

ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО КОМПЛЕКСА ЕНЭС НА БАЗЕ ЦИФРОВОГО ПОЛИГОНА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

АВТОРЫ:

СОРОКИН Д.В.,
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

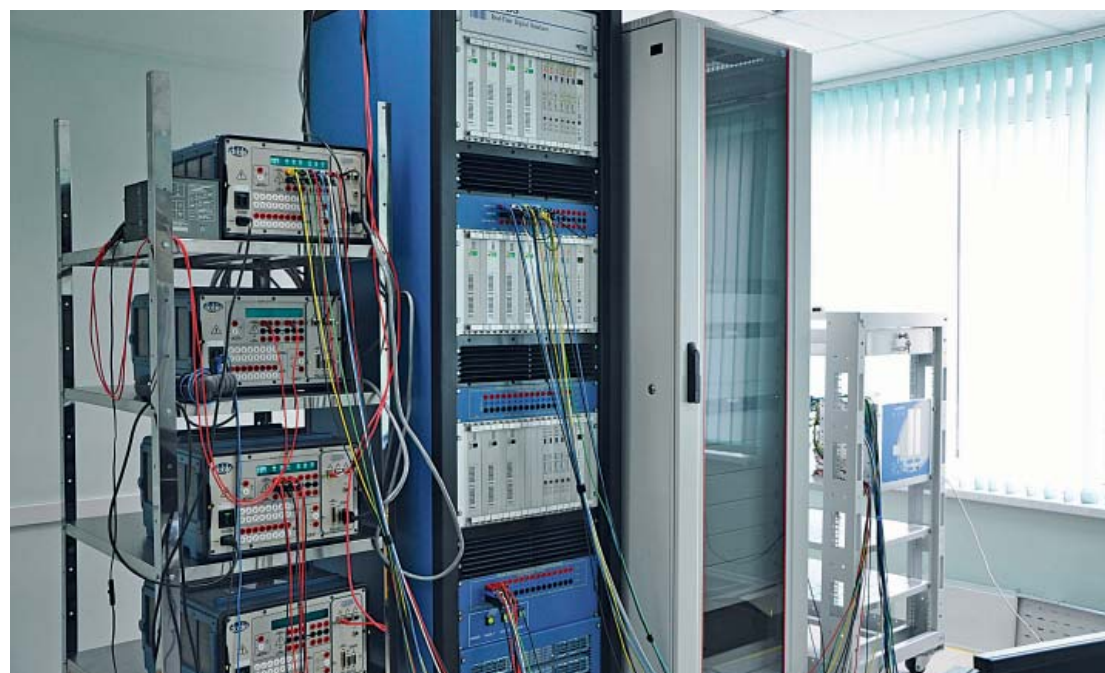
ГУСАРОВА А.А.,
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

БАРАНОВ И.Л.,
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Современные инновационные решения способствуют существенному повышению энергосбережения и энергоэффективности функционирования электросетевого комплекса России. Отработка интеллектуальных (энергоэффе-

тивных) решений на базе Полигона ИЭС ААС ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» позволяет оценить эффективность и целесообразность применения новых технологий до их внедрения в эксплуатацию и в условиях, максимально приближенных к условиям промышленной эксплуатации.

Ключевые слова: инновационные решения; цифровые технологии; энергосбережение; энергоэффективность; программно-аппаратные комплексы; алгоритмы управления; электрические режимы.



Лабораторная часть опытного полигона «Цифровая подстанция»

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Положением об энергетической политике ПАО «ФСК ЕЭС» [1] реализация мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности является одним из приоритетных направлений деятельности ПАО «ФСК ЕЭС». Наряду с совершенствованием нормативно-методической базы по управлению энергосбережением в качестве ключевых мероприятий в Положении указаны в том числе мероприятия на базе внедрения инновационных технологий и оборудования.

Применение инновационных решений может обеспечить качественно новый уровень энергосбережения и энергоэффективности функционирования электросетевого комплекса России. В то же время применение таких решений сопряжено с повышенными рисками на этапе эксплуатации (от неэффективности решения до возникновения технологических нарушений в энергосистеме). Снижение рисков возможно за счет выполнения комплексных испытаний новых решений в среде, максимально приближенной к условиям промышленной эксплуатации.

Такой средой является цифровой испытательный Полигон интеллектуальных энергосистем (ИЭС ААС), развернутый на базе Центра системных исследований и разработок ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС». Полигон представляет собой многофункциональный комплекс современных программно-технических и программно-аппаратных средств, формирующих среду поддержки для разработки и испытаний решений в области интеллектуальной энергетики (на всех этапах жизненного цикла реализуемых проектов).

МЕРОПРИЯТИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЕНЭС, ОТРАБОТКА КОТОРЫХ ВЫПОЛНЯЕТСЯ НА ПОЛИГОНЕ

В настоящее время на Полигоне ИЭС ААС выполняется отработка следующих технологий, обеспечивающих повышение энергоэффективности функционирования электрических сетей:

1. применение мультиагентных автоматических систем управления напряжением и реактивной мощностью в электрических сетях;
2. реализация автоматического отключения слабозагруженных трансформаторов (автотрансформаторов);
3. применение асинхронизированных синхронных компенсаторов, а также асинхронизированных синхронных генераторов.

Каждая из представленных технологий направлена в том числе на повышение качества стабилизации уровней напряжения и снижения потерь активной мощности в электрических сетях и является потенциально окупаемой.

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЬЮ (МАСУ НРМ)

На базе Центра системных исследований и разработок ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» разработан уникальный

программно-технический комплекс (ПТК) мультиагентной автоматической системы управления напряжением и реактивной мощностью (МАСУ НРМ). ПТК предназначен для повышения качества стабилизации уровней напряжения и минимизации потерь активной мощности в электрических сетях. С точки зрения эксплуатационного персонала ПТК позволяет автоматизировать действия оперативного персонала подстанций по оперативным переключениям и заданию уставок управляемых устройств компенсации реактивной мощности.

Программно-технический комплекс создан на базе разработанной в ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» типовой архитектуры интеллектуальных систем автоматического управления с учетом принципов мультиагентного построения систем.

Новизна (инновационность) программно-технического комплекса базируется на следующих основных свойствах МАСУ НРМ:

1. **Реализация децентрализованного управления.** Реализация в ПТК алгоритмов децентрализованного управления электрическими режимами позволяет избежать необходимости развертывания для функционирования ПТК систем «верхнего уровня», являющихся системами «критической» инфраструктуры централизованных систем управления.
2. **Способность функционирования ПТК в условиях «потери» канала связи и неполной наблюдаемости электрической сети.** Реализация децентрализованных алгоритмов управления и ряда других специализированных алгоритмов (по оценке состояния энергосистемы,

контролю достоверности телеметрии и др.) обеспечивает возможность функционирования ПТК в условиях неполноты исходной телемеханической информации, в том числе в случае «потери» связи группы ПТК с ПТК одной из подстанций.

3. **Адаптивность ПТК при изменении схемно-режимных условий работы энергосистемы.** Это свойство означает, что как в процессе выполнения пуско-наладочных работ, так и в процессе эксплуатации ПТК не требует «специальной на-

4.

стройки» под конкретные схемно-режимные условия работы энергосистемы.

Адаптивность ПТК при вводе в энергосистему нового управляемого оборудования.

В ПТК реализована возможность включения в контур управления ПТК нового электротехнического оборудования (например, УШР) без необходимости перепрограммирования программного комплекса.

5.

Применение мультиагентных технологий. Практика ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» свидетельствует

о том, что технологии создания мультиагентных систем наилучшим образом приспособлены для реализации вышеуказанных свойств разрабатываемой системы управления.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МАСУ НРМ

Для обеспечения функционирования МАСУ НРМ элементы указанного ПТК должны быть развернуты на каждой из подстанций энергетического кластера, в котором требуется обеспечить автоматическую «нормализацию» уровней напряжения и снижение потерь мощности в электрических сетях.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА МАСУ НРМ

