

DOI:
**ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ОПЕРАТОРА АЭС:
ГИБКИЙ МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС И ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ**

Жарко Е.Ф.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Россия, г. Москва
ул. Профсоюзная д.65
zharko@ipu.ru*

Аннотация: Рассматривается подход, согласно которому ядром системы информационной поддержки оператора является гибкий программный пакет для моделирования, который в зависимости от решаемых задач может использоваться как цифровая тень или цифровой двойник. Подход применим к широкому кругу задач систем верхнего уровня АСУТП АЭС.

Ключевые слова: атомная электростанция, интеллектуализированная система информационной поддержки оператора, гибкий моделирующий комплекс, цифровой двойник.

Введение

Объекты с повышенным риском эксплуатации, к которым относятся и атомные электростанции, являются объектами с высокой степенью автоматизации, но, тем не менее, роль человека-оператора остается немаловажной, так как его ошибочные действия могут привести к негативным последствиям. Наиболее часто ошибки человека-оператора возникают в случаях достижения потоком информации уровня, значительно превышающего возможности восприятия и реакции оператора. Важной задачей является предоставление оператору полной, интегрированной достоверной информации о состоянии объекта для диагностирования аномальных ситуаций и выдачи рекомендаций по ведению технологического процесса в конкретных условиях. Для решения такой задачи предназначена система поддержки оператора.

Интерес к системам информационной поддержки операторов АЭС проявился в начале 1980-х годов. Потребность в таких системах, помогающих операторам правильно не только оценить текущую ситуацию, но и принять правильное решение, возникла на фоне интереса к технологиям искусственного интеллекта, особенно к экспертным системам. В рамках развития цифровой экономики активно развивается направление цифровизации больших промышленных комплексов, в том числе и атомных электростанций, с использованием передовых технологий: интернета вещей (IoT) [1, 2], больших данных (Big Data) [3, 4], искусственного интеллекта [5, 6], виртуальной и дополненной реальности [7]. Цифровизация производственных процессов традиционно проводится под лозунгом Четвертой промышленной революции – Индустрии 4.0. Реализация концепции Индустрия 4.0 подразумевает широкое использование методов математического моделирования и предиктивной аналитики.

Логическим продолжением развития «цифрового производства» и промышленного интернета вещей является объединение информационных технологий с процессами эксплуатации для создания «цифровых двойников» [8, 9] промышленного оборудования и установок (насосов, турбин, электрических установок и т.д.). Сама концепция существует более 30 лет и активно применялась при создании тренажеров (как полномасштабных, так и функционально-аналитических), но инновационные технологии придали ей новый импульс. «Цифровой двойник» – это аналитическая компьютерная модель конкретного физического объекта, использование которой позволяет осуществлять автоматизированную обработку информации, поступающей в режиме реального времени с датчиков, установленных на этом оборудовании.

Применение в «цифровых двойниках» современных аналитических моделей на основе искусственного интеллекта позволяет, к примеру, предсказывать аварийные и нештатные ситуации, а также увеличивать срок межремонтной эксплуатации [10]. Это возможно благодаря оптимизации работы оборудования, подстраивающейся под специфику внешней среды.

Используя методы интеллектуального анализа данных [11, 12], можно построить неочевидные зависимости и закономерности между параметрами оборудования, обоснованные прогнозы по срокам проведения необходимого регламентного обслуживания. Таким образом, «цифровые двойники» предоставляют огромные возможности: они включают в себя эффективное расследование отказов оборудования, выявление распространенных дефектов, упреждающую аналитику отказов и прогностическое техобслуживание.

Благодаря внедрению «цифровых двойников» можно с 95%-й точностью можно прогнозировать реакцию оборудования на эксплуатационные нагрузки, на 5–10% снизить эксплуатационные расходы промышленных предприятий. При этом применение технологий искусственного интеллекта в таких моделях позволяет им постоянно совершенствоваться, увеличивая точность и качество прогнозирования.

