

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039.53

В.А. Кольцов¹, В.Н. Лотов¹, А.Б. Победоносцев², А.В. Тимофеев²

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПЕРЕГРУЗКИ ТОПЛИВА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова»¹,
ОАО «ОКБМ Африкантов»²

Рассматриваются вопросы построения системы контроля и управления механизмами транспортно-технологического оборудования перегрузки топлива ядерного реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Описываются особенности построения системы с учётом специфики технологического процесса, отличия от аналогичных систем управления, предлагаются новые принципы построения системы на современных программно-аппаратных средствах.

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах, перегрузка топлива, система управления, энергоблок, атомная электростанция.

Начиная с 2010 г., в РФ действует Федеральная целевая программа (ФЦП) «Ядерные энерготехнологии нового поколения», значительная часть которой посвящена развитию технологий реакторов на быстрых нейтронах и замкнутому ядерному топливному циклу (ЗЯТЦ). Кроме того, задача по формированию новой технологической платформы (НТП) атомной энергетики с реакторными установками на быстрых нейтронах включена в президентскую программу модернизации и технологического развития экономики страны.

В настоящее время Россия является мировым лидером в области промышленного освоения технологии реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Только в России уже более 30 лет работает единственный в мире промышленный быстрый реактор БН-600 на 3-м энергоблоке Белоярской АЭС.

Французский аналог – проект «Суперфеникс» – выведен из опытной эксплуатации, а европейский быстрый реактор EFR находится на стадии разработки.

Одним из эксплуатационных режимов энергетических ядерных реакторов является режим перегрузки ядерного топлива.

В отличие от реакторов на тепловых нейтронах перегружаемые тепловыделяющие сборки реакторов на быстрых нейтронах имеют более высокое удельное энерговыделение. Процесс транспортирования топлива внутри реактора типа БН проходит под уровнем натрия.

Внутриреакторное перегрузочное оборудование является составной частью первого контура и обеспечивает его герметизацию, поэтому по окончании перегрузки оно из реактора не извлекается [1].

Такие жесткие условия работы и невозможность визуального контроля процесса перегрузки требуют обеспечения высокой надежности оборудования и полной автоматизации процесса перегрузки.

В состав оборудования перегрузки реакторной установки типа БН (рис.1) входят поворотные пробки, внутриреакторный механизм перегрузки, элеваторы, подковообразные

герметичные боксы с перегрузочными машинами, вне реакторные барабан-хранилище свежих сборок и барабан-хранилище отработавших сборок, заполненный натрием, перегрузочная машина свежих сборок и перегрузочная машина склада свежего топлива. Кроме того, в состав оборудования обращения со сборками активной зоны входят также перегрузочные контейнеры и комплекс оборудования для обращения со сборками активной зоны в водяном бассейне выдержки [5].

