**Развитие цифровых технологий для применения на ТЭС: от АСУ ТП и интеллектуального учета до «цифровой электростанции» и «цифрового двойника»**

Ожидается, что в ближайшие 10–15 лет в мировой энергетике произойдет радикальный скачок, который будет связан с внедрением «индустриального интернета вещей» (The Industrial Internet of Things — IIoT). По мере того как различные небытовые устройства (например, робототехнические комплексы на цифровом производстве), оснащенные датчиками и сенсорами и подключенные к Интернету, интранету (Ethernet), иным телекоммуникационным сетям, станут «общаться» между собой без вмешательства человека, трансформируются основные секторы экономики, в том числе и электроэнергетика.

Внедрение технологий IIoT повысит эффективность труда на предприятиях, позволит экономить на плановом ремонте оборудования и общих эксплуатационных затратах, минимизирует аварии на производстве и в целом увеличит предсказуемость промышленных систем, в том числе и систем тепловой генерации.

Активные разработки инновационных решений в электроэнергетике ведут такие компании – производители оборудования как GE, Siemens, ABB и др. Одна из крупнейших генерирующих компаний в Европе, RWE, уже внедрила облачную платформу управления энергоснабжением в Чехии. Тогда как в Италии для перехода пока только на «умную» систему учета энергопотребления компания Enel намерена вложить 2,8 млрд долл.

К элементам интернета вещей в электроэнергетики можно отнести технологии «цифровая ТЭС», «автоматизированная система управления технологическими процессами» (АСУ ТП), «автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии» (АСКУЭ[[1]](#footnote-1)) и иные, в том числе локальные, системы управления, например, системы автоматического регулирования (САР) газовых турбин, системы контроля и диагностики энергетического оборудования и пр.

*Технологии АСУ ТП.*

В настоящее время, АСУ ТП является неотъемлемой частью систем управления котельным, турбинным, водоподготовительным, электрическим и вспомогательным тепломеханическим оборудованием ТЭС, без которой её функционирование невозможно. Современные АСУ ТП реализуются на базе программно-технических комплексов (ПТК) различных производителей: как отечественных – «Торнадо-N», «ТЕКОН», «КВИНТ», так и зарубежных – «SPPA-T3000», «Ovation», «Honeywell» и т.д.

Современные АСУ ТП должны быть *полномасштабными*, то есть объединять в себе все распределенные подсистемы и локальные ПТК (измерение параметров, отображение параметрической информации и состояния органов управления арматурой и механизмами на мониторах, дистанционное управление (ДУ), САР, автоматика и технологические защиты, сигнализация, автоматический ввод резерва и блокировки) в единое целое на единой элементной и информационной базах. Для всех подсистем применяется однократный ввод информации в систему. Системы следует изначально проектировать многофункциональными, охватывающими контролем и управлением как тепломеханическое (котел, турбина, вспомогательные механизмы), так и электротехническое оборудование энергоблока. Отдельно должна проектироваться АСУ ТП водоподготовки и утилизации стоков.

Система распределенного технологического управления ТЭС состоит из трех уровней:

операторские станции, связанные между собой и с контроллерами по локальной вычислительной сети Ethernet;

микропроцессорные контроллеры (МПК), реализующие алгоритмы (дистанционное управление, автоматическое регулирование, защиты и блокировки) с модулями устройства связи с объектами (УСО) для сбора и первичной обработки измеряемых сигналов (МПК связаны с модулями УСО полевой шиной);

датчики измеряемых аналоговых и дискретных сигналов, исполнительные устройства.

Алгоритмы реализации информационных и управляющих функций АСУТП воплощаются в виде прикладного программного обеспечения (ППО) системы (преимущественно в виде ППО контроллеров в составе ПТК АСУТП).

Основные производители распределенных систем управления (Distributed Control System, DCS) и программируемых логических контроллеров (PLC) поддерживают сеть Ethernet для своих устройств, сетевые протоколы Industrial Ethernet и ряд технологий Ethernet (Ethernet/IP, Profinet, Modbus TCP), что является важной составляющей системных решений для полномасштабных АСУ ТП.

