

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ СИСТЕМ АСУ ТП АЭС НА ЭТАПЕ ЗАВОДСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Бывайков М.Е.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

lab31.5@mail.ru

Аннотация: Рассматривается задача проведения заводских испытаний систем, входящих в АСУ ТП АЭС, в условиях отсутствия реальных смежных систем. Предлагаются методы решения этой задачи с использованием цифровых двойников программно-технических средств для систем верхнего и нижнего уровней АСУ ТП АЭС.

Ключевые слова: атомная электростанция (АЭС), автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП), системы верхнего и нижнего уровней АСУ ТП АЭС, цифровые двойники программно-технических средств.

Введение

Перспективная платформа развития цифровых программно-технических средств Industry 4.0 включает применение цифровых двойников – цифровых копий реальных программно-технических средств [1,2]. Программно-технические средства цифровых двойников активно применяются на различных этапах жизненного цикла автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) атомных электростанций (АЭС) [3-8].

Одним из этапов жизненного цикла систем, входящих в АСУ ТП АЭС, являются заводские испытания, проводимые на площадке завода-изготовителя программно-технического комплекса (ПТК) соответствующей системы, входящей в АСУ ТП АЭС. Этап заводских испытаний проводится после этапа изготовления ПТК, перед этапом отгрузки ПТК на площадку энергоблока АЭС. Особенность (проблема) на этапе заводских испытаний – наличие реальных программно-технических средств только для ПТК одной системы АСУ ТП АЭС, при отсутствии других реальных смежных ПТК, с которыми испытываемый ПТК должен обмениваться данными. Реальные ПТК всех систем, входящих в АСУ ТП АЭС, будут собраны в единый комплекс только на этапе пуско-наладочных работ на площадке энергоблока АЭС. В данной работе рассматривается задача подтверждения требований в части обмена данными между испытываемым ПТК и другими отсутствующими смежными ПТК на этапе заводских испытаний. Для решения этой задачи предлагается использовать цифровые двойники отсутствующих реальных смежных ПТК.

АСУ ТП АЭС включает систему верхнего уровня (СВУ) и системы нижнего уровня (СНУ). СВУ решает задачи интеграции АСУ ТП АЭС. В данной работе рассматриваются заводские испытания для АСУ ТП АЭС, которая включает ПО СВУ на основе программного продукта [3,9,10], разработанного в Институте проблем управления им. В.А.Трапезникова Российской академии наук. Далее будем называть этот программный продукт ПО СВУ.

Данная работа содержит краткое описание методов использования цифровых двойников на этапе заводских испытаний, применявшихся ранее для АСУ ТП энергоблоков АЭС «Бушер-1» (Иран), «Куданкулам-1,2» (Индия), введенных в эксплуатацию, а также применяемых в настоящее время для строящихся энергоблоков «Куданкулам-3,4».

1. Структура обмена данными в АСУ ТП АЭС

Рассмотрим структуру обмена данными между ПТК СВУ и ПТК СНУ в АСУ ТП АЭС СВБУ на примере строящихся энергоблоков АЭС «Куданкулам-3,4» (Индия). ПО СВУ обменивается данными с использованием программно-технических средств шлюзов со следующими ПТК СНУ АСУ ТП АЭС [11]:

- системой контроля и управления (СКУ) реакторным отделением (РО) на базе «Типовых программно-технических средств» (ТПТС) разработки Всероссийского научно-исследовательского института автоматики им. Н.Л.Духова [12];
- СКУ турбинным отделением (ТО) на базе ТПТС;
- СКУ спецводоочистки (СВО) на базе ТПТС;
- СКУ системы вентиляции (СВ) и системы автоматической противопожарной защиты (САППЗ) на базе ТПТС;

