

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭНЕРГОБЛОКА АЭС

Жарко Е.Ф.

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

Аннотация: представлена гибкая моделирующая система (ГМС) энергоблока АЭС. Данная ГМС может рассматриваться как цифровой двойник энергоблока АЭС, позволяющий прогнозировать ход технологического процесса, имитировать действия оперативного персонала и отказы технологического оборудования. Описаны принципы построения ГМС на основе сборочного программирования, ее структура.

Ключевые слова: цифровой двойник, технологический процесс, гибкая моделирующая система, атомная электростанция.

Введение

В настоящее время в связи с переходом к цифровой экономике активно развивается научное направление, являющееся одним из главных трендов развития Industry 4.0 и относящееся к созданию цифровых двойников – цифровых копий реальных физических объектов, помогающих оптимизировать или выявить уязвимости ключевых процессов [1, 2]. Важнейшей характеристикой цифровых двойников является наличие некоторой виртуальной (компьютерной) модели и обеспечение ее поддержания в актуальном состоянии, главным образом, за счет механизма непрерывного обновления данных, используемых для оценки множественных характеристик исследуемого физического объекта. Цифровой двойник является сложным программным продуктом, создаваемым на основе самых разнообразных данных, математических моделей и с помощью многочисленных IoT-датчиков. Цифровая модель помогает менять параметры работы оборудования и вносить улучшения гораздо быстрее и безопаснее, чем при экспериментах на реальных объектах [3-5].

Основные положения концепции цифровых двойников были сформулированы в начале 2000 годов, но в то время технология не получила широкого распространения в силу своей сложности и высокой стоимости. Но начиная с 2010 годов ситуация изменилась из-за глобальной конкуренции на этап проектирования, стремительного развития технологий компьютерного и суперкомпьютерного инжиниринга, интернета вещей/промышленного интернета, машинного обучения, больших данных и облачных вычислений, искусственного интеллекта цифровые двойники стали претендовать на ключевую роль в Industry 4.0.

Цифровые двойники находят применение для различных объектов с повышенным риском эксплуатации. Одна из важнейших функций цифровых двойников заключается в совершенствовании технологических процессов. Используя, цифровые двойники можно создавать копии объектов, выявлять «узкие места» (в компонентах, системах, процессах и других активах), тестировать потенциальные решения, моделировать результаты взаимодействий между компонентами и прогнозировать ход технологического процесса при отработке режимов управления. Такой подход экономит время и, ресурсы разного вида, необходимые для тестирования решений на практике.

Наиболее эффективным применением цифровых двойников являются объекты, характеризующиеся следующими критериями:

- сопровождение и мониторинг объекта;
- длительный жизненный цикл;
- широкий диапазон и многообразие условий эксплуатации.

Под эти критерии попадают объекты разных отраслей промышленности, таких как энергетика (в том числе и атомная энергетика), транспортные системы, машиностроение и т.д.

Исследователи отмечают, что проектирование цифровых двойников должно быть основано, в первую очередь, на использовании методов имитационного моделирования, обеспечивающих максимально реалистичное представление физического объекта в виртуальном мире [6]. При этом компьютерная модель должна поддерживать возможности решения задач по оптимизации множественных характеристик моделируемого объекта с использованием данных, обновляемых в режиме реального времени.

В настоящей работе будет рассмотрен разработанный подход к созданию цифрового двойника технологического процесса энергоблока АЭС.

1 Сборочное программирование

Суть построения моделей различных энергоблоков в рамках одного гибкого моделирующего комплекса (сборочное программирование) состоит в многократном использовании отдельных программных модулей, как унифицированных и стандартизованных компонентов в различных комплексах программ. При этом имеется в виду возможность создания этих комплексов программ как для однотипных ЭВМ, так и разнотипных; очевидно, что в этом случае идет речь о решении задач переноса программного обеспечения. Поэтому сборочное программирование может быть определено как систематизированная совокупность организационно-технических мероприятий, методологических положений и инструментальных средств, обеспечивающих законченную технологию создания комплексов программ, а также обеспечивает в каждом конкретном случае получение конечного программного продукта, выполняющего свою целевую функцию в заданных для него условиях.

