

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ В ЭНЕРГЕТИКЕ

ОТ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ К ЦИФРОВОМУ ДВОЙНИКУ АСУ ТП ТЭС

© 2021 г. И. М. Шаровин^а, В. В. Лопатин^б, В. А. Трофимов^б, А. В. Трофимов^{с, *}

^аООО “Интертехэлектро-Проект”, Уланский пер., д. 24, стр. 1, Москва, 107045 Россия

^бООО “Энергоавтоматика”, Остатовский проезд, д. 3, стр. 2, Москва, 109316 Россия

^сНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

*e-mail: trofi56@bk.ru

Поступила в редакцию 06.07.2020 г.

После доработки 06.07.2020 г.

Принята к публикации 26.08.2020 г.

Рассмотрено понятие цифрового двойника автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) тепловых электростанций. Предложены принципы его формирования и использования на основе проектной базы данных, разработанной в рамках системы автоматизированного проектирования (САПР) тепловой автоматики и измерений. Приведены примеры систем автоматизации проектирования, ориентированных на решение аналогичных задач, указаны особенности предлагаемой САПР. Описаны типовая структура АСУ ТП и взаимосвязи основных ее компонентов: датчиков, кабелей, исполнительных и щитовых устройств, таблиц подключения сигналов, а также программно-технического комплекса (состав и распределение модулей устройств связи с объектом). Дано описание структуры базы данных проекта, обеспечивающей комплексную работу как с проектной документацией, так и с информацией об основных компонентах АСУ ТП. Показаны последовательность выполнения проектных процедур, связи проектной базы данных и базы данных САПР при их реализации. Рассмотрены способы повышения производительности труда проектировщиков, такие как применение типовых решений при организации измерений и схем управления исполнительными устройствами тепловых электростанций; многократное использование информации при однократном ее вводе; синтез текстовой и графической проектной документации на основе базы данных проекта. Предложено использовать цифровой двойник на всех этапах жизненного цикла объекта – при проектировании, монтаже, наладке, эксплуатации. Продемонстрирована эффективность работы с информацией благодаря интуитивно понятному интерфейсу для навигации по проекту. Приведены примеры объектов, при реализации которых использовалась рассматриваемая САПР.

Ключевые слова: АСУ ТП, ТЭС, цифровизация, цифровой двойник, САПР, базы данных, проектирование, программно-технический комплекс, модель данных, рабочая документация

DOI: 10.1134/S0040363621030061

В настоящее время в рамках концепции цифровизации энергетики [1] активно используется понятие цифрового двойника. Работы по созданию цифровых двойников ведутся для различных объектов энергетики [2–6] как на отечественных предприятиях, так и за рубежом.

Технология цифровых двойников рассматривается в рамках развития систем поддержки принятия решений в целях снижения операционных затрат и развития новых видов бизнеса. Предлагается их использование в различных процессах: техническое обслуживание и ремонт, управление знаниями и персоналом, системы управления

производственными активами. Стоит отметить, что не существует единого понятия цифрового двойника. Например, в стандарте ПАО “Россети” [7] цифровой двойник определяется как компьютерное представление конкретного физического изделия, либо группы изделий, либо механического или технологического процесса, полностью повторяющее свой физический прообраз, начиная от движений и кинематики и заканчивая представлением его физической среды и текущих условий эксплуатации. Это понятие многоаспектно. Здесь присутствуют как трехмерные модели строительных конструкций и оборудования,

так и расчетные схемы и базы данных оборудования. В этой статье акцент делается на принципы создания и эксплуатации цифровых двойников автоматизированных систем управления технологическими процессами тепломеханического оборудования (ТМО) ТЭС.

Ключевой фактор цифровизации — обмен данными в цифровой форме на основе информационно-телекоммуникационных технологий. Разработка цифровых двойников невозможна без использования систем автоматизированного проектирования. В данной статье предложены пути решения этой задачи в рамках лицензионного программного продукта САПР тепловой автоматики и измерений (САПР ТАИ) [8–10].

