

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА РАЗНООБРАЗИЯ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ АСУ ТП ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

А.О. Толоконский, В.С. Володин

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31*



Вопросу подготовки кадров для атомной отрасли уделяют внимание все страны, на территории которых эксплуатируются атомные электростанции. В высших учебных заведениях разрабатываются образовательные программы для выпуска специалистов в области ядерных технологий, а также программы переподготовки и повышения квалификации персонала, работающего в атомной сфере. С развитием информационных технологий в образовательный процесс все больше интегрируются современные технические средства. Ввиду того, что компьютерное моделирование динамических процессов в оборудовании энергоустановок является одним из важнейших этапов проектирования ядерных энергетических установок, лабораторные практикумы институтов оснащаются техническими комплексами для проведения численных экспериментов. Целесообразно при проведении занятий использовать оборудование, которое применяется на предприятиях отрасли – контроллерные шкафы ТПТС и компьютерный многофункциональный анализатор реакторной установки. В статье описывается опыт создания лабораторного комплекса для выполнения курсовых и выпускных квалификационных работ студентами, ключевой особенностью которого является программное и аппаратное разнообразие модели исследуемого объекта и управляющей части. Модель объекта выполняется на ПТК УМИКОН в среде технологического программирования RS-Prog или с помощью интерпретатора MikBASIC. Алгоритмы управления реализуются на приборной стойке ТПТС посредством программируемых функциональных модулей. Конфигурирование модулей осуществляется посредством программного обеспечения GET-R с использованием библиотеки базовых функций. В статье приведен пример реализации системы управления мощностью одногрупповой модели реактора ВВЭР.

Ключевые слова: разнообразие, компьютерное моделирование, программно-технический комплекс, атомные электростанции, автоматизированные системы управления.

ВВЕДЕНИЕ

Компьютерное моделирование динамических процессов, протекающих в энергоустановке как в процессе нормальной эксплуатации, так и в аварийных режимах, является одним из важнейших этапов проектирования ядерных энергетических установок (ЯЭУ) и атомных электростанций (АЭС). Вычислительному эксперименту подвергаются основные технологические процессы в оборудовании

- активной зоны реактора (нейтронно-физические, теплообмен);
- ЯЭУ (теплогидравлические);
- контуров АЭС (массообмен);
- систем автоматического управления технологическими параметрами установки.

Численные эксперименты различаются по степеням приближения и программно-аппаратным средствам реализации. Еще в 80-х годах прошлого века на кафедре «Автоматика» в МИФИ для обучения специалистов в атомной отрасли использовался аналоговый вычислительный комплекс АВК-6, созданный преподавательским составом и студентами и предназначенный для исследования систем автоматического управления (САУ) путем компьютерного моделирования динамических процессов [1].

Сегодня задаче подготовки кадров на кафедре «Автоматика» НИЯУ МИФИ служит учебная лаборатория «Безопасность и управление ЯЭУ», основой которой является компьютерный многофункциональный анализатор реакторной установки (МФА РУ) АЭС с ВВЭР-1000, включающий в себя моделирующий программный комплекс «ПРОСТОР» [2]. В рамках занятий, проводимых на данном программно-техническом комплексе (ПТК), студенты изучают нейтронно-физические и другие технологические процессы, происходящие в активной зоне (АЗ) и оборудовании энергетической установки, и приобретают навыки по управлению ЯЭУ в режимах как нормальной эксплуатации, так и в аварийных. Ввиду того, что МФА РУ не является системой управления реального времени, возникает необходимость в ином способе моделирования цифровых АСУ ТП АЭС для выполнения курсовых и выпускных квалификационных работ, в рамках которых поддерживается режим реального времени работы как системы управления, так и модели объекта управления. Обучающиеся должны получить структурную математическую модель системы управления, перейти от описания объекта в виде системы дифференциальных уравнений к описанию в виде системы алгебраических уравнений посредством представления производных разностными схемами и реализовать ее на программно-технических средствах.