Основное назначение сборочного программирования в первую очередь состоит в следующем:

- существенное улучшение характеристик качества и эффективности работы комплексов программ на основе отработанных программных модулей, а также широкого использования формализованных методов их комплексирования и контроля структурного построения комплекса программ;
- практическая реализация переноса программного обеспечения как в пределах одного типа машин для решения различных задач, так и для различных типов ЭВМ.

Для того чтобы сборочное программирование могло выступать как законченная технология создания комплексов программ, оно должно удовлетворять определенной концепции, содержащей организационные и технические положения, которые состоят в следующем:

- регламентация спецификаций для описания всех компонентов комплексов программ;
- регламентация процесса перехода от прототипа к промышленной версии разрабатываемых комплексов программ;
- использование формализованных языков разработки высокого уровня со средствами модуляции;
- наличие системы языков проектирования программ, построенной на основе языков программирования высокого уровня и допускающей комплексирование с ассемблерными модулями;
- использование компьютеризированных баз данных проекта и регламентирование баз знаний;
- широкое применение при проектировании ЭВМ и рабочих мест на основе терминалов и локальных сетей;
- эволюционное развитие проектов путем подмены модулей [7].

По существу, сборочное программирование является логическим продолжением и развитием современных методов создания сложных комплексов программ - структурного программирования, структурного проектирования, использования интегральных средств проектирования и комплексной автоматизации основных средств разработки. Все эти тенденции позволяют реализовать основные условия для практического создания сборочного программирования - унификацию архитектуры проектируемых комплексов программ и стандартизацию технологии их разработки. Эти два фактора и являются той основой, которая позволит "конструировать" новые комплексы, пользуясь имеющимися "заготовками" в виде надлежащим образом оформленных программных модулей.

Очевидно, что применение сборочного программирования должно иметь определенные предпосылки. Первой является унификация и стандартизация, которая позволяет "механически" объединять компоненты в единую конструкцию. Второе - объединяемые компоненты должны отвечать необходимому функциональному назначению, т.е. в собираемой совокупности обеспечивать выполнение требуемой задачи. Третье - должна обеспечиваться возможность сопряжения вновь разрабатываемых программ с имеющимся заделом программных модулей.

К программному обеспечению разрабатываемого гибкого моделирующего комплекса энергоблока АЭС предъявляются следующие требования:

- программное обеспечение должно быть достаточным для реализации всех функций, возложенных на моделирующий комплекс;
- в состав программного обеспечения должно входить общее и специальное программное обеспечение;
- общее программное обеспечение должно содержать программы, поставляемые в комплекте с используемыми средствами вычислительной техники;

- специальное программное обеспечение должно содержать совокупность программ, реализующих функции моделирующего комплекса и обеспечивающих организацию функционирования комплекса технических средств;
- математические модели должны быть написаны на алгоритмических языках, совместимых с современными операционными системами;
- математические модели технологических систем должны функционировать как в автономном, так и в комплексном режимах;
- математические модели должны иметь модульную структуру с возможностью замены или добавления любого модуля.
- обслуживающие программы должны обеспечивать возможность внесения изменений и дополнений в специальное программное обеспечение, в том числе снятие копий с информации, записанной на внешний носитель;
- должна быть обеспечена возможность расширения программного обеспечения с учетом перспектив развития моделирующего комплекса;
- в состав специального программного обеспечения должен входить блок исходных данных, определяющих режим работы оборудования (для всех основных режимов эксплуатации должны быть подготовлены исходные данные для запуска моделирующего комплекса);
- моделирующий комплекс должен обеспечивать однозначное определение картины срабатывания исполнительных механизмов и надежное моделирование хода технологического процесса;
- качество моделирования должно обеспечиваться во всех основных режимах эксплуатации значения аналоговых параметров сигналов контроля, выдаваемых моделирующим комплексом.