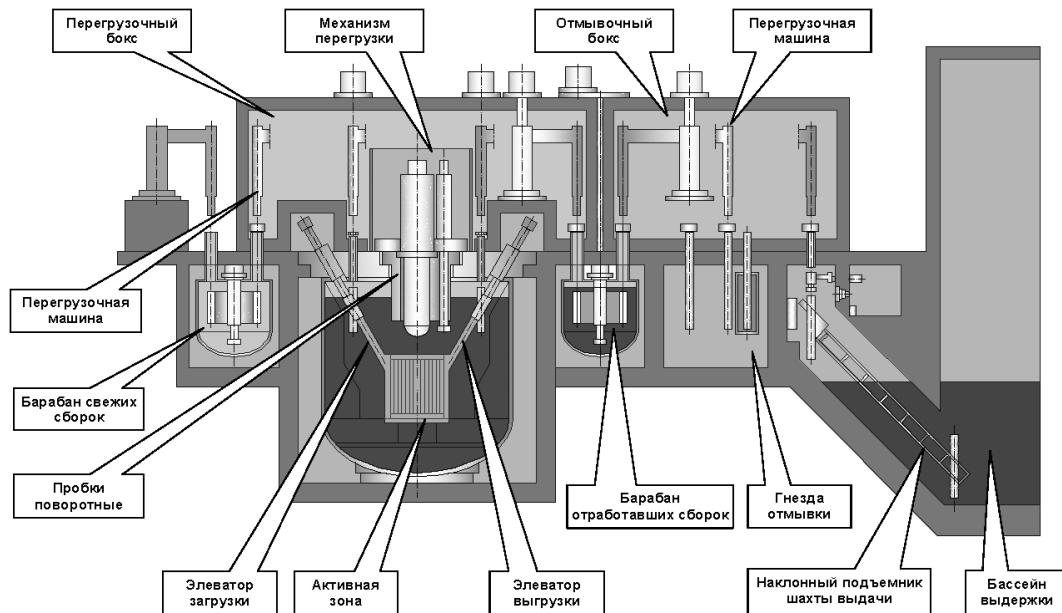


Рис. 1. Схема перегрузки реактора типа БН

Под сборками понимаются тепловыделяющие сборки (ТВС) активной зоны, зоны воспроизводства, сборки стальной и борной защиты и другие элементы активной зоны, имеющие конфигурацию ТВС.

Механизмы транспортно-технологического оборудования для обращения со сборками участвуют в выполнении следующих технологических процессов – это:

- доставка свежих сборок на склад свежего топлива (ССТ), размещение их в транспортных упаковочных комплектах (ТУК) на стеллажах временного хранения;
- перегрузка свежей сборки из ТУК в стапель – калибр, проведение контрольных операций со свежей сборкой в стапеле – калибре и загрузка ее во внутриобъектовый транспортно-упаковочный контейнер (ВТУК) в соответствии с требуемой для очередной перегрузки реактора картограммой загрузки барабана свежих сборок (БСС);
- загрузка свежих сборок из ВТУК механизмом передачи свежих сборок в БСС (в соответствии с требуемой картограммой загрузки БСС);
- перегрузка реактора в соответствии с программой (техническим решением) на конкретную перегрузку с проведением работ по отбору проб газа при контроле герметичности ТВС и наведения реакторной установки при контроле расхода натрия через ТВС;
- выгрузка отработавших сборок из барабана отработавших сборок (БОС), их отмывка и передача в приемный отсек бассейна выдержки (БВ);

При создании системы управления ТТО устанавливаются следующие основные требования (критерии):

- обеспечение совместно с транспортно-технологическим оборудованием и механизма-

ми ядерной и радиационной безопасности при проведении операций по перегрузке ядерного топлива;

- единичные отказы элементов в системе не должны приводить к потере ее работоспособности;
- структура системы управления и ее размещение должны учитывать размещение оборудования по помещениям АЭС;
- сигналы защит и блокировок должны иметь приоритет над командами управления;
- степень автоматизации функций управления и быстродействие системы должны обеспечивать выполнение операций по перегрузке топлива за минимально возможное время с учетом существующих ограничений;
- высокая точность позиционирования механизмов (отклонение от заданной координаты не должно превышать 3 мм на расстоянии до 10 м);
- эксплуатационный персонал должен иметь возможность централизованного контроля за процессом перегрузки;
- система должна предусматривать возможность обучения персонала в режиме «тренажер» или предусматривать отдельный тренажерный комплекс [2].

С целью обеспечения заданных требований по назначению возможны несколько вариантов построения системы. Для облегчения анализа все варианты построения системы представим в виде однотипной трёхуровневой иерархической структуры, нижний уровень которой образуют датчики (L – аналоговый датчик, K – дискретный датчик, Enc – датчик перемещения/поворота) и исполнительные механизмы ИМ (M – электродвигатель с тормозным устройством), средний уровень – подсистемы управления, построенные на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК), аварийные расцепители и преобразователи, верхний уровень – пункты дистанционного управления (автоматизированные рабочие места операторов-технологов – АРМ), построенные на базе промышленных компьютеров.

Вариант 1 – структурная схема показана на рис. 2.