Базу данных САПР ТАИ, создаваемую в процессе проектирования АСУ ТП, и средства работы с ней предлагается использовать в качестве основы цифрового двойника. Это позволяет работать с актуальной информацией на всех этапах жизненного цикла объекта: при проектировании АСУ ТП, изготовлении низковольтных комплектных устройств на заводах, выпускающих щитовое оборудование, при монтаже, пусконаладочных работах, эксплуатации. Причем следует отметить, что продолжительность первых четырех этапов составляет от 6 до 18 месяцев, а эксплуатация длится более 10 лет.

Необходимость обращения к проектной документации регулярно возникает в ходе эксплуатации АСУ ТП, в частности при выполнении ремонтных работ (замена электропривода, изменение типа аналогового или дискретного датчика) или расширении/модернизации системы управления. Поиск нужной информации может быть довольно трудоемким, так как объем проекта обычно весьма значителен — это тысячи сигналов, аппаратов, кабелей, чертежей принципиальных и монтажных схем. При разработке проектов обычно вместе с бумажной копией заказчику передают информацию на машинном носителе, но, как правило, это файлы в формате PDF и работа с ними мало отличается от работы с обычными бумажными носителями. Помочь службе эксплуатации на каждом из этапов обслуживания программно-технического комплекса (ПТК) (освоение нового оборудования, период эксплуатации без внесения изменений, реконструкция, расширение, модернизация) может цифровой двойник, базирующийся на комплексной базе данных, которая содержит информацию обо всех элементах АСУ ТП с возможностью поиска необходимых данных.

Для иллюстрации предлагается рассмотреть простую задачу. Можно предположить, что на ав-

томатизированное рабочее место оперативного персонала пришло сообщение о недостоверности сигнала от какого-то датчика температуры. Для устранения дефекта персоналу необходимо определить первопричину его возникновения: где установлен непосредственно датчик; по какому кабелю осуществляется его связь с соединительной коробкой (СК); номера самой СК и ее клемм, на которые подключены жилы кабеля датчика; номер кабеля от СК до шкафа управления; номер шкафа управления; номера клемм внутри шкафа; номер модуля ввода/вывода и клеммы модуля устройства связи с объектом (УСО). И если поиск шкафа управления и модуля УСО проводится довольно быстро с помощью средств программного обеспечения инженерной станции, то определять тип подключенного датчика, его заказной номер для завода, а также искать номера подключаемых кабелей и клемм придется по документации вручную.

ОПИСАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

На рис. 1 приведена укрупненная структура типичной распределенной АСУ ТП ТМО. Условно здесь можно выделить три уровня.

На верхнем уровне находятся автоматизированные рабочие места оперативного персонала (АРМ) и серверы для сбора и хранения информации, а также сетевое оборудование Ethernet, по которому идет обмен данными между автоматизированными рабочими местами, серверами и контроллерами.

С расположенными на среднем уровне контроллерами, реализующими алгоритмы управления и защит, по полевой шине связаны модули УСО, обеспечивающие прием физических сигналов и передачу команд полевого оборудования.

На нижнем (полевом) уровне расположены датчики (для измерения температуры, давления, расхода и пр.) и исполнительные устройства (запорно-регулирующая арматура и механизмы собственных нужд). Также на рис. 1 представлены основные устройства, обеспечивающие формирование и передачу сигналов: шкафы присоединений и устройства коммутации приводов исполнительных устройств, стенды датчиков и соединительные коробки для их установки и подключения, контрольные кабели.