2 Гибкая моделирующая система

Базой для разработки средств моделирования технологического оборудования и технологического процесса служит вычислительный комплекс математического моделирования динамики параметров энергоблоков АЭС [8].

В части математического моделирования технологических процессов и оборудования необходимо решать проблемы для разных типов энергоблоков. Это обуславливает специфику программного комплекса моделирования технологических процессов АЭС, заключающуюся в первую очередь в гибкости этого комплекса. При этом в понятие «гибкость» такого комплекса вкладываются следующие основные признаки:

1. Комплекс составлен из набора моделей, реализованных в виде программных модулей, отражающих технологическую специфику оборудования и автоматики исследуемых для конкретных энергоблоков действующих или проектируемых АЭС.

2. Для охвата математическим моделированием всего интересующего спектра режимов работы энергоблоков (в т.ч. и аварийных), набор моделей по конкретному энергоблоку включает модели оборудования, узлов и систем разной степени сложности.

3. Для эффективной работы с наборами моделей в составе комплекса, эти модели должны быть реструктурированы. Реструктуризация подразумевает разделение моделей комплекса на три основных типа модулей:

- модули моделирования технологического оборудования исследуемого объекта при заданных извне управлениях;
- модули моделирования алгоритмов управления (модель АСУ ТП);
- модули, реализующие визуализацию результатов моделирования.

Каждый из модулей имеет блочную структуру. Блоки модуля технологического оборудования соответствуют разбиению энергоблока на технологические системы. Блок модуля автоматики должен соответствовать основным подсистемам АСУ ТП энергоблока, их представление должно обеспечить возможность испытаний подсистем АСУ ТП, реализованных в конкретной аппаратуре.

4. Для эффективной увязки и совместной работы наборов модулей должны быть согласованы их входы-выходы и структура, что означает принятие при разработке гибкой моделирующей системы стандарта на оформление модулей и на организацию интерфейса между ними.

Создаваемый аппарат моделирования представляет возможность пользователям оперативно комплексовать математическую модель энергоблока из набора различных моделей технологического оборудования и автоматики и, соответственно, решать задачи испытаний разных типов АСУ ТП АЭС.

Принимаемая за основу гибкой моделирующей системы математическая модель динамики параметров энергоблоков АЭС [8], позволяет достаточно эффективно реализовать перечисленные выше основные «свойства гибкости», т.к. имеет блочно-модульную структуру, хорошо согласующуюся с требованиями реструктуризации и стандартизации интерфейсов.

3 Структура гибкой моделирующей системы

Охватываемые моделью технологическое оборудование и протекающие в нем физические процессы условно разбиты на группы, каждая из которых описывается отдельным функциональным модулем (блоком). Каждый модуль объединяет несколько программ, описывающих динамику параметров систем энергоблока. Принятое разбиение включает следующие основные функциональные модули:

- AZN - блок нейтронно-физических расчетов;
- Н - блок моделирования теплогидродинамики теплоносителя первого контура, параметров главных циркуляционных насосов (ГЦН), расчет ряда теплофизических коэффициентов;
- TEPL - блок расчета динамики температурных полей в тепловыделяющих элементах, корпусе реактора, трубопроводах;
- TPS - блок расчета параметров технологических подсистем первого контура - продувки подпитки (ТК), аварийного охлаждения активной зоны (ТQ, YТ), параметры систем насосов аварийного впрыска бора, аварийного расхолаживания, расчет расходов истекающего теплоносителя при компенсируемых течах первого и второго контура;
- PG - блок расчета параметров парогенераторов (ПГ) и паровых коммуникаций;
- TPN - блок расчета параметров питательного тракта, включая турбопитательные насосы и систему подогревателей высокого давления (ПВД);
- TUR - блок расчета теплофизических параметров второго контура - основной и приводной турбины, конденсатора (К) с системой конденсатных электронасосов (КЭН), деаэратора (ДА), системы подогревателей низкого давления (ПНД), расходы на быстродействующие редуцирующие установки сброса пара в конденсатор (БРУК), сброса пара в атмосферу (БРУА), подачи пара к коллектору собственных нужд (БРУСН);
- VSP - блок расчета параметров вспомогательных технологических систем - технической воды, масло ГЦН;
- AUTO - блок расчета параметров систем автоматики первого и второго контура (работа автоматических систем описывается с учетом реальных законов регулирования, реализуемых конкретными регуляторами, параметров их настроек, зоны нечувствительности, инерционности сервоприводов);
- EL - блок расчета параметров генератора (ЭГ) и внешней энергосистемы;
- SERV - комплекс блоков, имеющих сервисный характер и обеспечивающих распределенный вычислительный процесс и визуализацию результатов.