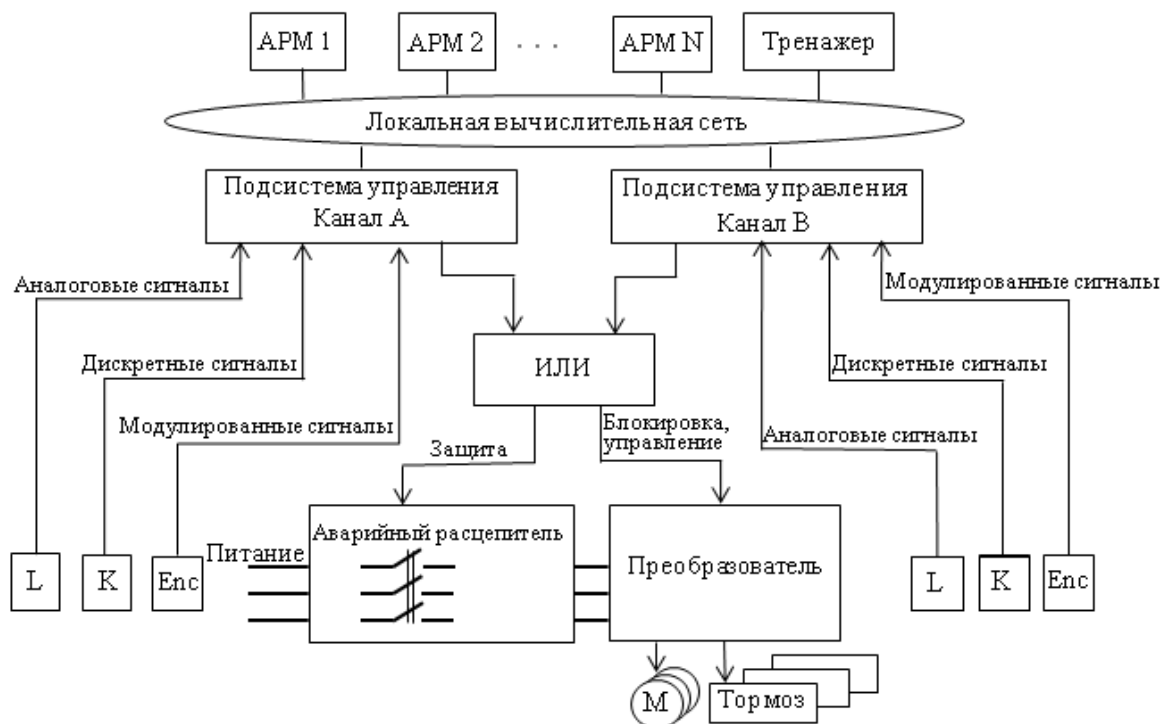


Рис. 2. Структурная схема системы управления (вариант 1):

АРМ – автоматизированное рабочее место;

K – дискретный датчик; L – аналоговый датчик; M – электродвигатель;

Enc – датчик перемещения/поворота

Данная структура имеет два канала контроля и управления: канал А и канал В, реализованные в одном ПЛК. Принятие решения по управлению (защита, технологическая блокировка, управляющее воздействие) осуществляется в блоке ИЛИ, построенном на релейной логике. Функции режима «тренажёр» выполняет отдельный компьютер с соответствующим программным обеспечением (ПО), подключенный к локальной вычислительной сети верхнего уровня. Аналогичная схема реализована в системах управления машинами перегрузочными (СУМП) для реакторов типа ВВЭР-440, ВВЭР-1000 и БН-600 в 70-х – 80-х годах XX века.

Вариант 2 – структурная схема показана на рис. 3.