Создание системы «цифровых двойников» энергогенерирующих установок позволит реализовать проактивное «умное» управление их эксплуатацией. Если сейчас обслуживание проводится по регламентам, то внедрение «цифровых двойников» позволит перейти к прогностике и управлению исправным состоянием и следовательно будет минимизирован побочный ущерб, связанный с отказами оборудования: дрейфы параметров, характеризующих исправность оборудования, можно зафиксировать на начальном этапе, задолго до «критической точки».

«Цифровые двойники» – это фактически объединение современных технологий в рамках одного продукта. Применение «цифровых двойников» в системах поддержки операторов АЭС, тренажерах для персонала АЭС, как полномасштабных, так и информационно-аналитических позволяет упростить техническую поддержку системы управления, минимизируя риски ошибок и сбоев.

1 СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ И ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Система верхнего блочного уровня [13, 14] разработана для управления энергоблоками АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000, упрощенная схема которых приведена на рис. 1.

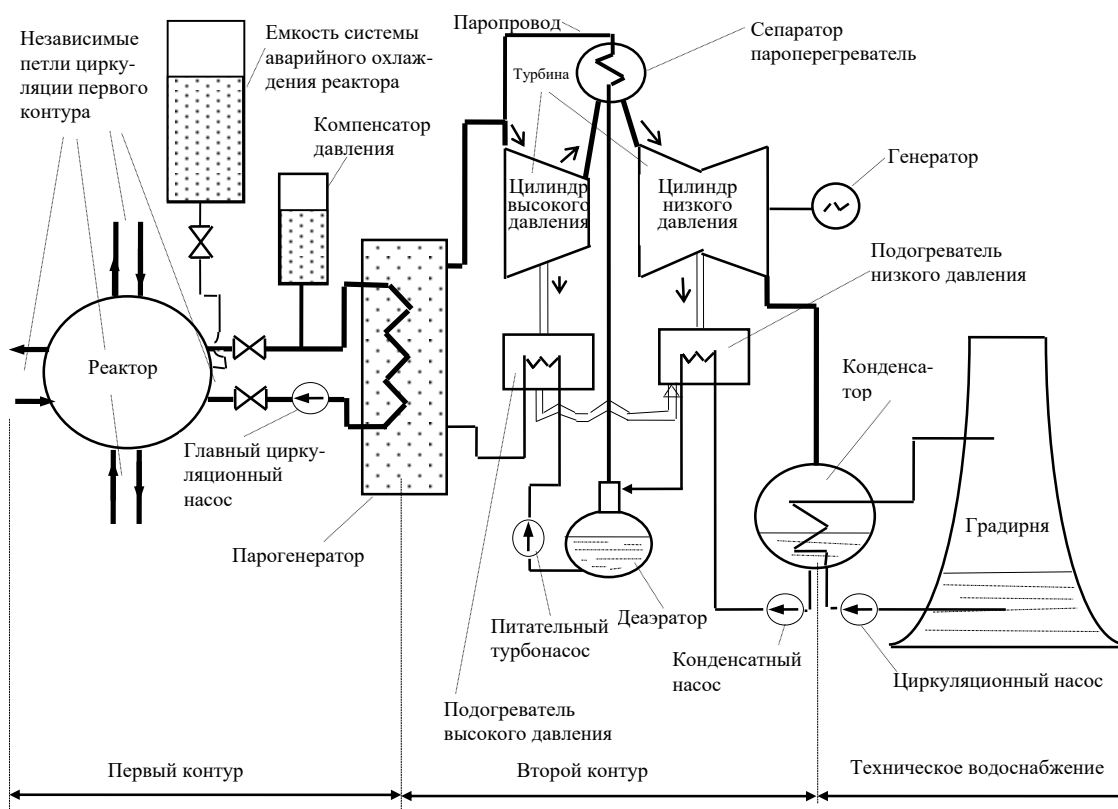


Рис. 1. Упрощенная схема энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000.