В настоящее время существует множество различных технических комплексов и программного обеспечения для численного эксперимента. Самой распространенной является среда Simulink, входящая в программный пакет Matlab. Несмотря на множество преимуществ она имеет некоторые недостатки. Данная среда не является средой реального времени – ограничения на использование модели цифрового регулятора (недостаточное быстродействие, несовместимость конкретного промышленного регулятора со средой и т.д.) могут быть сняты путем использования инструмента RealTimeWorkshop, формирующего описание модели на языке Си и обеспечивающего высокое быстродействие [3], что может привести к усложнению процесса моделирования. Среда Simulink предназначена для моделирования динамических систем в ядерной энергетике, в авиации и в космосе, но не совсем удобна для работы в режиме реального времени. Целесообразнее использовать специально разработанные программные и технические средства.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Лабораторный комплекс для выполнения курсовых работ и ВКР, связанных с моделированием и исследованием цифровых АСУ ТП АЭС, создан на базе ПТК «УМИКОН», зарекомендовавшего себя в учебном процессе [4 – 10], и контроллерного шкафа ТПТС51 с необходимым программным обеспечением, поскольку они применяются на объектах атомной отрасли, что позволяет получить аппаратные возможности управления ЯЭУ, близкие к реальным. При выполнении этих работ студенты

- изучают оборудование и программное обеспечение, применяемое на АЭС России;
- получают практические навыки разработки и отладки АСУ ТП;
- приобретают опыт проведения численного эксперимента.

В процессе выполнения курсовых работ и ВКР студентам необходимо построить и наладить распределенную АСУ ТП АЭС, реализующую следующие функции:

- измерение технологических параметров;
- отображение технологической информации по объекту управления на мнемосхеме;
- задание управляющих воздействий с экрана видеокadra;
- архивация значений технологических параметров в реальном времени;
- регулирование технологических параметров.

Главная особенность моделирующего комплекса – программное и аппаратное разнообразие моделей объекта управления и управляющей части – модель объекта реализуется на ПТК УМИКОН, а алгоритмы управления на контроллерной стойке ТПТС. Это позволяет снизить вероятность так называемого отказа по общей причине, вызываемого дефектами программных средств, которые появляются при создании схем АСУ ТП и модели объекта управления или их записи в контроллеры. Также это позволяет исключить ошибки, связанные с неоднозначной трактовкой одних и тех же алгоритмов управления. Система конфигурирования GET-R имеет встроенные средства проверки правильности разработанной конфигурации модуля, которые не позволяют сформировать загружаемый в модуль код, в котором имеются ошибки. Неоспоримым плюсом принципа разнообразия в данном случае является программирование схем и проверка их функциональности аппаратным способом, что не требует навыков программирования в привычном смысле и позволяет избежать синтаксических ошибок в коде программы.

На рисунке 1 представлена структурная схема ПТК для выполнения курсовых и квалификационных работ.

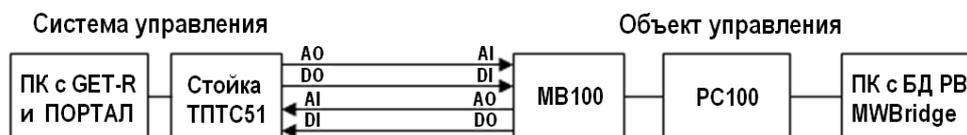


Рис. 1. Структурная схема ПТК

Моделирующий комплекс включает в себя

- преобразователь RS485-USB;
- персональный компьютер с установленной на нем базой данных реального времени MWBridge;
- моноблок МВ100 (реализует функции ПИД-регулирования и отработки блокировок);
- РС-совместимый контроллер РС100;
- соединительные провода;
- контроллерный шкаф ТПТС51;

– персональный компьютер с установленной на нем системой конфигурирования GET-R и платформой «ПОРТАЛ» для конфигурирования верхнего уровня АСУ ТП.

Студентам необходимо получить структурные математические модели реактора, парогенератора, турбины и других исследуемых объектов, которые потом записываются в моноблок MB100 и передаются посредством модуля PC100 через преобразователь интерфейса RS485 в USB на персональный компьютер (ПК) с установленной базой данных реального времени MWBridge.

Управляющая часть реализуется на приборной стойке ТПТС51 (уровень низовой автоматики). Модуль, на котором реализуется система управления, можно конфигурировать как изолированно, так и в составе уже работающей системы автоматизации. Для этого к системе автоматизации через шину процесса подключается инженерная станция с установленной системой конфигурирования схем GET-R и проектом системы управления. Подробнее приборная стойка ТПТС51 и работа с ней описаны в [11].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Моделирование объекта управления можно выполнить двумя способами посредством алгоблочного языка программирования верхнего уровня RsProg, входящего в состав ПТК «УМИКОН».