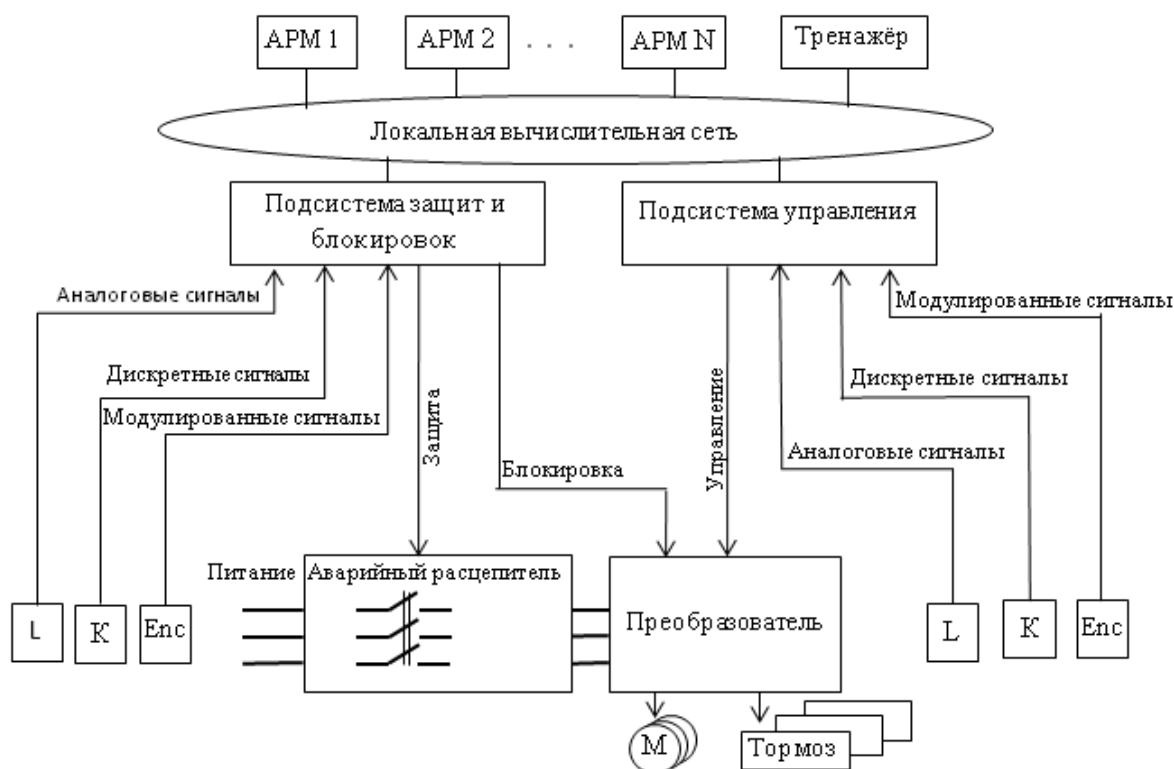


Рис. 3. Структурная схема системы управления (вариант 2):

АРМ – автоматизированное рабочее место;

К – дискретный датчик; L – аналоговый датчик; М – электродвигатель;

Enc – датчик перемещения/поворота

В данной структуре функции защит/блокировок и функции управления выделены в две независимые подсистемы и выполняются на различных контроллерах. Реализация режима «Тренажёр» аналогична предыдущей схеме. Преимуществом такой системы является повышение безопасности выполнения управляющих операций, недостатком – аппаратная избыточность и, как следствие, увеличение стоимости системы управления. Аналогичная схема применяется в модернизированных СУМП для реакторов ВВЭР-1000 в настоящее время [4].

Вариант 3 – структурная схема показана на рис. 4.

В данной структуре сочетаются принципы построения систем управления перегрузкой топлива ядерных реакторов по вариантам 1 и 2 с учётом развития современной программно-аппаратной базы систем промышленной автоматизации, позволяющей добиваться заданных требований по назначению и надёжности с минимальными затратами. В основу новой структуры заложен принцип распараллеливания вычислительных процессов, реализуемых в верхнем и среднем уровнях управления:

- процесс А – содержит основную управляющую программу перегрузки (последовательность законченных операций движения ИМ), формируемую из технологической

программы перегрузки (технического решения на конкретную перегрузку), математическую модель объекта управления (ММОУ), блок принятия решений, программу «Помощь» (советы оператору), программу «тренажёр». Процесс *A* выполняется в многозадачном режиме на верхнем уровне управления;

- процесс *B* – содержит программу опроса датчиков и выработки сигналов технологических защит, ограничений и блокировок (ТЗОб) по технологическим параметрам;
- процесс *C* – содержит программу опроса датчиков и алгоритмы элементарных движений ИМ. Процессы *B* и *C* независимы и выполняются параллельно на среднем уровне управления.