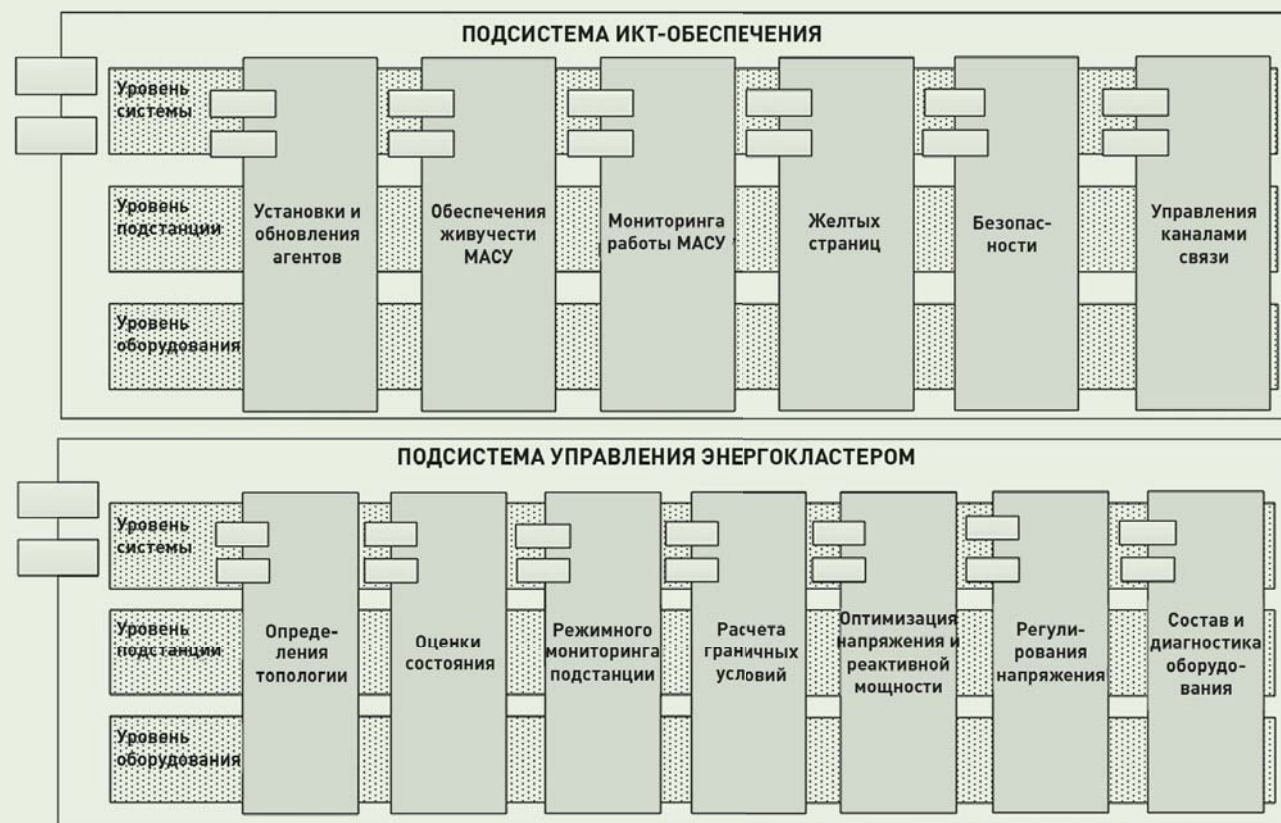


Рис. 1

По результатам сбора и обработки локальной телемеханической информации (а также информации от других мультиагентных систем в энергетическом кластере) в ПТК МАСУ каждой подстанции энергокластера выполняется формирование и актуализация расчетной (математической) модели энергокластера. На первой итерации формируется топологическая модель подстанции, на следующей итерации формируется модель энергокластера в целом. В случае выявления недостоверной или недостаточной телеинформации выполняется алгоритм оценки состояния энергосистемы. Модель энергокластера формируется в формате общей информационной модели — CIM (Common Information Model), что позволит в перспективе использовать получаемую модель в различных программно-вычислительных комплексах, например, в системах класса SCADA/EMS.

Далее на базе полученной расчетной модели в ПТК МАСУ НРМ выполняется расчет и оптимизация электрического режима с определением оптимальных уровней напряжений на шинах каждой из подстанций энергокластера. При выполнении оптимизации учитывается требуемый (возможный) диапазон изменения напряжений (задаваемый, например, графиком напряжений в контрольных пунктах электрической сети), а также учитывается необходимость снижения уровня потерь активной мощности в сети.

По результатам «согласования» оптимальных уровней напряжений между всеми элементами (серверами) ПТК МАСУ НРМ в системе формируется перечень уровней напряжений, который далее реализуется посредством управляющих воздействий.

На данный момент в ПТК реализованы следующие управляющие воздействия:

ПЛАН-СХЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КЛАСТЕРА



Рис. 2

- отключение/включение выключателей шунтирующих реакторов (ШР) и батарей статических конденсаторов (БСК);
- задание уставок по напряжению/реактивной мощности управляемых шунтирующих реакторов (УШР);
- задание уставок для системы автоматического управления отпайками РПН трансформаторов (автотрансформаторов).