Основные проблемы полномасштабных АСУТП[[2]](#footnote-2) связывают с недостаточным техническим уровнем ПТК, неотработанностью алгоритмов управления и несовершенством технологии создания системы. Эти проблемы являются актуальными не только для электрогенерирующих компаний, но и для строящих собственных электростанций промышленных компаний (ПАО «Газпром», нефтяные компании и др.).

Проблема технического уровня ПТК в последние годы во многом утратила свою остроту вследствие широкого применения (при разработке ПТК) достижений в области новых информационных технологий и накопленного опыта по отработке инструментальных средств реализации типовых информационных и управляющих функций для впервые вводимых в действие полномасштабных АСУТП. Однако, выходя за пределы типовых функций в направлении создания интеллектуальных АСУТП, следует признать, что возможности современных ПТК весьма ограничены, что требует постоянного внимания к разработке новых вычислительных комплексов и расчетных алгоритмов.

Основным направлением совершенствования технологии создания АСУТП ТЭС является разработка и реализация математических моделей теплоэнергетического оборудования как технологического объекта управления (ТОУ). При этом технология создания АСУТП как наукоемкого изделия должна быть расширена путем включения дополнительных этапов (элементов), предполагающих разработку и применение математических моделей теплоэнергетического оборудования на следующих стадиях создания АСУТП:

на стадии функционального проектирования – в виде универсальной «компьютерной» модели, используемой для отработки алгоритмов автоматического управления;

на стадии ввода в действие (технологическое проектирование) – в виде модели реального времени, информационно совместимой с ПТК (например, реализуемой средствами ПТК) и используемой для отработки прикладного ПО основными функциональными задачами АСУТП.

Модели реального времени, информационно совместимые с ПТК, имеют многоцелевое назначение. Они должны использоваться как для своевременной подготовки персонала пользователя системы в целях адекватного представления особенностей новой технологии и оперативного функционирования в новой системе, так и для активного участия в отработке прикладного ПО функциональных задач АСУТП при предвари- тельном принятии ПО от пусконаладочной организации на соответствующем цифровом полигоне.

В целом математические модели ТОУ для многоцелевого применения должны удовлетворять следующим требованиям[[3]](#footnote-3):

быть реализуемыми как с помощью универсальных систем имитационного моделирования сложных динамических систем («компьютерные» модели), так и средствами ПТК АСУТП (модели реального времени);

иметь открытую структуру, т.е. быть обеспечивать возможность перехода от упрощенных структур к более полным, учитывающим специфические особенности конкретных установок;

быть всережимными и ориентированными на решение широкого класса задач управления и диагностирования ТОУ;

предусматривать возможность проверки их адекватности с учетом результатов функционирования реального ТОУ.

Все вышеописанные характеристики инновационных полномасштабных АСУ ТП позволяют естественным образом интегрировать их в цифровую модель ТЭС – *цифровую станцию*, которая будет описана нижи.

*Технологии АСКУЭ (АИИС КУЭ)*

АСКУЭ, или АИИС КУЭ, представляет собой интеллектуальную систему коммерческого учета электроэнергии - совокупность функционально объединенных устройств, предназначенная для измерения количества и иных параметров электрической энергии, определения объема мощности, автоматизированного сбора, передачи показаний приборов учета электрической энергии (мощности), обеспечивающая информационный обмен, хранение показаний приборов учета электрической энергии (мощности), предоставление информации о результатах измерения количества и иных параметров электрической энергии, определения объема мощности субъектам электроэнергетики и потребителям электрической энергии (мощности) реализующая механизмы управления электропотреблением.

Технические требования к устройствам интеллектуальной системы учета электрической энергии (мощности) устанавливаются в соответствии с законодательством Российской Федерации о рынках электрической энергии (мощности), о техническом регулировании и законодательством Российской Федерации об обеспечении единства измерений.