Рис. 4. Структурная схема системы управления (вариант 3):
 АРМ – автоматизированное рабочее место; *K* – дискретный датчик;
L – аналоговый датчик; *M* – электродвигатель;
Enc – датчик перемещения/поворота

Данная схема предлагается для реализации в качестве основы при построении системы контроля и управления механизмами транспортно-технологического оборудования (СКУ ТТО) перегрузки топлива для современных реакторов на быстрых нейтронах типа БН [3].

В качестве электроприводов механизмов оборудования обращения со сборками активной зоны предлагается использовать электродвигатели переменного тока в комплекте с преобразователями частоты, обеспечивающими плавное изменение скорости перемещения механизмов в широком диапазоне.

В качестве датчиков положения механизмов предлагается применять синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы, индуктивные и герконовые датчики. Датчики различных типов позволяют создавать дублированные каналы контроля положения механизма.

Основу среднего уровня управления должны составлять устройства связи с объектом, построенные на базе ПЛК с циклом опроса не более 5 мс (реальное время процесса).

Верхний уровень будет представлять собой набор АРМ, выполняющих также функции серверов сбора информации и коммутаторов ЛВС.

Общий алгоритм функционирования системы контроля и управления транспортно-технологическим оборудованием (СКУ ТТО) представлен на рис. 5.

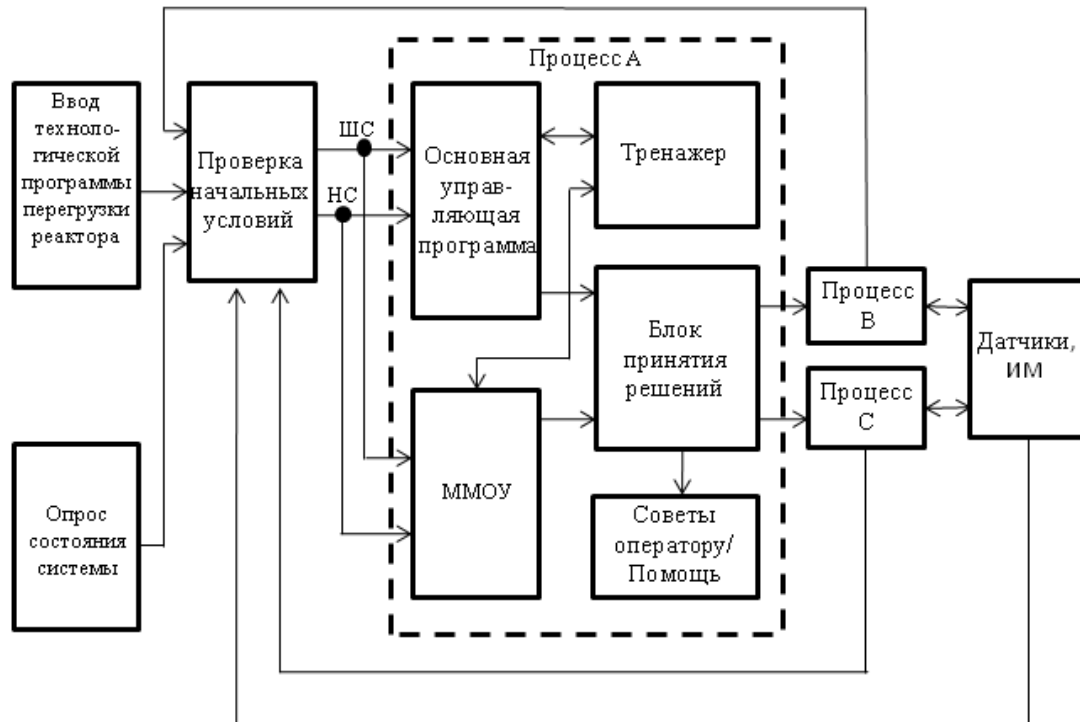


Рис. 5. Общий алгоритм функционирования СКУ ТТО:

ШС – штатная ситуация; НС – нештатная ситуация;

ММОУ – математическая модель объекта управления;

ИМ – исполнительные механизмы

Технологическая программа (решение) перегрузки реактора (загрузки, отмывки) готовится инженерами-физиками атомной электростанции (АЭС) с использованием специализированной системы подготовки данных и вводится в СКУ ТТО на электронном энергонезависимом носителе и/или по локальной вычислительной сети (ЛВС) АЭС.