Следует отметить, что подробное описание используемых алгоритмов выходит за рамки настоящей публикации. Ввиду этого в данном разделе представлено краткое и упрощенное описание алгоритма функционирования ПТК МАСУ НРМ.

АРХИТЕКТУРА ПОСТРОЕНИЯ МАСУ НРМ

Применение технологий мультиагентных систем позволяет реализовать архитектуру МАСУ НРМ в виде системы, в которой ее определенная функциональность реализуется с помощью отдельной автономной подсистемы — агента (или агентской сети, если для реализации этой функции требуется согласованная работа нескольких агентов). На рис. 1 представлена структурная схема мультиагентной автоматизированной системы управления напряжением и реактивной мощностью (МАСУ НРМ).

Из структурной схемы МАСУ НРМ видно, что в состав автоматизированной системы входят две основные подсистемы — под-

система управления энергетическим кластером и подсистема информационно-коммуникационного обеспечения. Подсистема управления энергетическим кластером включает в себя агентов, реализующих функции управления напряжением и реактивной мощностью на участке электрической сети. Подсистема информационно-коммуникационного обеспечения включает агентов, обеспечивающих функционирование системы в целом. В частности, подсистема информационно-коммуникационного обеспечения включает агентов, обеспечивающих возможность включения в систему нового дополнительного функционала (новых агентов), сохранения работоспособности системы при различных технологических нарушениях (например, при отказе коммутационной аппаратуры), включения в контур управления МАСУ НРМ нового электротехнического оборудования и т.д.

Каждая из подсистем содержит мультиагентные группы, объединяющие в сеть агентов на разных объектах и разных уровнях управления. Для агентов каждой группы используется общая онтология и протоколы взаимодействия. С точки зрения расширения и развития системы предложенная архитектура позволяет добавлять в каждую подсистему агента (или группу агентов) для обеспечения нового функционала системы. С точки зрения эксплуатации системы разбивает групп на уровни агентов-координаторов на уровне системы и обеспечивают интерфейс для операторов МАСУ НРМ. Использование такого интерфейса позволяет оператору автоматизированной системы выполнять настройку системы, в том числе изменять цели агентов в группе, а также способы принятия решений при взаимодействии агентов.

ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МАСУ НА ПОЛИГОНЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

С целью отработки технологий создания и функционирования мультиагентных систем управления на Полигоне ИЭС ААС развернута цифровая динамическая модель энергетического кластера «Эльгауголь». Модель разработана в программно-вычислительном комплексе DlgSILENT PowerFactory.

В соответствии с проектной документацией данный кластер расположен на территории юго-восточной части Республики Саха (Якутия) и северной части Амурской области. Сооружение и ввод в эксплуатацию электросетевой инфраструктуры в данном районе обусловлено необходимостью электроснабжения Эльгинского угольного комплекса ОАО ХК «Якутуголь». План-схема проектируемых электрических сетей пилотного объекта представлена на рис. 2.

В проектной документации развития энергетического кластера «Эльгауголь» предусматривается установка на подстанциях активных элементов — трансформаторов (автотрансформаторов) с РПН, а также средств компенсации реактивной мощности (СКРМ).

В соответствии с функциональными требованиями к МАСУ НРМ указанная система предназначена, в первую очередь, для повышения качества стабилизации уровней напряжения и снижения уровня потерь активной мощности в электрических сетях. Однако ввиду того, что реализуемый проект является пилотным, к целям создания МАСУ НРМ следует отнести также отработку подходов к созданию интеллектуальных электрических сетей, выполнение оценки

эффективности применения мультиагентной платформы для построения системы, наработку опыта эксплуатации мультиагентных систем и дальнейшее уточнение эталонной архитектуры ИЭС.

ПРИМЕНЕНИЕ МАСУ НРМ — ПОТЕНЦИАЛЬНО ОКУПАЕМОЕ МЕРОПРИЯТИЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЕНЭС

По результатам комплексных испытаний МАСУ НРМ на Полигоне ИЭС ААС подтверждена эффективность применения указанной системы управления при решении задач снижения потерь активной мощности (рис. 3). В частности, применение МАСУ НРМ обеспечило возможность снижения потерь активной мощности в энергокластере «Эльгауголь» на 5–20% (в зависимости от рассматриваемых схемно-режимных условий).