- управляющей системой безопасности технологической (УСБТ) на базе «Комплекса программно-технических средств повышенной надежности» (КТПС-ПН) разработки Московского завода «Физприбор»;
- аппаратурой системы управления и защиты (АСУЗ) разработки Специализированного научно-исследовательского института приборостроения [13];
- комплексом электрооборудования системы управления и защиты (КЭ СУЗ) разработки Всероссийского научно-исследовательского института электромеханики;
- системой внутриреакторного контроля (СВРК) разработки Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»;
- системой комплексного диагностирования (СКД) разработки Научно-технического центра «Диапром»;
- системой технической диагностики главных циркуляционных насосных агрегатов (СТД ГЦНА) разработки Центрального конструкторского бюро машиностроения Кировского завода (Санкт-Петербург);
- автоматизированной системой радиационного контроля (АСРК) разработки Конструкторского бюро «Проминжиниринг»;
- системой контроля и управления электрической частью (СКУ ЭЧ) на базе контроллеров SICAM производства фирмы Siemens;
- системой ввода сигналов местных пунктов управления (СВС МПУ) разработки Научно-исследовательского института измерительных систем им. Ю.Е.Седакова (Нижний Новгород).

На рис.1 представлена структура обмена данными между ПТК СВУ и ПТК СНУ АСУ ТП АЭС.

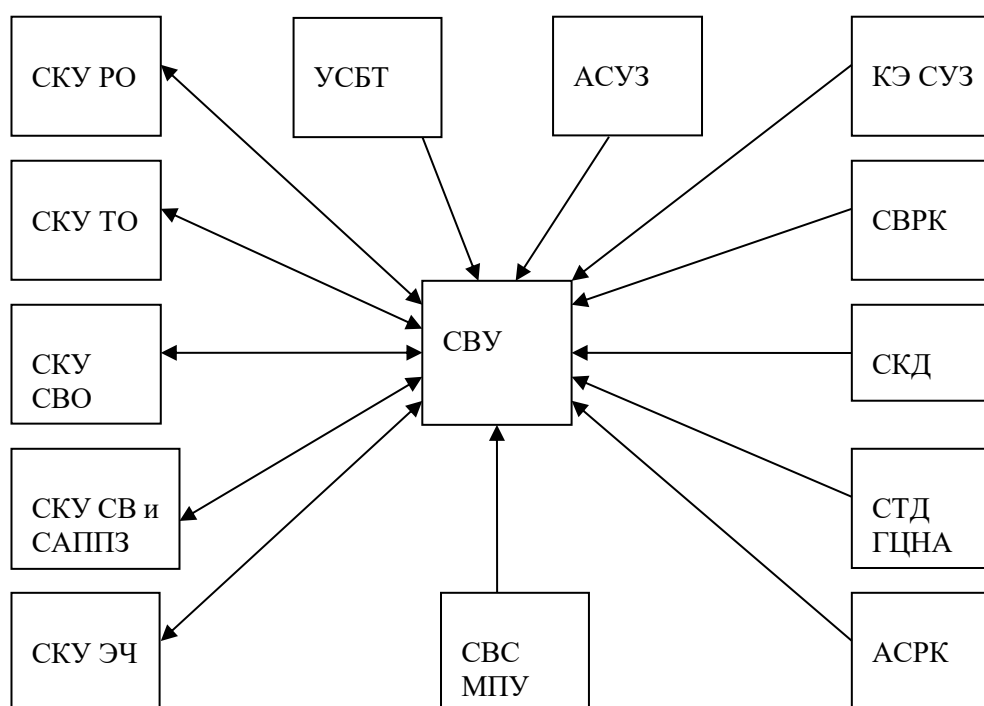


Рис. 1. Структура обмена данными между ПТК СВУ и ПТК СНУ АСУ ТП АЭС

Обмен данными между СВУ СНУ может выполняться в двух направлениях:

- ПО СВУ получает от ПО смежных ПТК СНУ входные данные, содержащие оперативную информацию о состоянии технологических процессов АЭС с целью предоставления этой информации операторам (специалистам, осуществляющим контроль и управление технологическими процессами АЭС), а также с целью архивирования этой информации;
- ПО СВУ передает в ПО смежных ПТК системы выходные данные, представляющие собой команды управления, введенные операторами (для управляющих ПТК); к числу управляющих относятся ПТК на базе ТПТС и СКУ ЭЧ.

ПО СВУ включает следующие функциональные подсистемы [9,10]:

- информационно-управляющую систему реакторного отделения (ИУРО);
- информационно-управляющую систему турбинного отделения (ИУТО);

- информационно-управляющую систему неоперативного контура управления (ИУН);
- информационную систему начальника смены (ИНС) энергоблока;
- систему администрирования технических и программных средств (АТПС) АСУ ТП;
- систему регистрации важных параметров эксплуатации (СРВПЭ) – «черный ящик».