Первый способ заключается в линеаризации исследуемой физической системы. Данный подход позволяет студентам использовать аппарат преобразования Лапласа, позволяющий перейти от трудоемкого процесса поиска решения системы дифференциальных уравнений к относительно простому поиску решения системы алгебраических уравнений. Как известно [12 – 15], преобразование Лапласа и s -плоскость являются ценными методами синтеза и анализа систем управления, если необходимо определить переходные режимы и точность в установившемся режиме. Процесс моделирования при помощи RsProg в данном случае похож на процесс реализации моделей систем управления в среде Simulink программного пакета Matlab.

Рассмотрим в качестве примера реализации первого способа одногрупповую модель кинетики реактора ВВЭР ввиду того, что она обеспечивает высокую точность описания физических процессов в ЯЭУ при решении большого количества задач управления.

В соответствии с [16 – 18] уравнения кинетики для одногрупповой модели имеют вид:

$$\tau \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \rho \Phi - \tau \frac{C}{t}, \quad (1)$$

$$\tau \frac{\partial C}{\partial t} = \beta \Phi - \tau \lambda C, \quad (2)$$

где τ – среднее время жизни мгновенных нейтронов; Φ – величина плотности нейтронного потока; C – концентрация ядер-излучателей запаздывающих нейтронов; β – доля запаздывающих нейтронов; λ – постоянная распада ядер-излучателей.

Выходным сигналом для реактора является изменение мощности φ , а входным – изменение реактивности $\Delta\rho$. Тогда передаточная функция критического реактора для одногрупповой модели будет иметь вид [19]

$$W_0(p) = \frac{\varphi(p)}{\rho(p)} = \frac{\Phi_0(p + \lambda)}{\rho(\tau p + \tau \lambda + \beta)}, \quad (3)$$

или, пренебрегая $\tau \lambda$ в сравнении с β ,

части – выходных, а над типом операции указаны параметры динамического звена. Таким образом, можно запрограммировать уравнение динамики практически любого объекта управления.