На рис. 1 и 2 представлены функциональная структура и структурная схема программного комплекса расчета динамики параметров энергоблока с реактором типа ВВЭР-1000.

Организация вычислительного процесса и структурное построение комплекса обеспечивают максимальную независимость функциональных модулей (блоков) при их разработке и модернизации с участием специалистов-технологов АЭС.

Математические описания, реализуемые соответствующими функциональными программными блоками, рассматриваются как решение самостоятельной нестационарной или квазистационарной задачи, для которой описания остальных блоков являются замыкающими соотношениями. Для обеспечения работы всех программных модулей в составе комплексной модели стандартизован состав и форма обмена информацией между программными модулями. Вся информация, которой обмениваются функциональные модули, находится в общей области оперативной памяти ЭВМ. В зависимости от настроек функциональный модуль может выполнять одну из следующих функций:

- расчет и формирование исходного стационарного состояния;
- расчет переменных, характеризующих работу моделируемой системы на новом временном слое;
- запись промежуточных результатов;
- обеспечение рестарта с контрольной точки.

Работой функциональных модулей головной модуль MAIN, структурно состоящий из двух основных частей: части, управляющей расчетом и формированием исходного стационарного состояния энергоблока и части, управляющей циклическим последовательным вызовом

функциональных модулей, осуществляющих временной расчет нестационарных процессов. Модуль MAIN позволяет имитировать действия оперативного персонала АЭС или отказы в работе технологического оборудования. Структура передачи управления и данных программного комплекса приведена на рис. 2.