Интеллектуальные системы учета электроэнергии АСКУЭ (АИИС КУЭ) для генерирующих компаний включают в себя следующие подсистемы:

информационно-измерительный комплекс (ИИК) - объединяет функции, выполняемые измерительными трансформаторами и интеллектуальными приборами учета, а также функции измерения значений электроэнергии и мощности, их хранения в течение установленного времени и выдачи по запросам ИВК или инициативно, а также функции объекта диспетчерского управления;

информационно-вычислительный комплекс объекта электроэнергетики (далее - ИВКЭ) - выполняет функции сбора, первичной обработки и хранения данных учета, полученных от ИИК, а также функции преобразования форматов и протоколов передачи данных и выдачу данных учета по запросам ИВК. В качестве ИВКЭ могут выступать устройства сбора и передачи данных (УСПД), концентраторы, контроллеры, обеспечивающие доступ к информации по учёту электроэнергии на уровне ИИК. Допускается организация удаленного сбора данных без применения ИВКЭ в соответствии с проектным решением;

информационно-вычислительный комплекс сбора и обработки данных верхнего уровня (далее - ИВК ВУ) – выполняет функции запроса данных учета и вспомогательной информации от ИВКЭ или ИИК, их достоверизации, консолидации, хранения, анализа и представления, а также функции удаленного управления ИИК и ИВКЭ;

система сбора и передачи данных (ССПД), технические средства приема-передачи данных (оборудование локальной вычислительной сети (ЛВС) АИИС КУЭ, кабельная инфраструктура, средства передачи информации) - выполняют функции передачи данных учета и вспомогательной информации между функциональными элементами комплекса учета с требуемым уровнем надежности и скорости передачи.

система обеспечения единого времени (СОЕВ) – обеспечивающая синхронизацию единого времени во всех элементах системы учета в соответствии с единым календарным временем.

Одним из приоритетных направлений развития ССПД интеллектуальных систем учета электроэнергии является переход к стандартным протоколам передачи данных приборов учета электроэнергии, обеспечивающих защиту данных от несанкционированного вмешательства, в целях обеспечения интеграции данных в вышестоящие уровни системы учета электроэнергии по принципу «plug&play».

АСКУЭ (АИИСКУЭ) обеспечивает информационную базу для расчетов взаимных обязательств (требований) субъектов рынков и инфраструктурных организаций, для управления потреблением электроэнергии (мощности) и управления потерями электроэнергии в электрических сетях сетевых организаций. Основной функциональной единицей рассматриваемой системы является интеллектуальный прибор учета электроэнергии (ИПУЭ) («интеллектуальный счетчик»).

Так как в настоящее время отсутствует нормативное определение понятия ИПУЭ, для целей описания данной технологии будем исходить из обычая употребления данного понятия, смежных нормативных терминов и наименования технологии. Таким образом, в общем случае ИПУЭ - прибор коммерческого учета электрической энергии, присоединенный (интегрированный) к интеллектуальной системе учета электрической энергии (мощности) АСКУЭ (АИИСКУЭ) и соответствующий требованиям применимых нормативных правовых актов Российской Федерации, технических регламентов и документов по стандартизации.

В общем случае в функции ИПУЭ входят:

автоматизированные измерения, сбор, хранение и первичная обработка данных;

передача результатов измерений электрической энергии, других параметров режима (токи, напряжения, частота, реактивная мощность, реактивная энергия) в адреса (в зависимости от архитектуры систем) АИИС КУЭ, ИСУЭ, АСУ ТП ТЭС, подстанций, центров правления сетями с возможностью двустороннего информационного обмена;

отображение данных на дисплее прибора (по запросу);

предоставление возможности дистанционного управления с высших уровней (в зависимости от архитектуры систем) АИИС КУЭ, ИСУЭ, АСУ ТП ТЭС, подстанций, центров управления электрическими сетями;

контроль технологических параметров электрической сети, включающий контроль ПКЭ, уровня потребительской нагрузки и мониторинг работоспособности системы и ее компонентов;

дистанционное управление включением и отключением электрической энергии (опционно - для распределительных сетей);

возможность своевременного обнаружения и ликвидации неисправностей;

предотвращение отключения электрической сети и падения напряжения в реальном времени (опционно - для электрических сетей);

информационная интеграции в АСУ ТП ТЭС.