На рис.2 представлена схема обмена данными между ПО N приборных стоек ПТК одной из СЧУ и ПО СВУ.

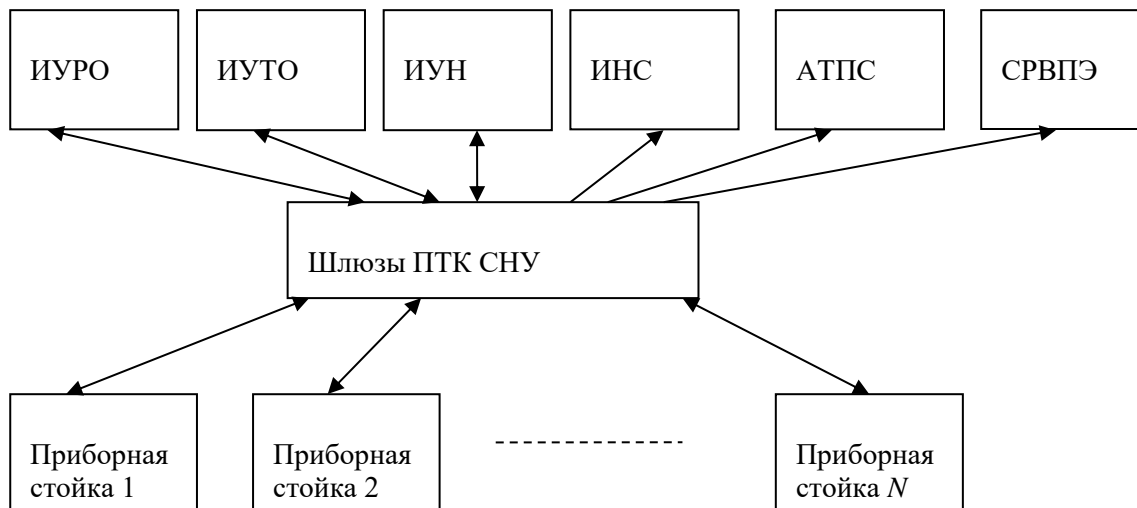


Рис. 2. Схема обмена данными между ПО СВУ и ПО одной из СЧУ

Некоторые СЧУ получают данные от других смежных СЧУ с использованием локальной вычислительной сети (ЛВС) СВУ через шлюзы этих СЧУ. На рис.3 представлена схема обмена данными на примере системы комплексного диагностирования (СКД), которая получает данные от СКУ РО, СКУ ТО, УСБТ, АСУЗ, СВРК, АСРК и передает данные в СВУ.