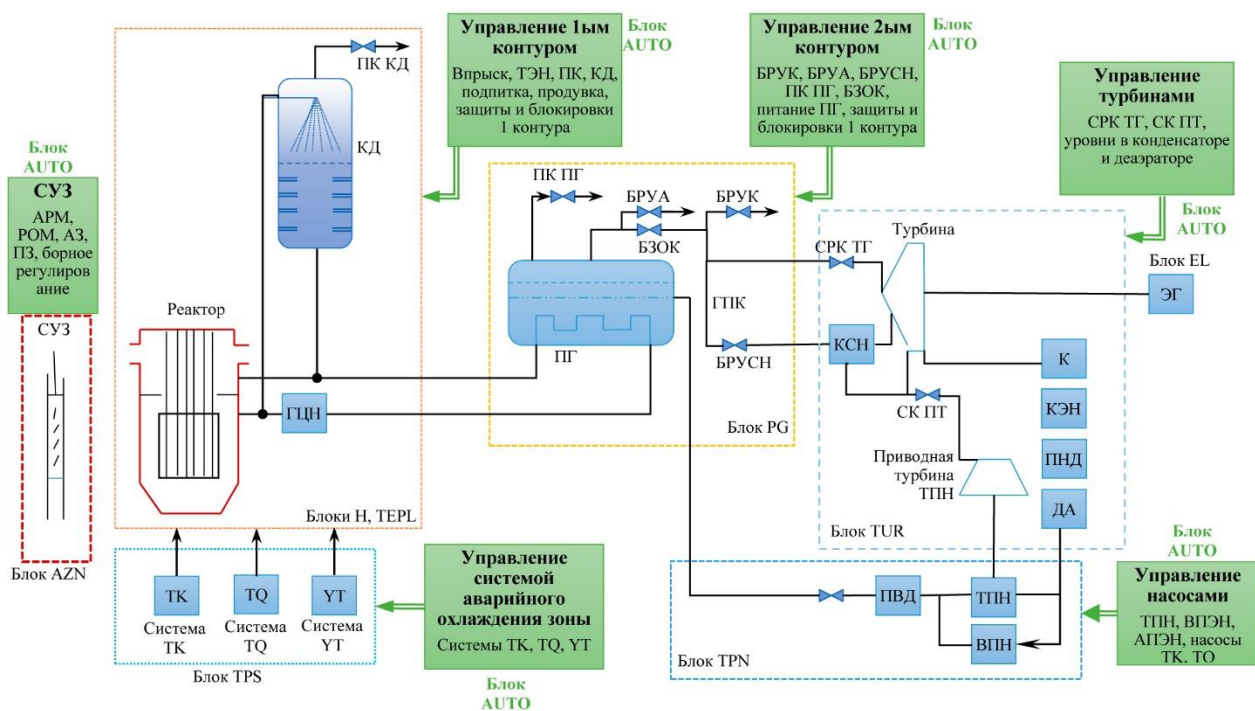


Рис. 1. Схема разбиения моделируемой системы энергоблока на функциональные модули

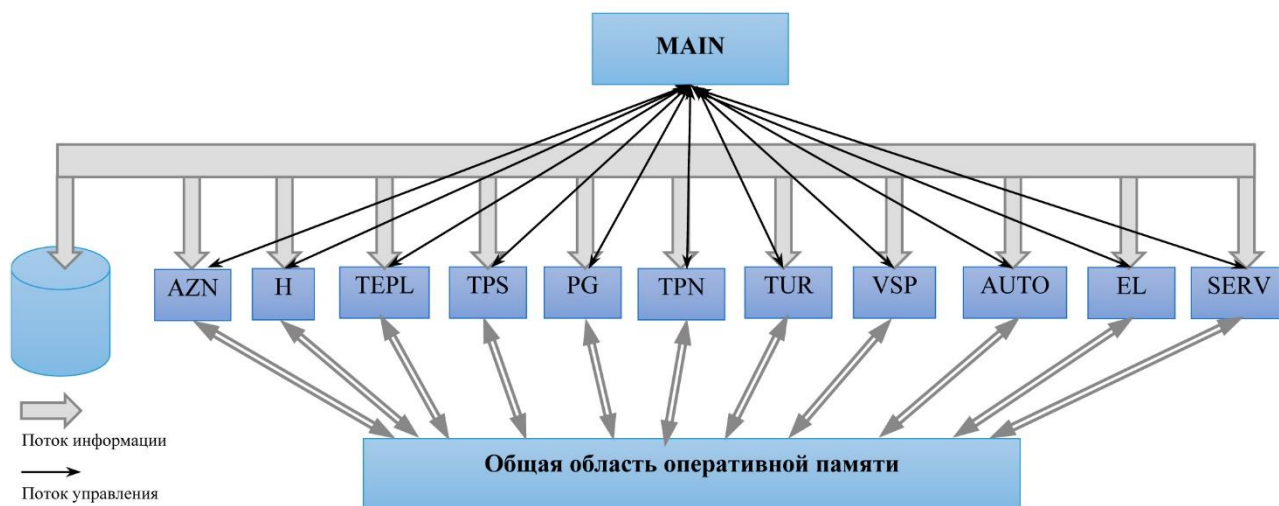


Рис. 2. Структурная схема программного комплекса

Изложенная структура комплекса математических моделей обеспечивает:

- возможность параллельной разработки математических моделей;
- возможность расширения состава и, следовательно, подобности и точности моделирования;
- гибкость системы моделирования (наиболее точные модели используются лишь в отдельных случаях, большинство же расчетов производится с использованием быстродействующих моделей, обеспечивающих достаточную точность).

Отработанная гибкая структура комплекса позволяет относительно легко подключать к комплексу вновь разрабатываемые математические модели, расширять и совершенствовать систему. В случае отсутствия необходимого для исследования программного модуля создается дополнительный программный модуль и включается в состав гибкой моделирующей системы. При этом можно

ограничиться моделированием только интересующего оборудования АЭС, а математические модели остального оборудования взять из имеющегося набора функциональных модулей.