Не существует принципиальных ограничений возможности применения измерительных устройств ИПУЭ в качестве устройств синхронизированных векторных изменений (УСВИ), или PMU, а также в качестве системы мониторинга переходных процессов (СМПР) уровня присоединения на ТЭС.

Структура системы учета и каналов связи должна позволять пользователям генерирующей компании иметь доступ на любой уровень системы.

Системы учета электроэнергии в генерирующей компании должны охватывать все точки коммерческого (расчетного и контрольного) и технического учета активной и реактивной электроэнергии и мощности с целью получения полного баланса электроэнергии на станциях, включая балансы по уровням напряжения, секциям шин и собственным нуждам.

Интеллектуальные системы учета электрической энергии должны включать в себя или обеспечивать интеграцию со средствами защиты от несанкционированного доступа, в том числе идентификацию, аутентификацию и авторизацию персонала при доступе к системе, мониторинга действий персонала, средствами антивирусной защиты и средствами контроля целостности программно-аппаратной части.

АИИС КУЭ как цифровая интеллектуальная система, также как и АСУ ТП, является частью цифровой электростанции.

*Технологии «цифровой электростанции»*

«Цифровая электростанция» (ЦЭС), или «цифровой двойник» электростанции (power plant digital twin) представляет собой единый интегрированный комплекс проблемно-ориентированных моделей в кибер-физической производственной системе станции.

Можно сформулировать определение этого понятия в более прикладном аспекте:

ЦЭС – это электростанция с высоким уровнем автоматизации управления технологическими процессами, оснащенная развитыми информационно-технологическими и управляющими системами и средствами (АСУ ТП, ССПИ, АИИС КУЭ, и др.), в которой все процессы информационного обмена между элементами станции, информационного обмена с внешними системами, а также управления работой станции осуществляются в цифровом формате. При этом основное и вспомогательное тепломеханическое оборудование, электрооборудование и компоненты информационно-технологических и управляющих систем функционально и конструктивно ориентированы на поддержку цифрового обмена данными.

Задачи строительства и эксплуатации оборудования, зданий и сооружений ТЭС на всех стадиях их жизненного цикла с учетом их технологической сложности и опасности с одной стороны, и повсеместное внедрение профильных систем управление предприятием (ERP- и EAM-системы) с другой стороны, обуславливают рост актуальности цифрового динамического описания их устройства, режимов с учетом имитации управления, а также отображения информации для решения различных задач строительства и эксплуатации станций.

В настоящее время в связи с появлением сверхмощных вычислительных комплексов (супер-ЭВМ) стало возможным создание виртуальных моделей сложных технических систем, используя принципы CALS-технологий, предсказательного и имитационного (симуляционного) моделирования, а также технологий документирования их жизненного цикла.

Таким образом, «цифровой энергоблок», «цифровая станция», *«цифровой двойник», power plant digital twin* — это набор системных конструктивно - режимных моделей, необходимых при проектировании и эксплуатации энергоблоков и ТЭС, которые должны постоянно корректироваться по результатам измерений с разумной дискретностью. Мониторинг физического объекта - ТЭС осуществляется на основе замкнутого цикла информационного обмена между ним и его виртуальной моделью (цифровым двойником).

Применение цифровых двойников позволит оптимизировать трудозатраты и обеспечит корректное и вариантное моделирование энергоблоков и станций в т. ч. для целей: выбора и обоснования тепловых схем (в т.ч. газовоздушного и пароводяного трактов), АСУ ТП, компоновки и выбора оборудования, внедрения мероприятий по повышению энергоэффективности.