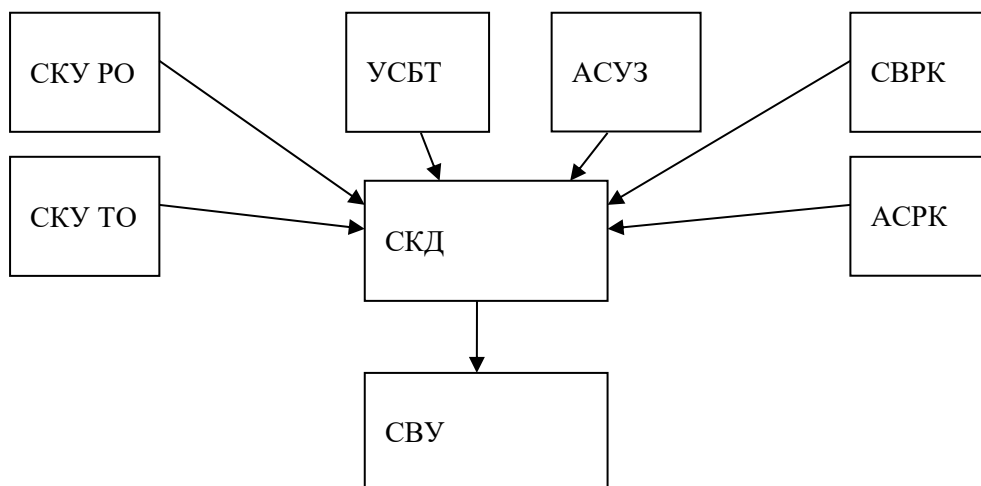


Рис. 3. Схема обмена данными для СКД

2. Цифровые двойники для заводских испытаний системы верхнего уровня АСУ ТП АЭС

Для заводских испытаний ПТК СВУ, реально установленного на площадке завода-изготовителя (Научно-исследовательского института измерительных систем им. Ю.Е.Седакова, Нижний Новгород), отсутствующие ПТК СЧУ заменяются моделирующим комплексом, который состоит из программно-технических средств имитаторов шлюзов (ИШ) всех ПТК СЧУ, подключенных к ЛВС СВУ.

На рис.4 представлена схема обмена данными для заводских испытаний ПТК СВУ.

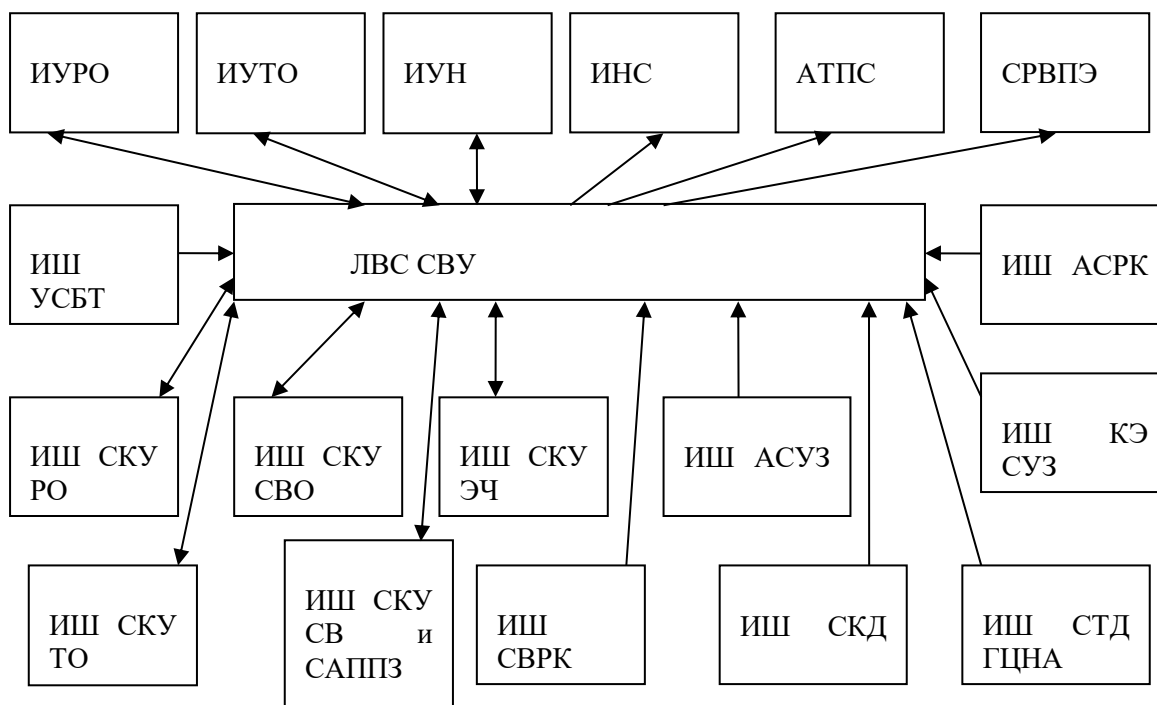


Рис. 4. Схема обмена данными для заводских испытаний ПТК СВУ

ПО ИШ (цифровых двойников ПО реальных шлюзов), используемых для заводских испытаний ПТК СВУ, должно соответствовать следующим требованиям:

- все сетевые IP-адреса и сетевые имена в ЛВС СВУ для всех ИШ совпадают с адресами и именами реальных шлюзов ПТК СЧУ;
- все входные и выходные сигналы (элементы данных) [11] для всех ИШ включены в базу данных ПТК СВУ;
- ПО ИШ позволяют имитировать передачу в ПТК СВУ как отдельных входных сигналов, так и наборов сигналов, создавая потоки входных сигналов различной интенсивности;
- ПО ИШ позволяют имитировать выполнение команд управления (выходных сигналов), поступающих из ПТК СВУ (для управляющих ПТК СЧУ);
- ПО ИШ для различных шлюзов СЧУ позволяют группировать ИШ по техническим средствам (системным блокам) моделирующего комплекса: установить на одном системном блоке технических средств ПО ИШ для нескольких шлюзов СЧУ.