Далее, после подачи оператором команды начала работы в автоматическом режиме, производится опрос состояния системы управления (самодиагностика), включающий в себя:

- наличие в ЛВС системы управления всех абонентов, участвующих в технологической программе (включая целостность линий связи);
- исправность абонентов ЛВС;
- целостность линий связи с датчиками и ИМ;
- контроль электропитания.

Обобщённая и детализированная информация о самодиагностике системы и её составных частей выводится на специализированные видеокдры АРМ оператора, а также формируется обобщённый сигнал (флаг) для разрешения/запрещения дальнейшего алгоритма функционирования системы.

Так как механизмы ТТО после последней перегрузки (контроля технического состояния, ремонта) могут находиться в состоянии, отличном от исходного (заранее определённого), а также после выполнения предшествующего шага алгоритма, то производится проверка

начальных условий выполнения первого или очередного шага технологического алгоритма, заключающаяся в опросе данных от процессов В и С. В случае отсутствия ТЗОБ и наличия детерминированного состояния ИМ вырабатывается признак штатной ситуации (ШС), начинается выполнение следующего шага алгоритма. В случае присутствия сигналов ТЗОБ и/или недетерминированного состояния ИМ (недоход/переход/несрабатывание) вырабатывается признак нештатной ситуации (НС), который затем анализируется основной управляющей программой и ММОУ параллельно (в режиме on-line).

ММОУ содержит в своём составе математические модели (ММ) всех технологических алгоритмов, а также ММ всех шагов технологических алгоритмов в виде поведенческих и расчётно-кинематических моделей ТОУ. В случае штатной ситуации «мнения» основной управляющей программы и ММОУ совпадают, и блок принятия решений вырабатывает адекватную команду на вход процесса С для последующей выработки управляющего воздействия на ИМ. В случае нештатной ситуации ММОУ формирует множество решений по приведению комплекса СКУ – ТОУ к штатной ситуации. Блок принятия решений оптимизирует решения по критериям безопасности с учётом ТЗОБ, возможных степеней свободы ИМ, минимизации времени выполнения операций и другими и переводит СКУ из автоматического в интерактивный режим. При этом ММОУ и блок принятия решений передают на АРМ оператора данные для программы «Советы оператору/помощь». Оператор в пошаговом автоматизированном режиме принимает окончательные решения по выводу комплекса в штатное состояние (в случае такой возможности).

В случае невозможности выполнения операций в автоматизированном режиме оператор принимает решение о переходе на управление с местных пультов управления и/или на ручное управление ИМ с помощью механического привода (без использования электропривода). При этом при любом способе управления СКУ через процессы В и С отслеживает состояния ИМ, и при обнаружении детерминированного состояния ИМ вырабатывает признак ШС, необходимый для перевода СКУ в автоматический режим для продолжения выполнения технологического алгоритма.

Как правило, перегрузка топлива для реакторов типа БН занимает в среднем 500 ч и осуществляется два раза в год. В остальное время СКУ ТТО находится в режиме ожидания, в котором осуществляется мониторинг состояния ИМ и возможно проведение операций, не связанных непосредственно с перегрузкой топлива активной зоны реактора (работы на ССТ, БВ и ХТРО).

Таким образом, время между перегрузками можно использовать для обучения сменных операторов работам по перегрузке топлива на штатных АРМ из состава СКУ ТТО (режим «тренажёр»). В данном режиме участвуют функциональные блоки алгоритма: «ввод технологической программы перегрузки», «основная управляющая программа», ММОУ, «блок принятия решений», «советы оператору/помощь» – без выдачи управляющих воздействий в процессы В и С. При этом динамическая имитация датчиков производится с помощью ММОУ. Режим «тренажёр» позволяет создавать типовые штатные и нештатные ситуации и является обязательным инструментом для сдачи экзаменов и допуска персонала к работам на роботизированном комплексе СКУ – ТОУ.