Технологические процессы на АЭС с ВВЭР-1000 и само оборудование энергоблока являются сложными, энергонапряженными и обладающими рядом особенностей, связанных с условиями эксплуатации, таких как, например, недоступность во время работы на мощности и после останова значительной части оборудования, работающего в условиях повышенной радиации, высоких давлений и температур. Особенности конструкции и сложность технологии даже при работе в базовом режиме нагрузки требует высокой степени автоматизации процесса управления на основе применения современных методов и средств. Однако, достигнутый на сегодня уровень автоматизации оказывается недостаточным для обеспечения эффективности работы АЭС с ВВЭР-1000 в маневренном режиме. При использовании АЭС с ВВЭР-1000 в маневренном режиме для улучшения технико-экономических показателей необходимо существенное расширение состава решаемых АСУ ТП функциональных

задач: оптимизационных, диагностики состояния оборудования и технологических процессов, информационной поддержки оператора.

Одним из аспектов повышенных требований к надежной и безопасной эксплуатации энергоблоков АЭС [13-18] является требование создания систем информационной поддержки операторов АЭС (СИПО АЭС), которые должны представлять персоналу блочного пункта управления (БПУ) обобщенную информацию о параметрах энергоблока АЭС.

Потребность в СИПО АЭС, позволяющих операторам правильно оценивать ситуации, возникла на фоне интереса к технологии искусственного интеллекта, особенно к экспертным системам [19-22]. Разработка специализированных СИПО АЭС считается одним из важнейших направлений решения задачи качественного улучшения безопасности и эффективности эксплуатации энергоблоков АЭС.

Основной целью СИПО АЭС, заключающаяся в предотвращении ошибок операторов, достигается за счет следующих функций:

- обеспечение информацией о состоянии технологического процесса, оборудования и возможных рисках;
- помощь в адекватной оценке ситуации;
- помощь в планировании действий и расстановке приоритетов;
- предотвращение ошибок оператора.

Основные принципы разработки современных СИПО АЭС [23] состоят в следующем:

- дополнение, а не замена штатных средств блочного пункта управления (БПУ), которое предоставляет операторам ряд новых функций, а также интегрированную информацию, основанную на анализе и прогнозировании хода технологического процесса;
- минимального вмешательства в свою работу операторов смены;
- СИПО АЭС по входу связана с постоянно обновляемой базой данных объекта;
- способность предоставлять операторам гарантированный временной резерв для принятия решений.

Системы поддержки АЭС можно разделять:

- по способу реализации (независимые, встроенные);
- по технологическому уровню;
- по виду поддержки (интеллектуальная, информационная);
- по типу задач оператора (контроль, регулирование, переключения, поиск неисправности, ремонт и т.д.);
- по поддерживаемой фазе выполнения задачи;
- по поддерживаемому эксплуатационному режиму.

СИПО включает в себя:

- модуль интеллектуальной поддержки (системы представления параметров безопасности; системы обработки и представления сигнализации; системы оценки риска; системы диагностики и т.д.);
- модуль информационной поддержки (экран коллективного пользования; обобщенное представление информации; проблемно-ориентированный интерфейс).

СИПО АЭС представляет собой интеллектуализированную систему, ядром которой являются блоки динамического моделирования и анализа прогнозной и текущей информации о состоянии энергоблока. Информация о текущем и прогнозируемом состоянии системы доводится до персонала в максимально удобной для восприятия форме на специализированных экранных форматах.

2 ГИБКИЙ МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС

Одним из важнейших свойств гибко моделирующего комплекса (ГМК) [24] является его гибкость, позволяющая на основе диалоговой системы выбрать конкретные модули из библиотеки модулей для настройки на уже существующий, модернизируемый или проектируемый энергоблок АЭС. Результатом работы такой системы будет машинная программа реализующая заданный объект. В состав ГМК входят модели различной степени сложности и детальности, что позволяет проводить прогнозные расчеты прохождения технологического процесса на энергоблоке без существенной потери точности.

ГМК включает средства проектирования и реализации алгоритмов верхнего уровня АСУ ТП, а также средства моделирования технологических процессов энергоблока.

Средства проектирования представляют универсальную платформу для разработки программного обеспечения для различных целей, таких как разработка систем диагностики, операторского интерфейса, создания систем поддержки оператора и т.д.