3. Цифровые двойники для заводских испытаний систем нижнего уровня АСУ ТП АЭС

Для заводских испытаний ПТК СЧУ, реально установленного на площадке завода-изготовителя, отсутствующие ПТК СВУ и ПТК других смежных СЧУ, от которых испытываемый ПТК СЧУ должен получать данные, заменяются моделирующим комплексом.

На рис.5 представлена схема обмена данными для заводских испытаний ПТК СЧУ.

ПО моделирующего комплекса, используемого для заводских испытаний ПТК СЧУ и состоящего из цифровых двойников реальных подсистем СВУ и шлюзов других СЧУ, включает:

- имитатор функциональных технологических подсистем СВУ: ИУРО, ИУТО, ИУН, ИНС с объединенной базой данных, включающей сигналы всех этих подсистем;
- имитатор подсистемы СВУ АТПС для администрирования АСУ ТП;
- имитатор подсистемы СВУ СРВПЭ для «черного ящика»;
- имитаторы шлюзов других смежных СЧУ, от которых испытываемый ПТК СЧУ должен получать данные через ЛВС СВУ.

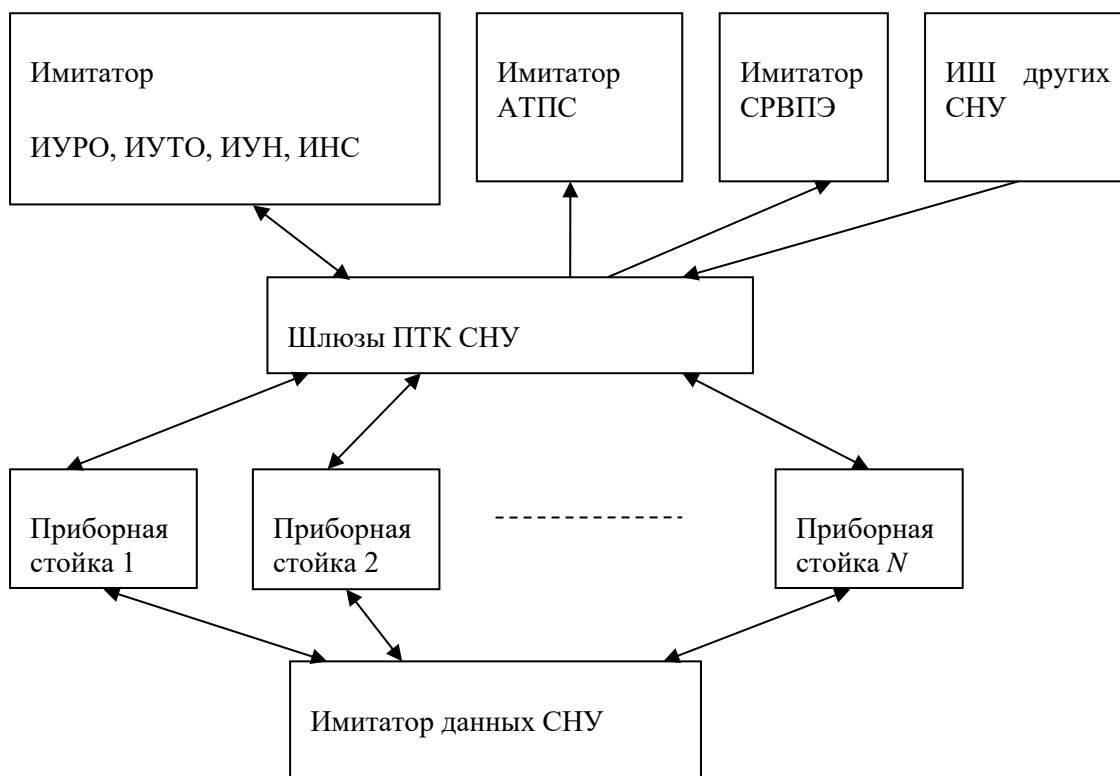


Рис. 5. Схема обмена данными для заводских испытаний ПТК СЧУ

Дополнительно, завод-изготовитель ПТК СЧУ предоставляет на испытания имитатор данных для технологических процессов, контролируемых ПТК СЧУ.