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОТКЛЮЧЕНИЕ СЛАБОЗАГРУЖЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ (АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ)

Возможным техническим решением для повышения энергоэффективности электросетевого комплекса ЕНЭС является создание программно-технического комплекса для автоматического вывода из работы слабозагруженных трансформаторов и автотрансформаторов. На Полигоне ИЭС ААС создан прототип такой системы и выполняется исследование функционирования прототипа в различных схемно-режимных условиях.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ ПРИ ОПРЕДЕЛЕННЫХ СХЕМО-РЕЖИМНЫХ УСЛОВИЯХ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕСТИРОВАНИЯ)

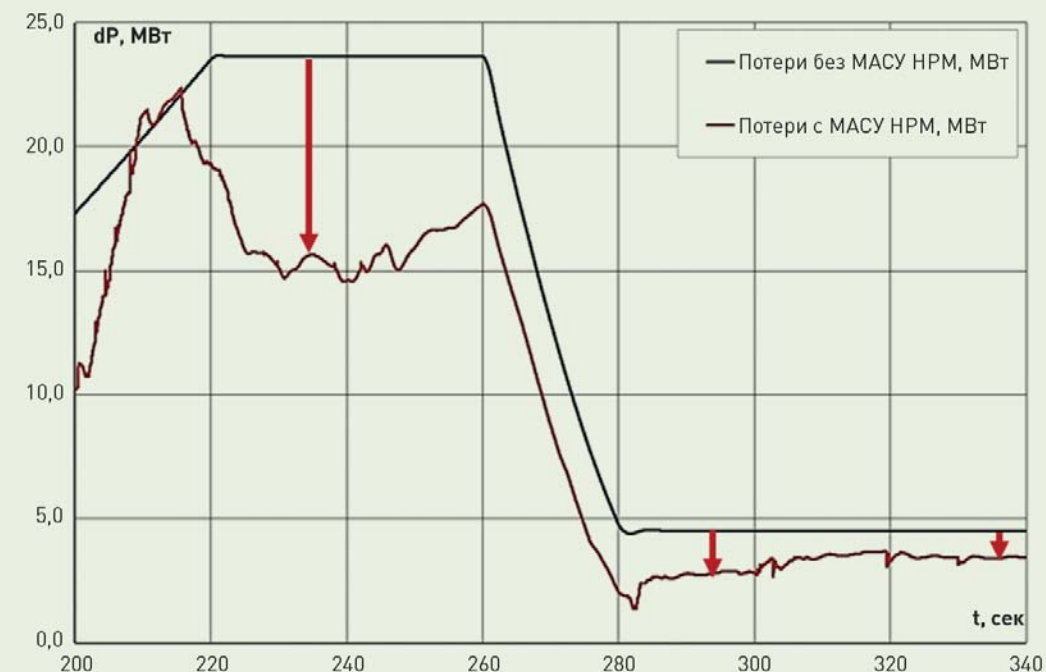


Рис. 3

ПРИМЕНЕНИЕ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ СИНХРОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ (СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ)

Применение асинхронизированных синхронных машин (АСМ), а также асинхронизированных статических компенсаторов (АСК) позволяет снизить риск развития системных аварий, увеличить пропускную способность сетей, а также уменьшить потери электроэнергии в электрических сетях. На Полигоне ИЭС ААС выполняются работы по обоснованию мест размещения АСМ и АСК.

ПОЛИГОН ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ (ИЭС ААС)

На базе Центра системных исследований и разработок ОАО «НТЦ ФСК

ЕЭС» развернут цифровой Полигон интеллектуальных энергосистем (ИЭС ААС). Создание Полигона ИЭС ААС выполнялось поэтапно в три очереди. Первая демонстрация Полигона прошла в ноябре 2012 г. в рамках международного электроэнергетического форума «Электросетевой комплекс. Инновации. Развитие» (UPGRID). На сегодняшний день все используемые на Полигоне технологии моделирования и поддержки проектов отработаны и готовы для реализации соответствующих проектов.

АППАРАТНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПОЛИГОНА ИЭС ААС

Одним из основных требований при выборе коммуникационного и серверного оборудования По-

лигона являлось фактическое применение указанного оборудования на подстанциях ЕНЭС. Выполнение этого требования позволяет проводить на Полигоне ИЭС ААС комплексные испытания промышленных (опытно-промышленных) образцов автоматических систем управления в среде, максимально приближенной к условиям промышленной эксплуатации этих систем на электросетевых объектах. В частности, возможности Полигона позволяют воспроизвести на Полигоне ИТ-инфраструктуру подстанции (вплоть до указания фактических настроек локальной сети подстанции, на которой предполагается внедрение испытываемой системы управления).