Кроме физической реализации на рисунке штриховыми линиями выделена логическая часть, показывающая связь между полевым и контроллерными уровнями, которая представля-

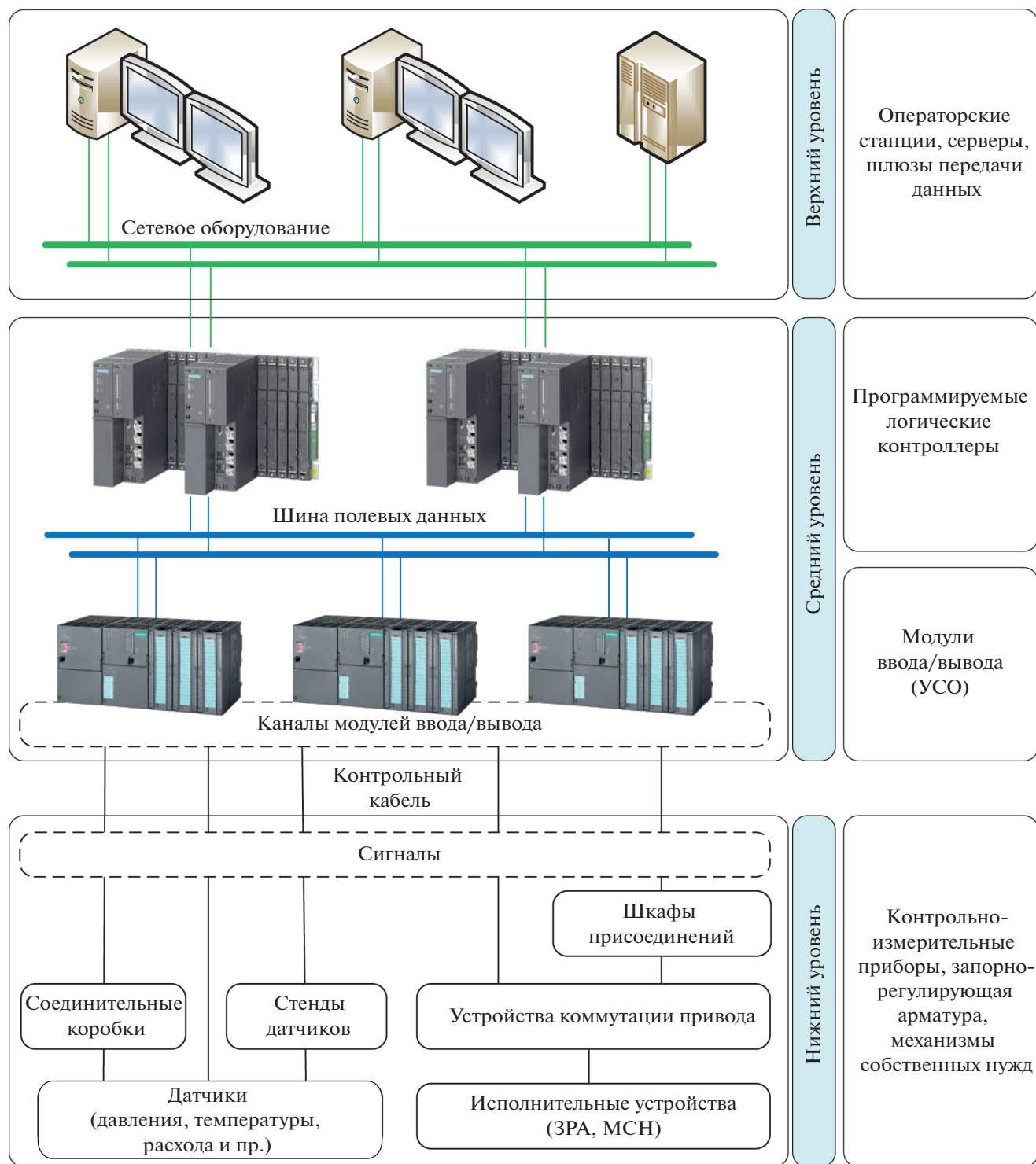


Рис. 1. Укрупненная структура АСУ ТП ТМО.

УСО — устройства связи с объектом; ЗРА — запорно-регулирующая арматура; МСН — механизмы собственных нужд

ется в виде таблиц подключения сигналов к каналам модулей УСО.