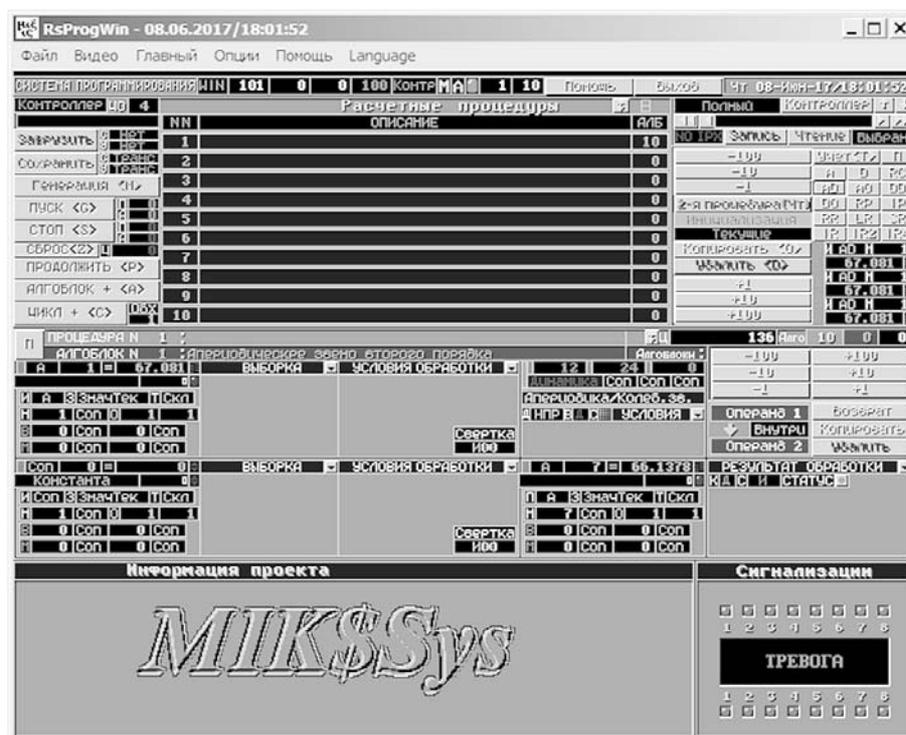


Рис. 3. Окно расчетных процедур в RS-Prog

Второй способ реализации модели объекта управления заключается в переходе от описания объекта в виде системы дифференциальных уравнений к описанию в виде системы алгебраических уравнений посредством представления производных разностными схемами. В расчетной процедуре интерпретатора MikBASIC реализуется программа, которая содержит систему разностных уравнений, описывающих объект моделирования. Выполнение программы осуществляется при помощи базы данных реального времени. В качестве примера второго способа рассмотрим реализацию уравнений кинетики реактора ВВЭР с одной группой запаздывающих нейтронов, стационарное состояние которого обеспечивается внешним источником нейтронов мощностью S ($K_{эф} < 1$), на модуле MB100 ПТК УМИКОН. Уравнения кинетики принимают следующий вид:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n + \lambda C + S, \quad (5)$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda} n - \lambda C, \quad (6)$$

где Λ – время генерации мгновенных нейтронов.

Для реализации модели исследуемого объекта в интерпретаторе получим разностные уравнения, соответствующие уравнениям кинетики (5) и (6). Для уравнения (5)

$$\frac{n_k - n_{k-1}}{\Delta t} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n_k + \lambda C_k + S, \quad (7)$$

$$n_k - n_{k-1} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n_k \Delta t + \lambda C_k \Delta t + S \Delta t, \quad (8)$$

$$n_k - \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n_k \Delta t = \lambda C_k \Delta t + S \Delta t + n_{k-1}, \quad (9)$$

$$n_k (1 - \frac{\rho - \beta}{\Lambda} \Delta t) = \lambda C_k \Delta t + S \Delta t + n_{k-1}, \quad (10)$$

$$n_k (1 - \frac{\rho - \beta}{\Lambda} \Delta t) = \frac{\lambda C_k \Delta t + S \Delta t + n_{k-1}}{(1 - \frac{\rho - \beta}{\Lambda} \Delta t)}. \quad (11)$$

Аналогично получаем разностное уравнение для выражения(6):

$$C_k = \frac{\beta n_k \Delta t + c_{k-1}}{(1 - \lambda \Delta t)}. \quad (12)$$

Полученные уравнения (11) и (12) необходимо задать в переменных базы данных реального времени MWBridge:

$$\rho = N, \quad \beta = NN, \quad \Lambda = NNN, \quad \lambda = NNNN, \quad S = NNNNN, \quad \Delta t = NNNNNN.$$

На рисунке 4 показан интерфейс интерпретатора MikBASIC, где представлена реализация полученных разностных уравнений кинетики (11) и (12).