Средства моделирования технологических процессов обеспечивают создание, модификацию и сопровождение нейтронно-физических и теплогидравлических моделей различного назначения.

Средства проектирования и моделирования, объединяемые в составе ГМК, имеют структуру, схема которой приводится на рис. 2. Синтез моделей обработки информации в СИПО определяет методы исследования динамики.

На рис. 3 представлена структура гибкого моделирующего комплекса в части моделирования параметров энергоблока. Разработанный подход к созданию ГМК позволяет включать в состав системы информационной поддержки оператора модули диагностики компонент энергоблока (рис. 4).

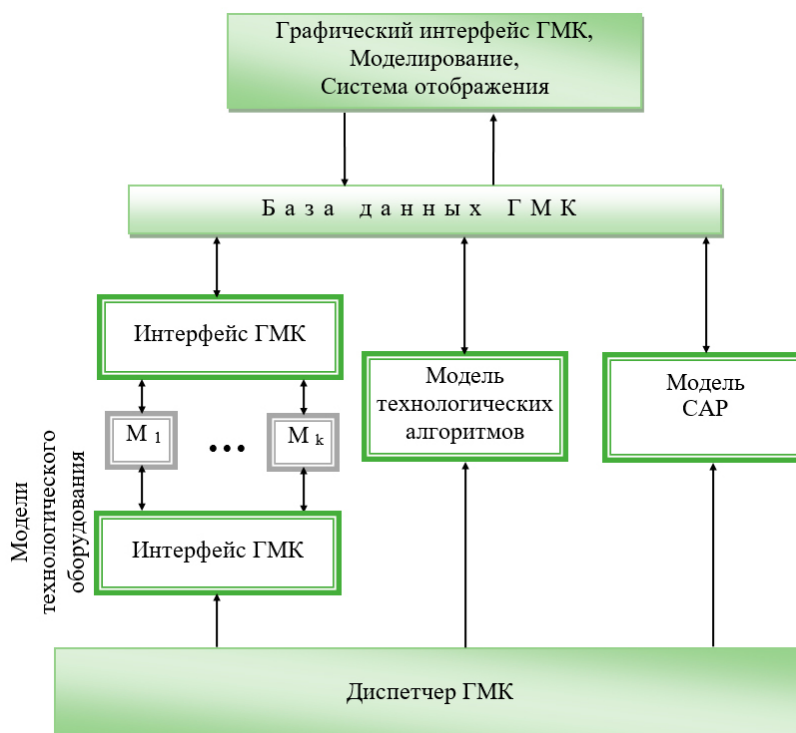


Рис. 2. Обобщенная схема гибкого моделирующего комплекса.

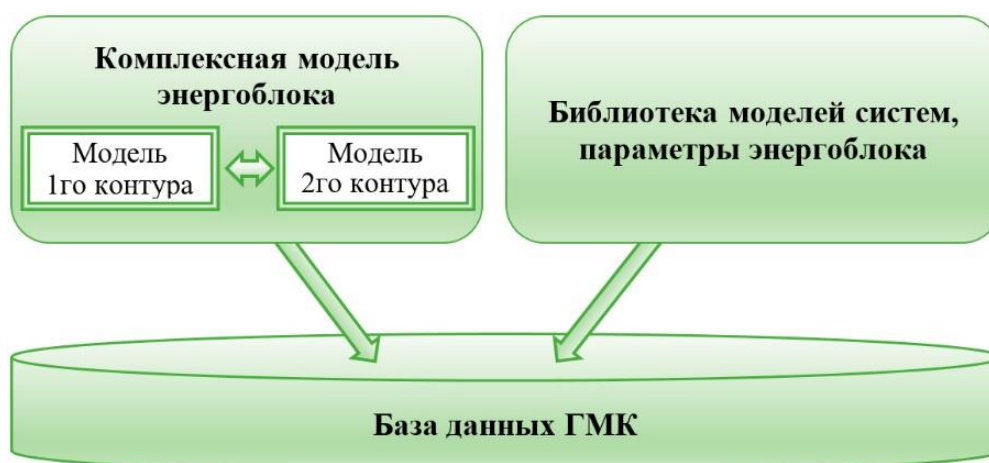


Рис. 3. Структура гибкого моделирующего комплекса.