Описание всех компонентов АСУ ТП содержится в проектной документации. Все указанные

стадии создания АСУ ТП для эксплуатации, в конечном итоге, сводятся к двум основным: разработка схемной документации, содержащей также таблицы подключения сигналов, и программиро-

вание ПТК (мнемосхемы АРМ, программы контроллеров, описание цифрового обмена и пр.). Программирование ПТК в данной статье не рассматривается. Будет представлена схемная документация, на базе которой может быть сформирована основа цифрового двойника.

ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ

Разработка схемной документации нижнего и среднего уровней АСУ ТП ведется в большинстве проектных организаций практически вручную, хотя и с использованием универсальных текстовых и графических компьютерных редакторов (Word, Excel, AutoCAD и др.). Объем документации зачастую составляет тысячи листов, подготовка значительной ее части – рутинная работа по созданию однотипных схем (для типового энергоблока 200 МВт это более 3000 сигналов и более 400 единиц запорно-регулирующей арматуры и механизмов собственных нужд), которая может быть выполнена с помощью САПР.

Отдельно следует отметить, что на рынке программных продуктов САПР представлены средства для автоматизации проектирования АСУ ТП. Например, импортные системы SmartPlant [11] и EPLAN PPE [12] позволяют описывать подсистемы измерения, автоматики и защит, включая принципиальные и монтажные схемы. Они изначально ориентированы на использование проектной базы данных при эксплуатации объекта автоматизации и содержат развитые средства навигации по проектной документации. Однако эти средства рассчитаны, в основном, на работу с каналами измерения и индивидуальное описание каждого канала. Отечественная САПР AutomatiCS [13] имеет развитые средства синтеза монтажных схем, однако требует значительных временных затрат для предварительной настройки среды проектирования из-за использования непривычной для проектировщика терминологии.

Опыт проектных институтов и организаций показывает, что внедрение специализированных САПР поначалу резко тормозит работу подразделений, а процесс перехода от привычного проектирования к полноценной работе в САПР с заданными шаблонами занимает от 6 до 18 мес в зависимости от масштабов проектной группы и проектного института.

Отличительная особенность САПР ТАИ заключается в том, что она создана разработчиками АСУ ТП, имеющими большой опыт не только в проектировании, но и во внедрении программно-технических комплексов АСУ ТП согласно действующей нормативно-технической документа-

ции. Следует выделить следующие особенности САПР ТАИ, которые позволяют пользователям быстро осваивать программный продукт, а также сокращают время на проектирование и выпуск документации:

1. Применение общепринятой терминологии: контрольно-измерительные приборы и автоматика (КИПиА), запорно-регулирующая арматура (ЗРА), механизмы собственных нужд (МСН), термосопротивление (ТС), термopара (ТП), ряды клеммных зажимов, трубные проводки и пр.

2. Наличие базового набора схем трубных проводок, охватывающего 100% объема схем для ТЭС, ТЭЦ, ГРЭС и др. (схемы подключения датчиков давления, расхода, уровня и пр.).

3. Единая база данных (БД) проекта, обеспечивающая 100%-ный контроль над версионностью проектных работ. Актуальное отображение всех подключенных к ПТК сигналов, количество резервных каналов по каждому отдельно взятому типу (термопары, термосопротивления, унифицированные аналоговые сигналы, дискретные входы и выходы и пр.) – все это избавляет проектировщика от рутины и помогает службе эксплуатации оперативно находить в проекте свободные клеммы для подключения новых сигналов.

4. Отсутствие необходимости отмечать всю информацию по измеряемому параметру для отображения его в системе. Для формирования перечня сигналов достаточно указать уникальный номер датчика (KKS), а остальные поля можно заполнять по мере поступления данных о выборе производителя оборудования или необходимости формирования сводной спецификации на закупку оборудования.

5. Проверка БД на наличие коллизий [присутствие в БД проекта позиций с одинаковыми KKS-номерами, наличие в наименованиях кириллических или латинских символов (зависит от того, в какой кодировке должен выпускаться проект)].