ПО моделирующего комплекса, используемого для заводских испытаний ПТК СЧУ, должно соответствовать следующим требованиям:

- все сетевые IP-адреса и сетевые имена в ЛВС СБУ для всех серверов подсистем СБУ и всех шлюзов других СЧУ совпадают с адресами и именами реальных серверов СБУ и шлюзов СЧУ;
- все входные и выходные сигналы ПО шлюзов ПТК СЧУ включены в базу данных имитаторов подсистем СБУ;
- все сигналы, поступающие в ПТК СЧУ от шлюзов других СЧУ, включены в базы данных соответствующих ИШ;
- ПО имитаторов подсистем СБУ позволяет оперативно отображать и архивировать все входные сигналы, поступающие от ПО шлюзов ПТК СЧУ;
- ПО имитаторов подсистем СБУ позволяет посылать команды управления (выходные сигналы) в шлюз ПТК СЧУ (для управляющих ПТК);
- ПО ИШ других СЧУ позволяет передавать в шлюзы ПТК СЧУ все сигналы, которые должны поступать от этих других СЧУ;
- ПО имитаторов подсистем СБУ и ПО ИШ других СЧУ позволяют установить ПО всех этих имитаторов на одном техническом средстве (системном блоке) моделирующего комплекса, или распределить ПО имитатора по нескольким системным блокам технических средств.

4. Контроль результатов заводских испытаний

Рассмотрим методы контроля результатов заводских испытаний в терминах теории множеств, элементами которых являются проектные индексы технологического оборудования АЭС. Эти проектные индексы однозначно идентифицируют принадлежность сигналов к элементам технологического оборудования в пределах энергоблока АЭС.

Введем обозначения для множеств, описывающих результаты заводских испытаний с использованием цифровых двойников:

L_i - множество проектных индексов сигналов, включенных в имитируемый обмен данными со стороны ПО реальных шлюзов (или ИШ) для i -го ПТК СЧУ ($i = 1, 2 \dots N$);

U_j - множество проектных индексов сигналов, прием которых в реальном ПТК СВУ (или в имитаторах подсистем СВУ) был подтвержден при испытаниях для j -ой функциональной подсистемы СВУ ($j = 1, 2 \dots M$).

Пересечение $L_i \cap U_j$ представляет собой множество проектных индексов сигналов, которые имитировались для шлюзов i -го ПТК СНУ и прием которых был подтвержден для j -ой функциональной подсистемы СВУ.

Условие успешности заводских испытаний i -го ПТК СНУ в части полноты передачи сигналов в ПО СВУ можно записать в виде:

$$L_i = \bigcup_{j=1}^M (L_i \cap U_j) \quad (1)$$

Условие успешности заводских испытаний ПТК СВУ в части полноты приема сигналов от всех ИШ для j -ой функциональной подсистемы СВУ можно записать в виде:

$$U_j = \bigcup_{i=1}^N (L_i \cap U_j) \quad (2)$$

Множество L проектных индексов сигналов, имитируемых ПО всех ИШ при заводских испытаниях ПТК СВУ:

$$L = \bigcup_{i=1}^N L_i \quad (3)$$

Множество U проектных индексов сигналов, прием которых был подтвержден хотя бы для одной функциональной подсистемы СВУ:

$$U = \bigcup_{j=1}^M U_j \quad (4)$$

Условие успешности заводских испытаний ПТК СВУ в части полноты приема сигналов от всех ИШ для всех функциональных подсистем СВУ можно записать в виде:

$$L = U \quad (5)$$

5. Заключение

В данной работе применительно к заводским испытаниям систем верхнего и нижнего уровней, входящих в АСУ ТП АЭС, предложены методы использования цифровых двойников, заменяющих реальные отсутствующие системы АСУ ТП. Рассмотрены схемы обмена данными при проведении заводских испытаний программно-технических комплексов.