Виртуальные модели, разработанные на стадии проектирования реконструкции и технического перевооружения действующих ТЭС, помогут обосновать проектные решения, точно увязать их с фактическими объемно-планировочными решениями и геометрическими характеристиками (привязка с помощью лазерного сканирования и геоинформационных систем), выбрать и проверить АСУ ТП. По некоторым оценкам, они позволят почти в 2 раза сократить сроки проектирования и обеспечат минимизацию ошибок в проектной и рабочей документации.

На стадии эксплуатации *цифровые двойники* будут служить инструментами:

* обучения оперативного персонала (тренажер);
* обеспечения достоверных расчётов плановых и отчётных технико-экономических показателей (ТЭП) энергоблоков и станции в целом;
* глубокой и всесторонней предсказательной диагностики технического оборудования, технологических систем, зданий и сооружений;
* анализа причин инцидентов и аварий, а также выбора мероприятий по их предотвращению;
* оптимизации стоимости жизненного цикла (ЖЦ) на основе предсказательного моделирования, включая планирование технического обслуживания и ремонтов (ТОиР), реконструкцию и техническое перевооружение;
* оптимизации загрузок оборудования для продаж электроэнергии и тепла (практически в реальном масштабе времени);
* оптимизации оказания платных услуг по обеспечению системной надёжности;
* выбора и обоснования мероприятий по повышению энергоэффективности и экологической безопасности ТЭС;
* наладки систем управления по принципу «дополненной реальности» (виртуальная модель объекта управления – реальная аппаратура, средства связи и программное обеспечение).

Основными сквозными цифровыми технологиями, которые развиваются в рамках настоящего проекта, являются (согласно перечню, приведенному в программе «Цифровая экономика Российской Федерации»):

* большие данные;
* нейротехнологии и искусственный интеллект;
* новые производственные технологии;
* промышленный интернет;
* технологии беспроводной связи;
* технологии виртуальной и дополненной реальностей.

В России прототипом полномасштабной *power plant digital twin* является «Виртуально-цифровая АЭС» для атомных энергоблоков нового поколения с реакторами ВВЭР-1200 проекта АЭС-2006[[4]](#footnote-4) (ГК «Росатом»).

Одной из находящихся в стадии освоения инновационных цифровых технологий в строительстве является BIM – *building information model* (системы национальных стандартов «Системы дизайн-менеджмента» и «Интегрированный подход к управлению информацией жизненного цикла антропогенных объектов и сред»). Данная технология может быть интегрирована в ЦЭС уже на стадии разработки проектной документации для строительства.

BIM – это информационное моделирование здания или информационная модель здания, подход к возведению, оснащению, обеспечению эксплуатации и ремонту здания (к управлению жизненным циклом объекта), который предполагает сбор и комплексную обработку в процессе проектирования всей архитектурно-конструкторской, технологической, экономической и иной информации о здании со всеми её взаимосвязями и зависимостями, когда здание и всё, что имеет к нему отношение, рассматриваются как единый объект. Таким образом, технологии BIM должны стать основой полноценных цифровых моделей устройства зданий и сооружений ТЭС.

Компания AVEVA (вместе с подразделением *Digital Enterprise* компании *WorleyParsons*) разработала серию продуктов, реализующих концепцию «Цифрового актива», суть которого заключается в создании сети интегрированных данных, увязанных с контекстом[[5]](#footnote-5). На всем протяжении жизненного цикла актива осуществляется проверка его соответствия стандартам, что гарантирует качество информации и повышает ее ценность.

Уникальная методология цифрового актива - открытая среда для всех сотрудничающих сторон. Каждое решение предлагает соответствующий доступ к информации, валидации и контролю для поддержки критически важных проектных и операционных мероприятий. Это создает единый надежный источник информации для лучшего сотрудничества, принятия решений и снижения рисков как для проекта, так и для всей организации.