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Рассматриваемая САПР ТАИ ориентирована на разработку проектов нижнего (полевого) и среднего уровня ПТК АСУ ТП и обеспечивает их бесшовную интеграцию. В процессе проектирования создается и формируется комплексная база данных, описывающая схемную и информационную части проекта, которая может использоваться в качестве цифрового двойника на этапе эксплуатации. Система автоматизированного проектирования тепловой автоматики и измерений имеет интуитивно понятный интерфейс, а также использует стандартный лексикон, общеприня-

тый в среде разработчиков и эксплуатационного персонала АСУ ТП и КИПиА, что обеспечивает простоту навигации по проекту. База данных хранится в универсальном формате MS ACCESS. Графическая информация выводится из САПР в графическом виде в формате *.dwg. Чертежи при проектировании формируются автоматически в графическом редакторе AutoCAD или его более бюджетных аналогах, а на этапе эксплуатации для быстрого просмотра может использоваться бесплатная версия программы nanoCAD.

Пользователь работает в табличном редакторе и для формирования графической части проекта может выводить данные в отдельные самостоятельные документы, что избавляет проектировщиков от рутинной работы по созданию однотипных чертежей вручную и исключает при этом возможные ошибки.

Основой системы автоматизированного проектирования служит база данных проекта, представляющая собой взаимно интегрированные БД, алгоритмическое обеспечение и средства управления проектом, с помощью которых генерируется выходная документация и осуществляется навигация по проекту. На рис. 2 приведены укрупненная структура БД проекта, ее связь с БД САПР и информационные потоки при разработке проекта. Стрелки показывают последовательность использования данных. Линии связи в БД проекта фактически отражают схему данных, из которой видно, что вся информация взаимосвязана и на ее основе могут быть сформированы запросы с различным сочетанием атрибутов. Ввод данных в различные разделы проекта может осуществляться параллельно по мере его разработки. Следует отметить, что практически во всех разделах данные используются совместно. Например, при разработке кабельных связей нужны списки соединяемых устройств, а при формировании таблиц заполнения шкафов присоединений – перечень исполнительных устройств и т.д.

Для разработки проектной документации характерно многократное использование одной и той же информации в различных формах в разных документах. Например, описание измеряемого параметра при формировании перечня параметров затем присутствует в спецификации на заказываемую аппаратуру, в схемах кабельных и трубных соединений, в таблицах и схемах подключения сигналов к ПТК. Поэтому одним из важнейших факторов, обеспечивающих повышение эффективности процесса проектирования при работе с САПР ТАИ, является однократный ввод информации с возможностью ее последующего использования в различных документах.

ПЕРЕХОД К ЦИФРОВОМУ ДВОЙНИКУ

В результирующей БД проекта легко может быть получена комплексная информация об управлении любым исполнительным устройством, что позволяет быстро решить задачу поиска данных, рассмотренную в начале статьи.

По законченной БД проекта генерируются чертежи рабочей документации. В САПР ТАИ включены специальные средства для хранения чертежей в принятой у заказчика системе документооборота. При этом сохраняется связь документов с объектами проекта, что позволяет оперативно находить нужные чертежи. Возможность вывода информации из САПР ТАИ может облегчить труд даже на заводе – изготовителе шкафов, при монтаже и наладке АСУ ТП непосредственно на объекте. Вывод информации из САПР ускоряет сборку шкафов управления на заводе-изготовителе, позволяя выводить на печать специализированных принтеров нумерацию клемм, реле, маркировку кембриков и пр., а также сокращает время на печать бирок для маркировки кабельной продукции и кембриков для маркировки жил проводов.