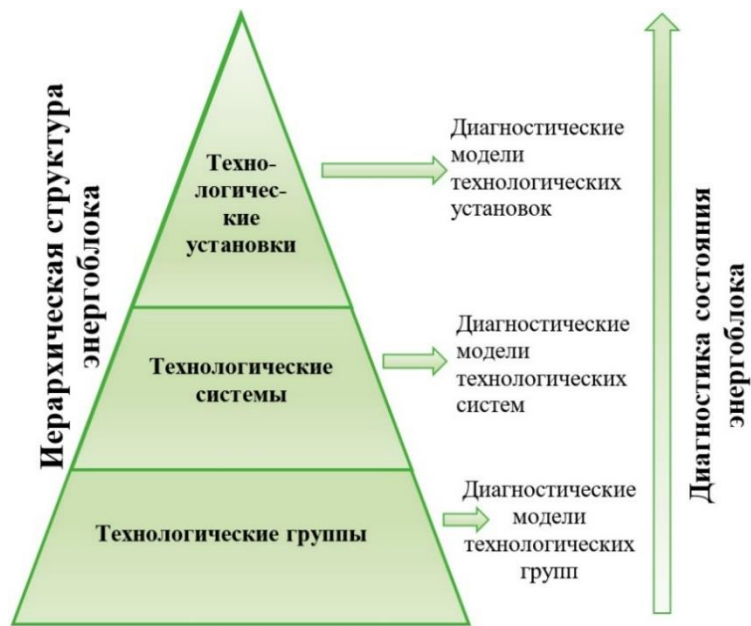


Рис. 4. Иерархия диагностируемых компонент энергоблока.



Рис. 5. Структурная схема экспертной системы для СИПО АЭС

3 ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Диагностические методы в реальном масштабе времени можно условно разделить на алгоритмические и основанные на знаниях. В основе алгоритмических диагностических методов для поиска нарушений в системе лежат теории оценивания, фильтрации, параметрической и структурной идентификации. В противоположность им, диагностика в системах, основанных на знаниях, напоминает стиль решения задачи оператором.

Структурная схема экспертной системы для системы информационной поддержки оператора энергоблока АЭС приведена на рис. 5. Эта экспертная система является одной из основных частей системы информационной поддержки оператора АЭС.

Иерархическая структура в процессах диагностики и прогнозирования представляет собой результат декомпозиции технологического процесса на определенные осмысленные уровни (например, в соответствии с рис. 4). Диагностика процессов начинается с самого верхнего уровня (уровня системы, например: энергоблок АЭС), далее - уровень технологической системы, и так до нижнего уровня функций - до уровня технологической группы или элементарного оборудования.

В сложной технологической системе возмущения, возникающие в результате нарушения работы элементарных единиц оборудования, дальше распространяются на другие подсистемы объекта, что приводит к аварийному останову всей системы, если оператор не примет меры по компенсации возмущения и устранению нарушения. Определение первопричины нарушения состоит из нескольких этапов:

- обнаружение отклонений от нормального протекания хода технологического процесса;
- локализация источника нарушения до уровня элемента объекта управления;
- обнаружение противоречий с измеряемыми и вычисляемыми сигналами;
- выявление возможных нарушений.

Наличие информации о параметрах, важных для безопасности АЭС, позволяет быстро оценить ситуацию, прогнозировать развитие технологического процесса и оперативно реагировать на различные нестандартные ситуации при эксплуатации. Эту задачу можно решить путем введения в состав отображающейся информации в рамках СИПО АЭС критических функций и параметров безопасности и генерацией симптомно-ориентированных инструкций.