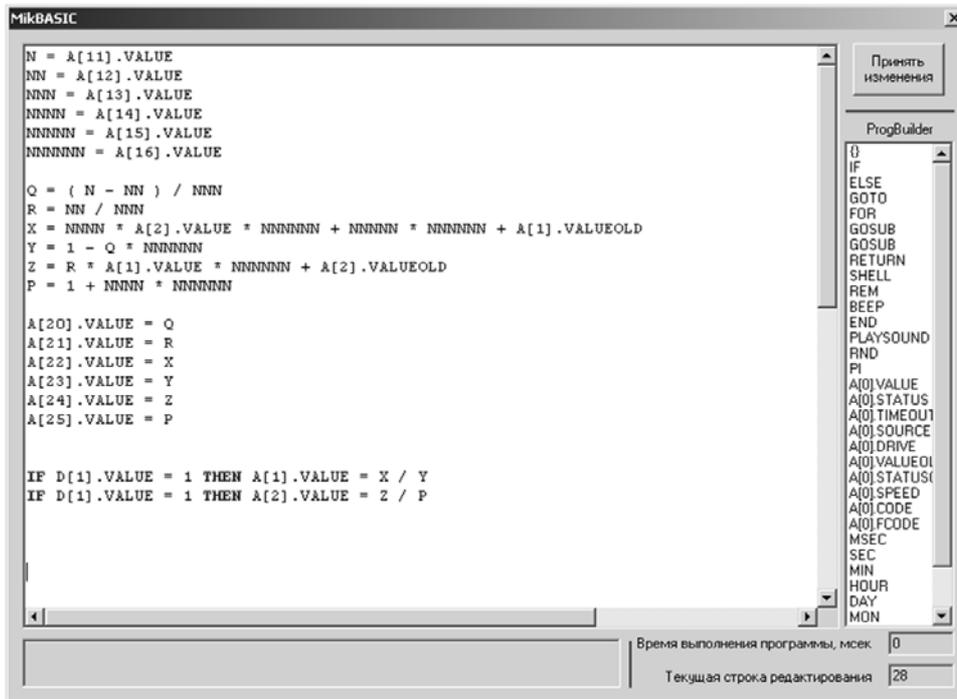


Рис. 4. Реализация разностных уравнений кинетики в интерфейсе MikBASIC

Зададим начальные условия. Пусть для подкритического реактора

$$\rho = \rho_0 = -10^{-5}\beta < 0, \text{ а } n^0 = 10^{-5},$$

тогда

$$\frac{\rho_0}{\Lambda} n_0 + S = 0, \quad (13)$$

$$S = -\frac{\rho_0}{\Lambda} n_0 = -\frac{10^{-5} \beta}{10^{-3}} 10^{-5} = 10^{-7} \beta = 6,5 \cdot 10^{-10}, \quad (14)$$

$$C_0 = \frac{-\frac{\rho_0 - \beta}{\Lambda} n_0 - S}{\lambda} = \frac{-\frac{10^{-5} \beta - \beta}{10^{-3}} 10^{-5} - 6,5 \cdot 10^{-10}}{0,1} = 6,49 \cdot 10^{-4}. \quad (15)$$

Графики зависимости мощности и реактивности реактора от реального времени даны на рис. 5 (ввод положительной реактивности в момент времени $t = 69$ с).

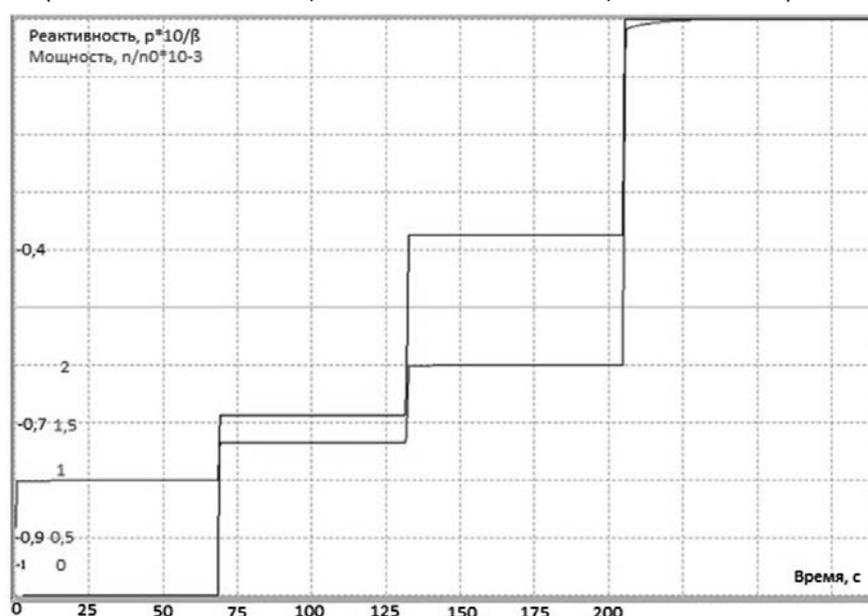


Рис. 5. Графики зависимости мощности и реактивности реактора от реального времени (MikBASIC)

Как видно из рисунка, плотность нейтронов после ввода реактивности меняется скачкообразно за счет мгновенных нейтронов, а затем линейно возрастает. Линейный рост плотности нейтронов при наличии внешнего источника является признаком выхода реактора в критическое состояние, что соответствует теории [19, 20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применяя предложенное решение использования двух программно-технических комплексов для моделирования объектов управления АЭС и реализации технологических алгоритмов управления оборудованием АЭС, студенты в процессе выполнения курсовых и выпускных квалификационных работ приобретают следующие знания и умения:

- моделируют изученные ранее нейтронно-физические и теплогидравлические процессы, протекающие в ядерных энергетических установках;
- приобретают опыт проведения численного эксперимента от этапа получения математической модели системы управления технологическим процессом до ее реализации и отладки на программно-техническом комплексе в режиме реального времени;
- приобретают навыки реализации алгоритмов управления технологическими процессами в оборудовании ЯЭУ в системах конфигурирования, применяемых на со-

временных АЭС;

– закрепляют знания, полученные на младших курсах университета, по изучению программно-технических комплексов для построения АСУ ТП.