Создание цифрового двойника в настоящее время – это в большей мере описание (оцифровка) действующего производства. Цифровой двойник не формируется при разработке нового объекта, а является результатом труда узкоспециализированной организации, часто даже не имеющей опыта в проектировании и весьма далекой от разработки документации по внедрению ПТК АСУ ТП. При использовании САПР ТАИ цифровой двойник – это следствие деятельности проектной организации по подготовке рабочей документации. Получившаяся в итоге модель нижнего и среднего уровней на 100% соответствует конечным решениям в проекте, реализованном на объекте. Также следует отметить, что возможна и другая постановка задачи – создание цифрового двойника по существующей реализации ПТК АСУ ТП (авторам неоднократно приходят подобные запросы). С этой задачей САПР ТАИ справляется как нельзя лучше. Формирование БД по существующему проекту хоть и отличается от создания нового и имеет свои нюансы, но, тем не менее, также позволяет достичь фактически 100%-ного результата по цифровизации производственного процесса.

В настоящее время САПР ТАИ активно применяется для проектирования различных объектов с реализацией как нижнего, так и среднего и верхнего уровней ПТК АСУ ТП. На текущий мо-

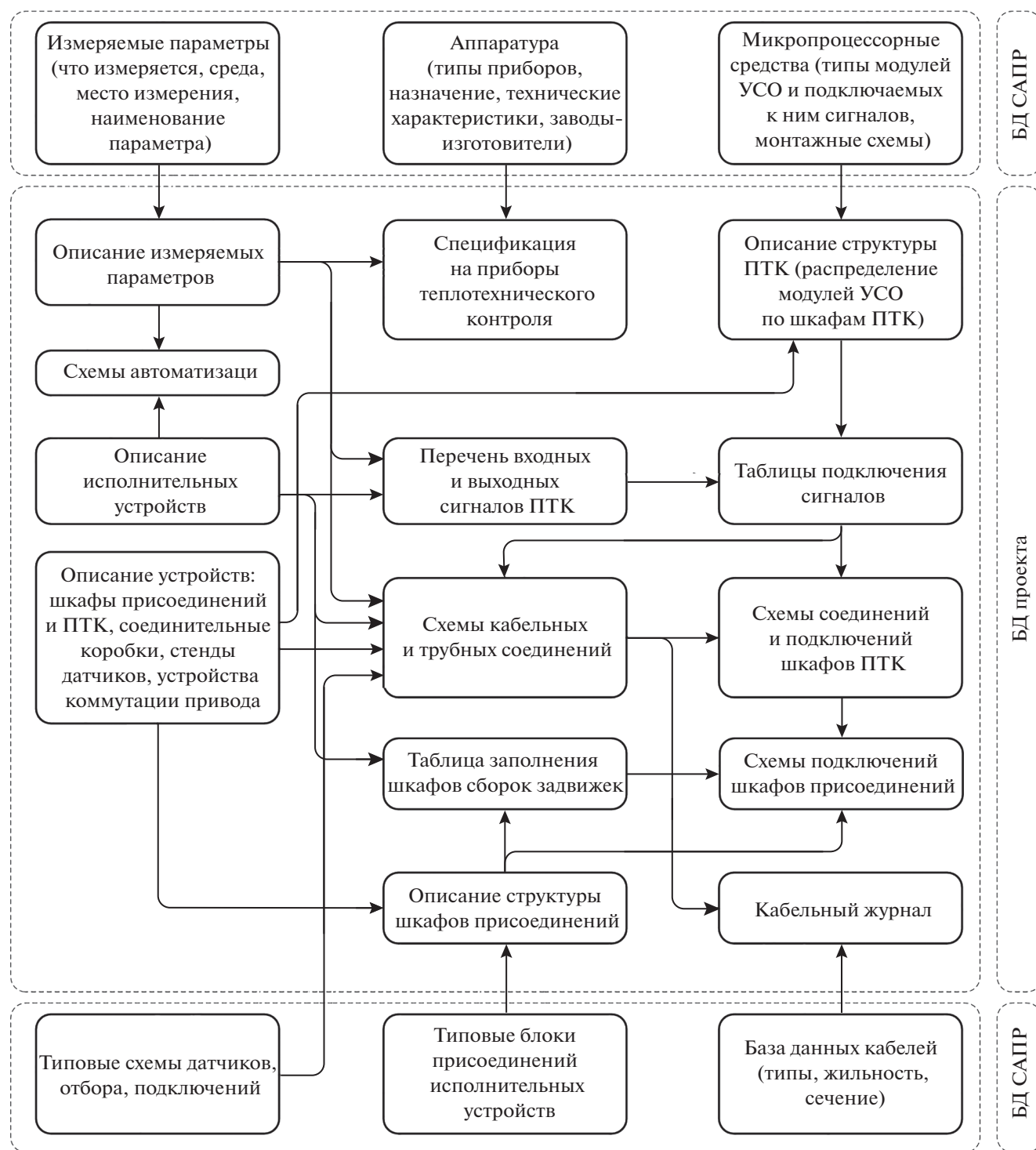


Рис. 2. Формирование проекта в САПР ТАИ

мент в среде разработки реализовано более ста объектов тепловой энергетики. Из них можно выделить следующие:

реконструкция энергоблоков ст. № 3–7 ТЭЦ-25 Мосэнерго с внедрением ПТК Siemens SPPA-T3000; те же самые энергоблоки через несколько лет пе-

реведены на ПТК ТЕКОН также с применением САПР ТАИ (рабочая документация выпускалась полностью в САПР ТАИ);

внедрение ПТК АСУ ТП на энергоблоке ст. № 2 Ириклинской ГРЭС (турбина К-300-23.5 и дубль-блок);

реконструкция Владивостокской ТЭЦ-2 с переводом котлоагрегатов ст. № 1–10 (БКЗ-210-13.8) на сжигание природного газа;