Способность оператора решать задачи управления в переходных режимах зависит не только от его квалификации, но и от информационной нагрузки в процессе управления. Нередки ситуации с возникновением режимов с наложением сопутствующих отказов оборудования, регуляторов или с ложным срабатыванием защит и блокировок, когда оператор для выработки решения обязан держать в поле зрения изменения значительного числа основных технологических параметров.

В реальной аварийной ситуации активизируется большое число сигналов, указывающих на отклонение от нормальных значений переменных, что делает затруднительным установить однозначную связь между некорректно функционирующими компонентами системы и сигналами с измерительных систем. Поэтому, необходимо комплексно представить параметры, важные для безопасности энергоблока, таким образом, чтобы по полученному представлению можно было бы однозначно судить как о состоянии отдельных подсистем, так и всего энергоблока в целом.

4 ОТ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ К ЦИФРОВОМУ ДВОЙНИКУ

Одним из основных преимуществ гибкого моделирующего комплекса является возможность создавать, управлять и обмениваться информацией на протяжении всей жизни объекта. С этой целью использование цифрового двойника является преимуществом. Этот цифровой двойник будет развиваться со временем. Понятия численной модели, числовой тени и числового двойника были введены Вернером [25] на основе потоков обмена данными в зависимости от степени интеграции данных (рис. 6).

Цифровая модель: цифровая модель, не использующая какой-либо формы автоматического обмена данными между физическими и цифровыми объектами.

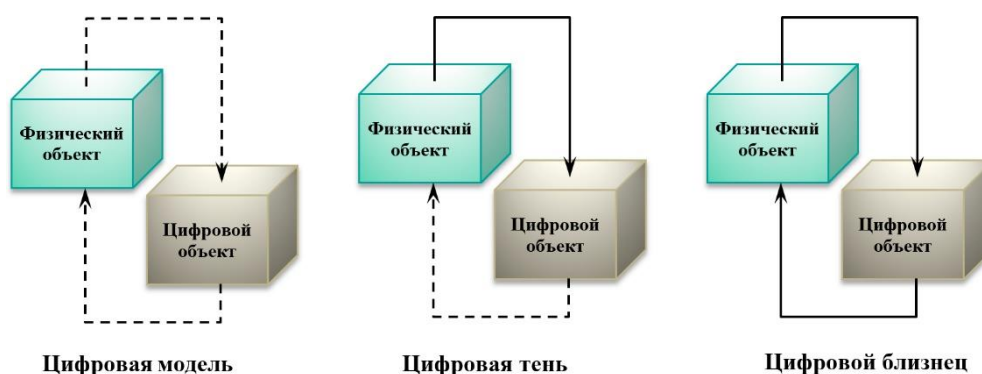


Рис. 6. Иерархия диагностируемых компонент энергоблока.

Цифровая тень: строится на основе определения цифровой модели, если существует автоматический однонаправленный поток данных между состоянием существующего физического объекта и цифрового объекта. Возможно применение на этапе проектирования.

Цифровой двойник: случай, когда потоки данных между существующим физическим объектом и цифровым объектом полностью интегрированы в обоих направлениях, его можно назвать цифровой двойник. В такой комбинации цифровой объект также может действовать как управляющий орган для физического объекта. Также могут быть другие объекты, физические или цифровые, которые вызывают изменения состояния в цифровом объекте. Изменение состояния физического объекта ведет непосредственно к изменению состояния цифрового объекта и наоборот.

Учитывая существование модели, определение цифрового двойника может быть сделано двумя способами: либо путем сохранения единой цифровой модели, либо путем определения единого цифрового двойника. Важными преимуществами цифрового двойника, основанного на математической модели протекания технологических процессов, являются:

- возможность количественного определения отклонения параметров оборудования от эталонного состояния на местах, где физические датчики отсутствуют и/или их нельзя установить;
- возможность количественной оценки влияния состояния отдельных единиц оборудования на производительность и эффективность;
- Обоснованное планирование производительности технологических установок на основе обеспечения оптимальных режимов работы всего оборудования, входящего в их состав;
- Определение достаточности объема и качества проведенных работ по техническому обслуживанию оборудования;
- Уменьшение влияния человеческого фактора.