Следует отметить, что в процессе выполнения работ у выпускников возникают различные пробелы в полученных ими ранее знаниях или обнаруживается, что какие-то разделы изученных ранее дисциплин уже забыты к старшим курсам. Например, у некоторых студентов получается успешно реализовать модель объекта, но возникают проблемы при практическом конфигурировании аппаратной части ПТК; у других – проблемы при реализации модели на стадии ее тестирования в теле базы данных реального времени на имитаторе (такие ошибки возникают при использовании неверных параметров модели). У третьей группы студентов могут возникнуть проблемы при коммутации аналоговых входных и выходных каналов ПТК ТПТС и ПТК УМИКОН, т.е. при интегрировании системы управления с реализованной моделью. Практически все возможные недочеты в знаниях, полученные при обучении, восполняются в процессе выполнения курсовых и выпускных квалификационных работ по данной тематике при использовании рассмотренного лабораторного комплекса.

Литература

1. Алексаков Г.Н., Гаврилин В.В., Федоров В.А. Персональный аналоговый компьютер. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 256 с.
2. Выговский С.Б., Королев С.А., Чернов Е.В. Учебная лаборатория на базе многофункционального анализатора реакторной установки АЭС с ВВЭР // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». – 2012. – Т.1. – №1. – С. 104-110.
3. Дэбни Дж.Б., Харман Т.Л. Simulink 4. Секреты мастерства / Пер. с англ. М.Л. Симонова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. – 403 с.
4. Власов В.А. и др. Внедрение опыта создания АСУ ТП объектов атомной отрасли на базе ПТК УМИКОН в учебный процесс // Известия вузов. Ядерная энергетика – 2014. – № 1. – С.149-155.
5. Толоконский А.О. Средства адаптивного оптимального управления в SCADA системе МикСис // Приборы и Системы управления. – 2007. – № 1. – С. 15.
6. Власов В.А., Толоконский А.О. Прикладной пакет создания АСУ ТП и конструирования оператора «МикСИС» // Приборы и Системы управления. – 1999. – № 9. – С. 35.
7. Лебедев В.О., Комисарчук С.Ю., Обносов А.В. Структура и основные особенности программного комплекса создания систем управления «МикСИС» ПТК «УМИКОН» // Промышленные контроллеры АСУ. – 2004. – № 1. – С. 35-41.
8. Власов В.А., Толоконский А.О., Голованев В.Е. Вероятностные характеристики отказов систем отображения / Сборник: Научная сессия МИФИ. – М.: МИФИ, 2005. – Т. 1. – С. 42.
9. Власов В.А., Голованев В.Е. Статистические испытания программных систем. / Сборник: Научная сессия МИФИ. – М.: МИФИ, 2004. – С. 36-37.
10. Власов В.А., Голованев В.Е., Толоконский А.О. Анализ вероятности отказа систем отображения // Промышленные контроллеры АСУ. – 2005. – № 4. – С. 25.
11. Зверков В.В. Автоматизированная система управления технологическими процессами АЭС. Монография. – М.: НИЯУ МИФИ, 2014. – 560 с.
12. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. / Пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.
13. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем / Учебник для вузов, 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.
14. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы [Текст] / Д.П. Ким. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 312 с.
15. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. Ч. 1. Линейные системы регулирования одной величины. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 395 с.
16. Бать Г.А. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 511 с.

17. Климов А.Н. Основы ядерной и нейтронной физики. – М.: МИФИ, 2004. – 240 с.
18. Кесслер Г. Ядерная энергетика. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 261 с.
19. Потапенко П.Т. Динамика ядерного реактора. – М.: МИФИ, 1989. – 73 с.
20. Потапенко П.Т. Системы управления ядерным реактором. – М.: МИФИ, 1991. – 64 с.

Поступила в редакцию 15.06.2017 г.

Авторы

Толоконский Андрей Олегович, доцент, канд. техн. наук

E-mail: toloconne@yandex.ru

Володин Василий Сергеевич, инженер

E-mail: aincrad32@gmail.ru

UDC 681.5.017

IMPLEMENTATION OF THE DIVERSITY PRINCIPLE OF SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEXES OF PROCESS CONTROL SYSTEMS FOR NUCLEAR FACILITIES IN EDUCATIONAL PROCESS

Tolokonsky A.O., Volodin V.S.