Компания General Electric (GE) анонсировала создание линейки комплексных продуктов (программное обеспечение, реализующее новый уровень наблюдаемости и управляемости энергоблоков) под наименованием «*power plant digital twin».* Эти продукты предназначены, в первую очередь, для угольных и парогазовых энергоблоков. В последнем случае основной упор делается на контроле и управлении газотурбинным двигателем производства GE.

Концепция *Digital twin* является основным трендом в деятельности известной компании ANSYS[[6]](#footnote-6) по созданию инструментов математического моделирования процессов и устройств, в том числе для целей электроэнергетики.

Ряд важных шагов в области *digital twin* для отдельных изделий и систем (в основном, с целью ускорения и оптимизации конструктивных решений оборудования), а также для систем сопровождения их ЖЦ сделала компания Siemens.

По состоянию на конец 2018 г. компании PTC, SAP, Schneider Electric и Siemens занимали самые высокие места в рейтинге компаний, занимающихся созданием цифровых двойников. При этом компании PTC, GE и Telit – лучшие по возможности настройки и использования промышленных протоколов. PTC предлагает следующие передовые программные средства: Vuforia для разработки приложений дополненной реальности, Kepware для обеспечения настройки протоколов и подключения устройств в единую сеть, а также несколько продуктов ThingWorx для создания цифрового двойника.

*ВЫВОДЫ*

1. Основное направление научно-технического прогресса в производстве электроэнергии на основе традиционного термодинамического цикла Ренкина связывают во всем мире с цифровыми технологиями проектирования, строительства и эксплуатации, которые должны найти логическое завершение в цифровой электростанции, или в её цифровом двойнике.

2. Движение в этом направлении идёт, на самом деле, уже давно и в тех областях инженерной деятельности, в которых исторически складывается возможность применения наилучших доступных цифровых технологий. Начало этим технологиям в России было положено ещё в начале 70-х годов прошлого века при создании первых, пока ещё малофункциональных, систем АСУ ТП энергоблоков и элементов АСУ ТП общестанционного назначения.

3. Период с начала 2000-х годов характеризуется интенсивным развитием прикладных цифровых технологий в электрогенерирующем комплексе, таких как внедрение полномасштабных АСУ ТП, АИИСКУЭ, цифровых систем релейной защиты и автоматики, 3D-проектирование и управление проектами на базе современных программных комплексов.

4. Поэтапное внедрение концепции «*power plant digital twin»* означает переход на качественно новый уровень обеспечения жизненного цикла технологических систем электростанций, начиная от замысла проекта, включая период строительства и заканчивая выводом их из эксплуатации с утилизаций или консервацией. Данная концепция позволит радикальным образом оптимизировать затраты на базе больших объемом данных, предиктивной аналитики, виртуальной и дополненной реальностей.

1. Точнее – АИИС КУЭ, автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии. [↑](#footnote-ref-1)
2. Тверской Д.Ю., Тверской Ю.С. Задачи и проблемы совершенствования АСУТП энергоблоков в направлении их интеллектуализации: Сб. докл. IV Всерос. науч. конф. «Управление и информационные технологии». – СПб: ЛЭТИ, 2006. – С. 230–236 [↑](#footnote-ref-2)
3. Тверской Ю.С., Таламанов С.А. О новом классе АСУТП, оснащаемых математическими моделями управляемого технологического оборудования // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – №8. – С. 31–33. [↑](#footnote-ref-3)
4. Аркадов Г.В., Жукавин А.П., Крошилин А.Е., Паршиков И.А., Соловьев С.Л., Шишов А.В. Виртуально-цифровая АЭС - современный инструмент поддержки жизненного цикла атомных энергоблоков с ВВЭР // Теплоэнергетика. № 10. 2014. С. 3 – 11. [↑](#footnote-ref-4)
5. Цифровой актив приносит реальную прибыль // CAD/CAM/CAE Observer, #8 (100). 2015. [↑](#footnote-ref-5)
6. ANSYS ADVANTAGE / ISSUE 1. 2017 [↑](#footnote-ref-6)