Это, в свою очередь, позволяет снизить длительность и трудозатраты

ОСНОВНЫЕ АППАРАТНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПОЛИГОНА ИЭС ААС



Рис. 4

СИМУЛЯТОР РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ OPAL-RT



Рис. 5

при выполнении пуско-наладочных работ на подстанциях. Основные аппаратные составляющие Полигона ИЭС ААС представлены на рис. 4.

«Ядром» Полигона является цифровой программно-аппаратный симулятор для моделирования электроэнергетических систем в режиме

«жесткого» реального времени — OPAL-RT (рис. 5). В этом комплексе «аппаратно» реализован промышленный протокол передачи данных в соответствии с ГОСТ Р МЭК 60870-5-104, являющийся на сегодняшний день одним из основных протоколов передачи телемеханической информации на подстанциях и электростанциях, а также протокол «цифровой» подстанции МЭК 61850 (в части как GOOSE, так и SAMPLED VALUES).

Для визуализации результатов моделирования на Полигоне развернута промышленная автоматизированная система диспетчерско-технологического управления (АСДУ) от компании PSI AG в составе SCADA-системы и сервера телемеханики PSIconrol (red box). Также используется собственная уникальная разработка специалистов ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» —

мультиагентная SCADA-система (разработан опытный образец).

На Полигоне ИЭС ААС развернута промышленная система мониторинга переходных режимов (СМНР/ WAMS) отечественной компании ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис» (в составе четырех устройств синхронизированных векторных измерений с поддержкой стандарта МЭК 61850 и одного устройства синхронизации сигналов по данным систем ГЛОНАСС/GPS).

Работоспособность инфраструктуры Полигона подтверждена успешным проведением комплексных испытаний опытных образцов программно-технических комплексов (ПТК):

— системы автоматического управления напряжением и реактивной мощностью

энергокластера «Приморье», разработанной ОАО «Институт «ЭНЕРГО-СЕТЬПРОЕКТ»;

- мультиагентной автоматической системы управления напряжением и реактивной мощностью (МАСУ НРМ) энергокластера «Эльгауголь», разработанной ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведение комплексных испытаний и отработка интеллектуальных (энергоэффективных) решений на базе Полигона ИЭС ААС ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» обеспечат возможность оценки эффективности и целесообразности применения рассматриваемых технологий до их внедрения в эксплуатацию и в условиях, максимально приближенных к условиям промышленной эксплуатации. Это обеспечит снижение затрат ПАО «ФСК ЕЭС» на этапе пуско-наладочных работ при вводе новых автоматизированных систем в эксплуатацию, а также позволит выполнить «отбраковку»

неэффективных технологий и решений (без необходимости создания промышленного образца системы).

Кроме того, проведение комплексных «системных» (т.е. на базе моделей электроэнергетической системы) испытаний новых программно-технических комплексов обеспечит возможность повышения надежности функционирования электросетевого комплекса ЕНЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью (http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf).
2. Методический подход к разработке эталонной архитектуры интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью (материал Архитектурного комитета ИЭС ААС (<http://gridology.ru/>)).
3. Холкин Д., Новицкий Д., Иванов А., Сорокин Д. Инновационное развитие ЕНЭС на базе внедрения элементов интеллектуальных энергосистем с активно-адаптивными сетями (SmartGrid). — Сборник докладов

XVIII конференции международной ассоциации делового сотрудничества ТРАВЭК «Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного электротехнического оборудования. Энергоэффективность и энергосбережение». М., 2014.

4. Wooldridge M. An Introduction to Multi-Agent Systems. John Wiley and Sons Limited: Chichester, 2002.
5. McArthur S.D.J., Davidson E.M., Catterson V.M., Dimeas A.L., Hatziaargyriou N.D., Ponci F., Funabashi T. Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications. Part I: Concepts, Approaches, and Technical challenges // IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 22. № 4, 2007.
6. McArthur S.D.J., Davidson E.M., Catterson V.M., Dimeas A.L., Hatziaargyriou N.D., Ponci F., Funabashi T. Multi-Agent Systems for Power Engineering Application. Part II: Technologies, Standards, and Tools for Building Multi-agent Systems // IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 22. № 4, 2007.
7. Положение об энергетической политике ПАО «ФСК ЕЭС» (утвержденное решением Совета директоров ПАО «ФСК ЕЭС» от 24.08.2012 №171/2)



Рис. 6.
Проведение комплексных испытаний опытного образца ПТК САУ НРМ на Полигоне ИЭС ААС