Учитывая большой объем передаваемой между модулями информации, а также требование максимальной независимости работы каждого программного модуля от остальных использован подход с использованием общей области оперативной памяти. При введении в состав комплекса расчетов динамики параметров энергоблока новых реструктуризованных модулей основным требованием к интерфейсу с этими модулями является выдача ими определенного набора выходных параметров, передаваемых в другие модули комплекса в общую память в соответствии с ее структурой.

4 Верификация гибкой моделирующей системы

Гибкий моделирующий комплекс прошел верификацию. На рис. 3 и 4 представлены результаты сравнения результатов моделирования и экспериментальных данных (результаты моделирования приведены сплошной линией, экспериментальные данные – сплошной) в режиме отключения одного ГЦН из четырех работающих на этапе освоения мощности [9]. Результаты моделирования показали хорошее согласованность модельных и экспериментальных данных).

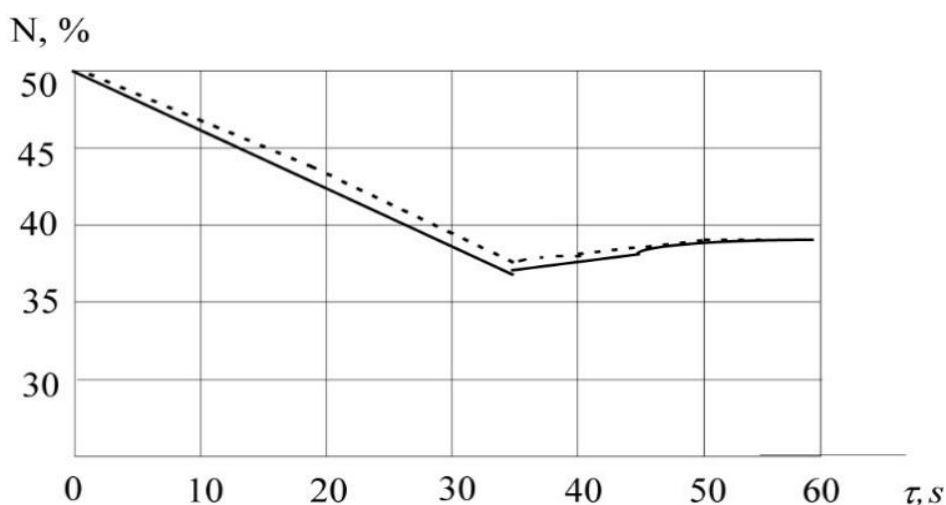


Рис. 3. Изменение нейтронной мощности реактора

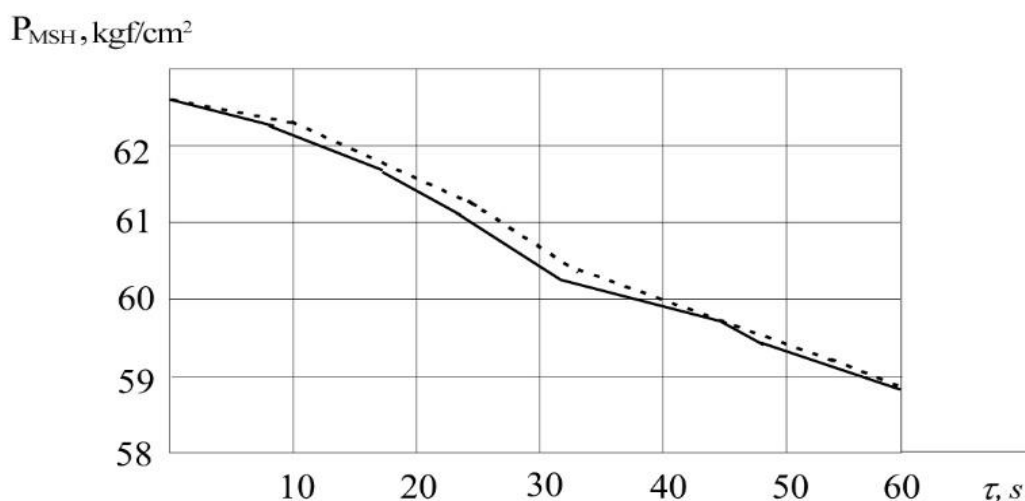


Рис. 4. Изменение давления в главном паровом коллекторе

Заключение

Гибкую моделирующую систему можно рассматривать как цифровой двойник, выступающий в качестве виртуального прототипа реального объекта или технологического процесса, который содержит все данные о нем, включая историю и информацию о текущем состоянии. Гибкая моделирующая система позволяет смоделировать развитие событий в зависимости от различных факторов, найти наиболее эффективные режимы работы, выявить потенциальные риски, сократить сроки и стоимость реализации проектов и т.д. Гибкая моделирующая система прошла верификацию и показала хорошую согласованность модельных и экспериментальных данных.

Разработанная гибкая моделирующая система может быть использована в диагностических системах [10], перспективных системах поддержки операторов [11], в оценке рисков потенциала технологического процесса [12], в построении гибридной модели кибербезопасности АЭС [13-16].

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. Vol. 60. 2021. – P.119–137.
3. Fan Y., Yang J., Chen J., Hu P., Wang X., Xu J., Zhou B. A digital-twin visualized architecture for Flexible Manufacturing System // Journal of Manufacturing Systems. Vol. 60. 2021. – P.176–201.