Выполнение требований (критериев) к созданию СКУ ТТО обеспечивается:

- за счёт рационального распределения функций между аппаратным и программным обеспечением с необходимым резервированием датчиков, линий связи, устройств и процессов;
- наличия математической модели ТОУ, позволяющей осуществлять приоритетное управление в штатных и аварийных ситуациях при всех возможных режимах управления ТТО (автоматическом, автоматизированном, дистанционном, ручном) с минимизацией времени выполнения технологических операций;
- ведения единой информационной базы данных, позволяющей, в том числе, идентифицировать местонахождение и параметры ТВС в любой момент времени;

- использования развитой системы диагностики, режима «помощь оператору» и режима «тренажёр» на штатных программно-аппаратных средствах.

Предлагаемые решения по структуре комплекса технических средств и организации вычислительного процесса в системе управления ТТО для реактора типа БН позволяют создать систему на передовом техническом уровне, полностью удовлетворяющую основным критериям (требованиям), предъявляемым к системам управления и контроля аналогичного назначения.

Библиографический список

1. **Дементьев, Б.А.** Ядерные энергетические реакторы / Б.А. Дементьев. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 349 с.
2. **Юркевич, Г.П.** Системы управления энергетическими реакторами / под ред. академика РАН Н.С. Хлопкина. – М.: Издательство ЭЛЕКС-КМ, 2001. – 344 с.
3. **Кольцов, В.А.** Принципы построения системы контроля и управления механизмами транспортно-технологического оборудования перегрузки топлива ядерного реактора / В.А. Кольцов, В.Н. Лотов, А.Б. Победоносцев, А.В. Тимофеев // XVII Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» ИСТ-2011 / НГТУ. – Нижний Новгород, 2011. С. 170.
4. **Жильников, Д.В.** Создание роботизированных комплексов для перегрузки ядерного топлива на АЭС с ВВЭР / Д.В. Жильников, С.М. Ефремов, М.Э. Пинчук, С.А. Марченко, А.М. Кобелев, В.В. Коробкин // V Международный научно-промышленный форум «Ярмарка атомного машиностроения» / Конференция «Проектирование в XXI веке» / ОАО «НИАЭП». – Нижний Новгород, 2010. С. 47–54.
5. **Тимофеев, А.В.** Опыт создания и совершенствования систем перегрузки быстрых реакторов в России / А.В. Тимофеев, М.А. Любимов // Техническая встреча по системам перегрузки быстрых реакторов в Калпаккаме (Индия), 2008.

*Дата поступления
в редакцию 10.10.2012*

V.A. Koltsov¹, V.N. Lotov¹, A.B. Pobedonostsev², A.V. Timofeev²

AUTOMATION OF REFUELING PROCEDURE OF FAST-NEUTRON REACTOR

Measuring system research institute n. a. Yu.Ye. Sedakov, Nizhny Novgorod¹,
Joint stock company «OKBM n.a Afrikantov»²

The subject of this article is consideration of building control systems and control mechanisms of transport and technological refueling equipment for nuclear fast-neutron reactor. The purpose is to analyze experience of creation such control systems for thermal and fast-neutron reactors and to create recommendations for the building of the modern software and hardware.

The methodology of this paper is a structural and functional analysis, aimed at optimizing solutions for the specified requirements for the control system.

The paper presents a comparative analysis of the structural patterns of building management systems for VVER-440 and VVER-1000, BN-600. The solutions for the regime "Simulator" using a mathematical model of controlled object are described.

Nowadays, the results are used to create the control system of refueling of the reactor for Unit-4 of Beloyarsk nuclear power station.

The proposed solutions allow creation a control system of robotic complex of overloading nuclear fuel for fast-neutron reactor, satisfying all requirements specific to the process associated with nuclear and radiation safety.

Key words: fast-neutron reactor, refueling, control system, power unit, nuclear power plant.