметил, что при прогнозировании использовался метод, основанный на искусственных нейронных сетях. Однако есть и другие методы краткосрочного прогнозирования, например ARMA. Следовало бы привести сравнение результатов прогнозирования с использованием предлагаемой мультиагентной системы и широко применяемых авторегрессионных методов.

Доцент Института физико-математических наук и информационных технологий ФГБОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», к.т.н., доцент **О.Р. Кивчун** задал вопрос о том, что понимается под хаотичностью данных, а также о размерности выборки и способе выявления взаимосвязей в этой выборке. Он отметил, что было бы полезно рассмотреть возможность функционирования предлагаемой системы оптимального управления в изолированной ЭЭС, например Калининградской области, а также надёжность её работы при пропадании или недостоверности исходных данных.

*Слева направо:
Константин Суслов,
Павел Илюшин,
Александр Домышев*



Директор обособленного подразделения ООО «РТСофт-СГ» в г. Екатеринбурге **А.В. Симонов** поинтересовался, как посчитать экономическую эффективность внедрения предлагаемой системы, например Магаданской энергосистемы?

Учёный секретарь Комитета ВИЭ РосСНИО, к.т.н. **С.В. Грибков** отметил, что необходимо чётко формулировать вводимые термины: мультиагентность; многоагентность. Он обратил внимание на то, что в докладе обсуждался вопрос функционирования объектов ВИЭ в составе ЭЭС, при этом вопрос организации взаимодействия ЭЭС с отдельными субъектами рынка остался незатронутым. Остаётся открытым вопрос о границе обоснованных объёмов внедрения объектов ВИЭ в ЭЭС. В целом доклад представляет большой интерес, и предлагается в рамках работы Секции собрать всех заинтересованных лиц, кто занимается вопросами мультиагентного управления, для выработки общей терминологии и целей.

Научный сотрудник Отдела электроэнергетических систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН **А.Б. Осак** отметил, что сейчас управление режимами в Магаданской энергосистеме осуществляется полностью в ручном режиме с реализацией редких управляющих воздействий на оборудование с целью обеспечения оптимальности (раз в сезон). При этом есть достаточно большой ресурс управления батареями статических конденсаторов и управляемыми шунтирующими реакторами,

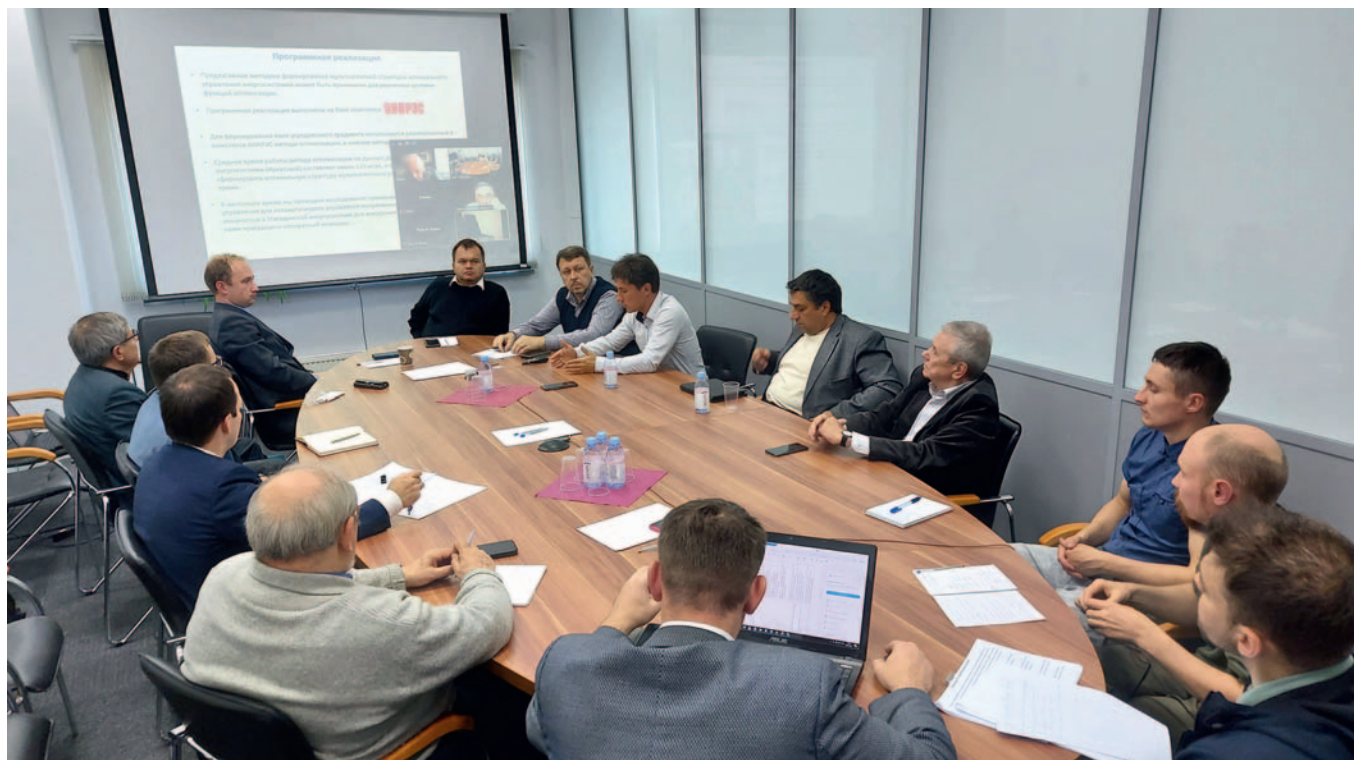
которые позволяют управлять режимами с большим быстродействием и эффективностью.