реконструкция турбоагрегата ст. № 8 (Т-100-13) Курганской ТЭЦ-1 с внедрением ПТК АСУ ТП (1400 сигналов).

Современные компьютеры покоряют все новые уровни, решая вычислительные задачи любой сложности и помогая людям автоматизировать практически все аспекты своей деятельности. При этом автоматизированные системы хотя и хорошо регламентированы для ТЭС и ТЭЦ и имеют уникальную методическую базу, но пока все же не позволяют даже современным компьютерам (и программным комплексам) автоматически создавать проекты ПТК АСУ ТП по управлению турбо- и котлоагрегатами. До сих пор не обойтись без использования интеллектуального труда высококлассных специалистов в области как разработки оборудования для полевого уровня, так и программирования. Для повышения производительности труда инженерным кадрам, как показывает опыт, требуются качественные средства автоматизации, позволяющие освободить персонал от рутинных операций и сделать упор на концептуальные аспекты по созданию систем управления.

ВЫВОДЫ

1. Разработка проектов с применением САПР ТАИ позволяет избавиться от длительного монотонного труда, повысить качество составляемой документации, сократить время, затрачиваемое на создание проектов (по сравнению с обычными методами работы), на 40%, а серийных объектов – на 80%.

2. Формируемая при проектировании в САПР ТАИ база данных проекта является основой для использования в качестве цифрового двойника АСУ ТП тепломеханического оборудования ТЭС.

3. Передача базы данных в цех тепловой автоматики и измерений и службы эксплуатации в качестве цифрового двойника и использование ее совместно с программной оболочкой САПР ТАИ позволяют существенно упростить поиск необходимой информации и обеспечивают актуализацию системы при расширении, модернизации или реконструкции АСУ ТП во время эксплуатации.