4. Lin W.D., Low M.Y.H. Concept Design of a System Architecture for a Manufacturing Cyber-physical Digital Twin System // Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). 2020. – P.1320-1324.
5. Z. Zhang, J. Lu, L. Xia, S. Wang, H. Zhang and R. Zhao, “Digital twin system design for dual-manipulator cooperation unit,” 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). 2020. – P.1431-143.
6. Ashtari Talkhestani B., Jung T., Lindemann B., Sahlab N., Jazdi N., Schloegl W., Weyrich M. An architecture of an Intelligent Digital Twin in a Cyber-Physical Production System // At-Automatisierungstechnik. Vol. 67. 2019, № 9. – P.762-782.
7. Мессих И.Г., Штрик А.А. Общие принципы сборочного программирования при создании комплексов программ // Автоматика и телемеханика. 1989. № 11. – С.173-183.
8. Жарко Е.Ф. Гибкий моделирующий комплекс для систем поддержки оператора АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 // Автоматика и телемеханика. 2006. № 5. – С.80-92.
9. Кузьмин А.М. Методы оптимизации ядерно-энергетических установок. – М.: МИФИ, 1985. – 80с.
10. Chernyshov K.R., Zharko E.Ph. Nuclear Reactor Reactivity Estimation within NPP Diagnostics Problems // Proceedings of the 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2021. – P.484-491.
11. Zharko E.Ph., Sakrutina E.A., Chernyshov K.R. Intelligent NPP Operators Support Systems: Flexible Modeling Software Package and Digital Twins // Proceedings of the 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2020. – P.658-663.
12. Abdulova E. Some Issues of Assessing the Risk Potential of Technological Process at Nuclear Power Plants // Proceedings of the 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2021. – P.602-607.
13. Poletykin A. Cyber Security Risk Assessment Method for SCADA of Industrial Control Systems // Proceedings of the 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2018. – P.1-5.
14. Kalashnikov A., Sakrutina E. Safety management system and Significant Plants of Critical Information Infrastructure // IFAC-PapersOnLine. Vol. 52. 2019, № 13. – P.1391-1396.
15. Zharko E., Promyslov V.G., Iskhakov A. Extending Functionality of Early Fault Diagnostic System for Online Security Assessment of Nuclear Power Plant // Proceedings of the 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2019. – P.1-6.
16. Promyslov V., Semenov K., Shumov A. A Clustering Method of Asset Cybersecurity Classification // IFAC-PapersOnLine. Vol. 52. 2019, № 13. – P.928-933.