Председатель Секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределённые энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС», д.т.н. **П.В. Илюшин** отметил, что существует большая востребованность в моделях и средствах автоматического регулирования режимами на уровне распределительных сетевых компаний, осуществляющих присоединение к своим сетям объектов ВИЭ в большом количестве и объёмах. Такие как, например, МРСК Юга, МРСК Урала (Оренбургэнерго). При этом критерием оптимальности в первую очередь будет выступать не экономичность, а устойчивость режима и надёжность электроснабжения потребителей.

В своём заключительном слове **П.В. Илюшин** отметил, что проведённое исследование и полученные результаты представляют значительный интерес для электроэнергетического сообщества в целом и электросетевых компаний в частности, учитывая всё более возрастающую роль Центров управления сетями.

Направление исследования имеет перспективы для дальнейшего развития и совершенствования. В работе используется достаточно сложный математический аппарат, что для решения поставленной задачи оправданно.

В ходе обсуждения доклада было высказано достаточно большое количество рекомендаций и пред-



ложений, авторам необходимо их конструктивно рассмотреть и учесть в своей дальнейшей работе.

Озвученные при обсуждении вопросы, относящиеся к экономическому обоснованию целесообразности внедрения систем мультиагентного управления, необходимо проработать для возможности дальнейшей реализации проектов. В докладе, на примере реальной энергосистемы, была показана значительная экономия на потерях электроэнергии в сетях за счёт оптимального управления режимом по напряжению.

При принятии решения о внедрении предложенных систем мультиагентного управления должен учитываться экономический эффект на всём жизненном цикле, включая как капитальные, так и операционные (эксплуатационные) затраты. Для получения максимального эффекта от оптимального управления режимами требуется проведение модернизации находящегося в эксплуатации первичного оборудования и оборудования систем связи и передачи данных. Относить данные затраты в полном объёме на систему мультиагентного управления некорректно.

Целесообразно для оценки окупаемости учитывать непосредственные затраты на создание системы, а затраты на модернизацию первичного оборудования и оборудования систем связи и передачи данных учитывать в программе модернизации основных средств. Это оправданно, так как указанное оборудование будет не только управляться от внедряемой системы, но и выполнять другие основные функции — обеспечение надёжной передачи и распределения электроэнергии потребителям региона.

СОВМЕСТНОЕ ЗАСЕДАНИЕ ОТМЕЧАЕТ

1. Проведённое исследование и полученные результаты представляют значительный интерес для электроэнергетического сообщества в целом и электросетевых компаний в частности, учитывая всё более возрастающую роль Центров управления сетями.

2. Востребованность предлагаемого решения задачи оптимального управления электрическими режимами в условиях массового внедрения объектов на основе возобновляемых источников энергии и изменения поведения всё большего числа промышленных/непромышленных потребителей, которые становятся активными, ежегодно возрастает. Требования по повышению энергоэффективности и энергосбережения в электрических сетях являются также актуальными и могут быть решены за счёт внедрения представленной системы.

3. Новизну математического аппарата, применяемого для решения задачи оптимального управле-

ния режимами работы электрических сетей с объектами на основе возобновляемых источников энергии и активными потребителями.

4. Внедрение представленной архитектуры алгоритмов оптимального управления в комплексе интеллектуального управления напряжением в Магаданской энергосистеме.

5. Необходимость дальнейшего развития и совершенствования представленной системы с целью учёта противоречивости целевых функций агента и системы в условиях, когда отсутствует возможность для формулирования единой целевой функции, а также динамических режимов энергосистемы.

СОВМЕСТНОЕ ЗАСЕДАНИЕ РЕШИЛО

1. Продолжить исследования и разработки в данном научном направлении с учётом особенностей задачи применительно к распределительным сетям с объектами ВИЭ и активными потребителями, а также различных интересов участвующих субъектов.

2. Представить результаты опытно-промышленной эксплуатации системы интеллектуального управления напряжением в Магаданской энергосистеме, а также новые разработки в области мультиагентного управления распределительными сетями среднего и высокого напряжения на одном из очередных заседаний Секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределённые энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС».

3. Рекомендовать электросетевым компаниям, после реализации п. 1, рассмотреть возможность реализации пилотных проектов внедрения системы мультиагентного оптимального управления электрическими режимами в условиях массовой интеграции в сети объектов на основе возобновляемых источников энергии и активных потребителей.

4. Рекомендовать крупным/средним промышленным и непромышленным потребителям, после реализации п. 1, рассмотреть возможность внедрения системы мультиагентного оптимального управления электрическими режимами в сетях внутреннего электроснабжения при наличии объектов собственной генерации, резервных источников электроснабжения и систем накопления электроэнергии.

5. Рекомендовать региональным диспетчерским управлениям Системного оператора рассмотреть результаты реализации пилотных проектов внедрения системы мультиагентного оптимального управления электрическими режимами с целью тиражирования их применения в энергосистемах с большим количеством объектов на основе возобновляемых источников энергии и активных потребителей.