Цифровой двойник, основанный на математических моделях физических процессов, имеет существенное преимущество по сравнению с цифровыми двойниками, основанными исключительно на технологиях машинного обучения и применяемыми для прогнозирования протекания технологических процессов. Системы управления в результате работы оборудования АЭС, как и любых других киберсистем, получает достоверную, базирующуюся на физических законах информацию о текущем состоянии и прогнозируемом ресурсе оборудования в условиях ограниченного количества физических датчиков, неполной статистики по предыдущим условиям работы, режимам работы и отказам. Другое важное преимущество – быстрая и малозатратная настройка цифрового двойника, в случае применения ГМК, после модификации, замены или ремонта оборудования. Применение ГМК открывает для цифрового двойника дополнительные возможности в отношении использования прогнозной аналитики за счет:

- вычисления параметров оборудования, недоступных для физического измерения, и количественного определения их влияния на эффективность работы АЭС;
- возможности расчета ретроспективных данных для восполнения пробелов в информации о работе оборудования до того, как оно было оснащено системами сбора и хранения данных;
- возможности количественного учета влияния на общую производительность системы отдельных параметров, описывающих как текущее состояние оборудования, так и внешние факторы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В системах информационной поддержки оператора АЭС основная цель использования цифрового двойника, полученного на основе гибкого модельного комплекса, заключается в способности определять, моделировать, прогнозировать, оптимизировать и проверять систему в течение всего ее жизненного цикла, от этапа разработки концепции до этапа эксплуатации. Цифровой двойник поддерживает дополнительные интеллектуальные элементы, такие как обслуживание, мониторинг, обновления, прогнозы использования и т.д. Цифровой двойник представляет прошлое состояние продукта, текущее состояние и возможные будущие состояния, что особенно важно для его использования:

- в системе информационной поддержки системы оператора АЭС;
- в диагностических системах;
- при выявлении критических областей информационной инфраструктуры АЭС с целью оперативного принятия мер по их защите [25],

- при построении гибридной модели кибербезопасности [26, 27] в которой ключевым элементом является интерфейс обмена данными между информационной и физической моделью.