Рассмотренные методы и схемы обмена данными можно рекомендовать для использования не только в АСУ ТП АЭС, но также в автоматизированных системах контроля и управления другими сложными техническими объектами.

Литература

1. Wu J., Yang Y., Cheng X., Zuo H., Cheng Z. The development of digital twin technology review // Proceedings of the 2020 Chinese Automation Congress (CAC). – 2020. – P.4901-4906.
2. Leng J., Wang D., Shen W., Li X., Liu Q., Chen X. Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review // Journal of Manufacturing Systems. – 2021. – Vol. 60. – P.119–137.
3. Полетыкин А.Г., Жарко Е.Ф., Менгазетдинов Н.Э., Промыслов В.Г. Новое поколение систем верхнего уровня и концепция Industry 4.0 // Материалы Десятой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» MLSД 2017. – М.: ИПУ РАН, 2017. – Т.1. – С. 101-107.
4. Промыслов В.Г., Полетыкин А.Г., Семенов К.В., Менгазетдинов Н.Э., Бывайков М.Е., Степанов В.Н. Технология распределенной разработки ПО для АСУ ТП АЭС с использованием виртуализации и цифровых

- двойников // Труды 14-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD-2021). – М.: ИПУ РАН, 2021. – С. 98-102.
5. *Полетыкин А.Г., Промыслов В.Г., Семенов К.В., Менгазетдинов Н.Э., Жарко Е.Ф.* Применение цифрового двойника в жизненном цикле АСУ ТП АЭС // Материалы 2-й Международной научно-технической конференции «Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС» (Минск, 2021). – Минск: БГУИР, 2021. – С. 193-197.
 6. *Полетыкин А.Г.* Виртуальная суперкомпьютерная модель для сопровождения и модернизации сложных систем управления в атомной энергетике // Труды 11-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018, Москва). – М.: ИПУ РАН, 2018. – Т. 2. – С. 465-470.
 7. *Жарко Е.Ф.* Цифровой двойник технологического процесса энергоблока АЭС./ Труды 15-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD-2022). – М.: ИПУ РАН, 2022. – С. 1053-1059.
 8. *Затуливетер Ю.С., Фищенко Е.А.* Развитие импортонезависимой элементной базы для поддержки технологий «цифровых двойников» (на примере задач АСУ ТП АЭС) // Труды 15-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD-2022). – М.: ИПУ РАН, 2022. – С. 1060-1067.
 9. *Бывайков М.Е., Жарко Е.Ф., Менгазетдинов Н.Э., Полетыкин А.Г., Прангишвили И.В., Промыслов В.Г.* Опыт проектирования и внедрения системы верхнего блочного уровня АСУ ТП АЭС // Автоматика и Телемеханика, 2006, N 5. – С. 65-79.
 10. *Менгазетдинов Н.Э., Бывайков М.Е., Зуенков М.А., Промыслов В.Г., Полетыкин А.Г. и др.* Комплекс работ по созданию первой управляющей системы верхнего блочного уровня АСУ ТП для АЭС "Бушер" на основе отечественных информационных технологий [Электронный ресурс]: монография. – М.: ИПУ РАН, 2013. – ISBN 978-5-91450-130-0.
 11. *Бывайков М. Е., Полетыкин А. Г., Степанов В. Н., Сахабетдинов И. У.* Программный интерфейс между верхним и нижним уровнями автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) атомной электростанции (АЭС) [Электронный ресурс]: монография. – М.: ИПУ РАН, 2021. – ISBN 978-5-91450-254-3.
 12. *Бармаков Ю.Н.* Средства автоматизации, разрабатываемые ВНИИА в рамках программы развития атомной энергетики России // Автоматизация в промышленности, 2006, N 8. – С. 49-51.
 13. *Мирошник Ю.М., Овчинников В.Н., Пелеганчук Ю.И., Пронякин А.В., Семичастнов В.О., Фельдман М.Е., Шермаков В.Е.* Управляющая система безопасности АЭС // Ядерные измерительно-информационные технологии, 2004, N 1. – С. 17-29.