4. Работа с единой базой данных дает возможность поддерживать актуальность цифрового двойника на всех этапах жизненного цикла по созда-

нию и эксплуатации программно-технического комплекса АСУ ТП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Цифровая** трансформация электроэнергетики России: Материалы конф. Москва, 4–5 октября 2017 г. <http://digitenergy.ru/archive/energetics/transformation/>
2. **GE digital twin: analytic engine for the digital power plant.** General Electric Company, 2016. https://www.ge.com/digital/sites/default/files/download_assets/Digital-Twin-for-the-digital-power-plant-.pdf
3. **Дроздова Т.В., Елов Н.Е., Лебедев А.А.** Переход к цифровой энергетике: комплексный подход “Сименс” // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 2. С. 16–20. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:46c14af5-3dbe-4dcf-8625-0b38ceb54755/ru-creating-digital-networks.pdf>
4. **Захарченко В.Е., Сидоров А.А.** О цифровизации гидроэлектростанций // Автоматизация в промышленности. 2019. № 1. С. 23–28. <https://doi.org/10.25728/avtprom.2019.01.04>
5. **Прохоров А., Лысачев М.** Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / под науч. ред. Боровкова А. М.: ООО “АльянсПринт”, 2020. <https://digitalatom.ru/digital-twin-book>
6. **Боровков А.И., Рябов Ю.А.** Определение, разработка и применение цифровых двойников // Цифровая подстанция. 2019. № 12. С. 20–25.
7. **СТО 34.01-21-005-2019.** Цифровая электрическая сеть. Требования к проектированию цифровых распределительных электрических сетей 0,4–220 кВ. Утв. и введен в действие приказом ПАО “Россети” № 64 от 29.03.2019.
8. **Трофимов А.В.** Автоматизация проектирования АСУ ТП тепловых электростанций // Теплоэнергетика. 2009. № 10. С. 32–36.
9. **Трофимов А.В., Лопатин В.В.** Использование проектной базы данных САПР ТАИ при эксплуатации АСУ ТП ТЭЦ // Теплоэнергетика. 2013. № 10. С. 61–64. <https://doi.org/10.1134/S0040363613100111>
10. **Сайт программы САПР ТАИ.** www.saprtai.ru
11. **SmartPlant Instrumentation.** Process, Power & Marine: a textbook. Intergraph Corporation, 2011.
12. **Климов Д.** Применение модуля EPLAN PPE при сквозном проектировании АСУ ТП // Автоматизация проектирования. 2008. № 6. С. 50–53.
13. **Корольков В.В., Кудряшов И.С., Целищев Е.С.** Опыт использования средств САПР AutomatiCS при выполнении проекта АСУ ТП блока Березовской ГРЭС в ОАО “Зарубежэнергопроект” // CADmaster. 2015. № 1 (80). С. 54–58.

From Automated Design to Digital Double of APCS for a TPP

I. M. Sharovin^a, V. V. Lopatin^b, V. A. Trofimov^b, and A. V. Trofimov^{c, *}

^aООО Intertechelectro-Project, Moscow, 107045 Russia

^bООО Energoavtomatika, Moscow, 109316 Russia

^cNational Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

*e-mail: trofi56@bk.ru

Abstract—The concept of a digital twin of an automated process control system (APCS) of a thermal power plants is considered. The principles of its formation and use are proposed on the basis of a design database developed within the framework of a computer-aided design (CAD) system for thermal automation and measurements. Examples of design automation systems aimed at solving similar problems are given and the features of the proposed CAD system are indicated. The typical structure of the APCS and the relationship of its main components—sensors, cables, executive and switchboard devices, signal connection tables, as well as the software and hardware complex (composition and distribution of modules of communication devices with an object)—are described. A description of the project database's structure is given, which provides comprehensive work with both project documentation and information about the main components of the APCS. The sequence in execution of design procedures and links between the design database and the CAD database during their implementation are shown. Methods for increasing the productivity of designers are considered, such as the use of standard solutions in the organization of measurements and control schemes for actuators of thermal power plants, multiple use of information with a single input, and synthesis of text and graphic design documentation based on the project database. It is proposed to use a digital twin at all stages of the object's life cycle: during design, installation, commissioning, and operation. The effectiveness of working with information thanks to an intuitive interface for navigating through the project was demonstrated. Examples of objects, in the implementation of which the considered CAD system was used, are given.

Keywords: APCS, TPP, digitalization, digital twin, CAD, databases, design, software and hardware complex, data model, working documentation