Литература

1. *Manavalan E., Jayakrishna K.* A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements // *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 127. 2019. – P.925-953.
2. *Steinmetz C., Rettberg, A. Ribeiro F.G.C., Schroeder G., Soares M.S., Pereira C.E.* Using Ontology and Standard Middleware for integrating IoT based in the Industry 4.0 // *IFAC-PapersOnLine*. Vol. 31. 2018, issue 10. – P169-174.
3. *Cui Y., Kara S., Chan K.C.* Manufacturing big data ecosystem: A systematic literature review // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol. 62. 2020, Article 101861.
4. *Bagozi A., Bianchini D., De Antonellis V., Garda M., Marini A.* A Relevance-based approach for Big Data Exploration // *Future Generation Computer Systems*. Vol. 101. 2019. – P.51-69,
5. *Hagemann S., Sünnetcioglu A., Stark R.* Hybrid Artificial Intelligence System for the Design of Highly-Automated Production Systems // *Procedia Manufacturing*. Vol. 28. 2019. – P.160-166,
6. *Lee J., Davari H., Singh J., Pandhare V.* Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems // *Manufacturing Letters*. Vol. 18. 2018. – P.20-23.
7. *Roldán J.J., Crespo E., Martín-Barrio A., Peña-Tapia E., Barrientos A.* A training system for Industry 4.0 operators in complex assemblies based on virtual reality and process mining // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol. 59. 2019. – P.305-316.
8. *Tao F., Qi Q., Wang L., Nee A.Y.C.* Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison / *Engineering*. Vol. 5. 2019, issue 4. – P.653-661.
9. *Stark R., Fresemann C., Lindow K.* Development and operation of Digital Twins for technical systems and services // *CIRP Annals*. Vol. 68. 2019, issue 1. – P.129-132.
10. *Жарко Е.Ф., Сакрутина Е.А.* Оценка технико-экономических показателей и обеспечение нормальной эксплуатации атомной электростанции // *Труды 11-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018, Москва)*. – М.: ИПУ РАН, 2018, Т. 2. – С.451-457.
11. *Nan J., Cheng L., Yi L.* A Similar Safety Systematics Model for Accident Cases Data Mining Support // *Procedia Computer Science*. Vol. 131. 2018. – P.929-936.
12. *Chen Y.-C., Chang Y.-T., Kan Y.-S., Chen R.S., Wu S.F.* Using data mining technique to improve billing system performance in semiconductor industry // *Proceedings of 2018 International Conference on Information and Computer Technologies (ICICT)*. 2018.
13. *Полетыкин А.Г., Жарко Е.Ф., Менгазетдинов Н.Э., Промыслов В.Г.* Новое поколение систем верхнего уровня и концепция Industry 4.0 // *Материалы 10-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2017, Москва)*. – М.: ИПУ РАН, 2017, Т. 1. – С.101-107.
14. *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. №. 5. – С.65-79.
15. *Akerlund O., Bieber P., Boede E., Bozzano M., Bretschneider M., Castel C., Cavallo A., et al.* ISAAC, a framework for integrated safety analysis of functional, geometrical and human aspects // *Proceedings of 3rd European, Congress on Embedded Real-Time Software. (ERTS'06)*, 2006.
16. *Chernyshov K.R.* Non-Parametric Procedures in Evaluation of Collective Professional Skills of a Human-Operators Shift // *IFAC-PapersOnLine*. Vol. 52. 2019, issue 13. – P.475-480.
17. *Chernyshov K.R., Zharko E.Ph.* Information Support and Skill Evaluation of Human-Operators // *IFAC-PapersOnLine*. Vol. 38. 2015, issue 3. – P.1345-1350.
18. *Maeran R., Mayaka J.K., Jung J.C.* Software verification process and methodology for the development of FPGA-based engineered safety features system // *Nuclear Engineering and Design*. Vol. 330. 2018. – P.325-331.
19. *Li P.-c., Zhang L., Dai L.-c., Li X.-f., Jiang Y.* A new organization-oriented technique of human error analysis in digital NPPs: Model and classification framework // *Annals of Nuclear Energy*. Vol. 120. 2018. – P.48-61.

20. *Jang I., Kim A.R., Jung W., Seong P.H.* An empirical study on the human error recovery failure probability when using soft controls in NPP advanced MCRs // *Annals of Nuclear Energy*. Vol. 73. 2014. – P.373-381.
21. *Kim A.R., Kim J.H., Jang I., Seong P.H.* A framework to estimate probability of diagnosis error in NPP advanced MCR // *Annals of Nuclear Energy*. Vol. 111. 2018. – P.31-40.
22. *Seong P.H., Kang H.G., Na M.G., Kim J.H., Heo G., Jung Y.* Advanced MMIS toward substantial reduction in human errors in NPPS // *Nuclear Engineering and Technology*. Vol. 45, 2013, issue 2. – P.125-140.
23. *Jharko E.* Towards the problem of creating information operator support systems for nuclear power plants // *Proceedings of the 2th IEEE International Conference on Control in Technical Systems (CTS)*. 2017. – P.356-359.
24. *Жарко Е.Ф.* Гибкий моделирующий комплекс для систем поддержки оператора АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 // *Автоматика и телемеханика*. 2006. №. 5. – С.80-92.
25. *Warner J.C., Geyer W.R., Lerczak J.A.* Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment // *Journal of geophysical research*. Vol. 110. 2005, C05001. – P.1-13.
26. *Jharko E., Promyslov V., Iskhakov A.* Extending Functionality of Early Fault Diagnostic System for Online Security Assessment of Nuclear Power Plant // *Proceedings 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2019. – P.1-6.
27. *Промыслов В.Г., Жарко Е.Ф., Семенов К.В.* Принципы интеграции информационной и физической моделей для обеспечения кибербезопасности атомной станции // *Материалы 12-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2019, Москва)*. –М.: ИПУ РАН, 2019. – С.858-861.