National Research Nuclear University «MEPhI»

31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409 Russia

ABSTRACT

Training personnel for the nuclear industry is an important problem for all countries where nuclear power plants are operated. Higher educational institutions develop educational programs for training specialists in nuclear technologies as well as qualification programs for power plant personnel. As information technology develops, more and more modern equipment is integrated into the educational process. In view of the fact that computer modeling of dynamic processes in the equipment of power facilities is one of the most important stages in designing nuclear power plants, laboratory workshops of institutes are equipped with hardware/software systems for performing numerical experiments. When conducting classes, it is advisable to use equipment that is operated by nuclear power providers, i.e., TSW&HW control cabinets and reactor computerized multifunctional analyzer. This article describes the experience of creating a laboratory complex to be used by students for performing their course works and final projects. The key feature of this complex is the software/hardware diversity of the object model under study and the control part. The object model is performed on the UMICOM software and hardware complex in the RS-Prog technological programming environment or with the interpreter MikBASIC. The control algorithms are implemented on the TSW&HW instrumentation cabinet using programmable function modules. The functional modules are configured by the GET-R software using the basic function library. Finally, an example is given of a power management system for the one-group VVER reactor model.

Key words: diversity, computer modeling, software and hardware complex, nuclear power plants, automated control systems.

REFERENCES

1. Aleksakov G.N., Gavrilin V.V., Fyodorov V.A. Personal analog computer. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1992. 256 p. (in Russian).
2. Vygovsky S.B., Korolyov S.A., Chernov E.V. Laboratory based on multifunctional analyzer

reactor facility of NPP with VVER. *Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI»*. 2012, no. 1, pp. 104-110 (in Russian)

3. Dabney J.B., Harman T.L. *Mastering Simulink 4*. New Jersey, Prentice Hall Publ., 2003. 403 p.
4. Vlasov V.A., Korolyov S.A., Lebedev V.O., Tolokonsky A.O. Implementation of the experience in designing APCS systems for nuclear facilities based on UMIKON package in the educational process. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2014, no. 1, pp. 149-155 (in Russian).
5. Tolokonsky A.O. Instruments of optimal adaptive control in SCADA-system MikSYS. *Pribory i sistemy upravleniya*. 2007, no. 1, p. 15 (in Russian).
6. Vlasov V.A., Tolokonsky A.O. Application program package for SCADA development and MikSYS operator design. *Pribory i sistemy upravleniya*. 1999, no. 9, p. 35 (in Russian).
7. Lebedev V.O., Komisarchuk S.Yu., Obnosov A.V. Structure and basic features of the MikSYS software package for designing control systems based on the UMIKON complex. *Promyshlennye kontroly ASU*. 2004, no. 1, pp. 35-41 (in Russian).
8. Vlasov V.A., Tolokonsky A.O., Golovanyov V.E. Probability characteristics of display systems failure. Proc. Scientific session of MEFhI. Moscow. MIFI Publ., 2005, v. 1, p. 42 (in Russian).
9. Vlasov V.A., Golovanyov V.E. Statistical tests of program systems. Proc. Scientific session of MEFhI. Moscow. MIFI Publ., 2004, pp. 36-37 (in Russian).
10. Vlasov V.A., Golovanyov V.E., Tolokonsky A.O. Analysis of display system failure probability. *Promyshlennye kontroly ASU*. 2005, no. 4, p. 25 (in Russian).
11. Zverkov V.V. *Automated process control system for nuclear power plants*. Moscow. NIYaU MIFI Publ., 2014. 560 p. (in Russian).
12. Dorf R.C., Bishop R.H. *Modern control systems*. Boston. Addison-Wesley Publ., 1998. 832 p.
13. Ivaschenko N.N. *Automatic control. Theory and system elements*. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1978. 736 p. (in Russian).
14. Kim D.P. *Control theory*. Moscow. FIZMATLIT Publ., 2010. 312 p. (in Russian).
15. Voronov A.A. *Fundamentals of control theory*. Moscow. Energiya Publ., 1965. 395 p. (in Russian).
16. Bat' G.A. *Fundamentals of theory and methods of calculation of nuclear energy reactors*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1982. 511 p. (in Russian).
17. Klimov A.N. *Fundamentals of nuclear and neutron physics*. Moscow. MIFI Publ., 2004. 240 p. (in Russian).
18. Kessler G. *Nuclear fission reactors. Potential role and risks of converters and breeders*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1986. 261 p. (in Russian).
19. Potapenko P.T. *Dynamics of nuclear reactor*. Moscow. MIFI Publ., 1989. 73 p. (in Russian).
20. Potapenko P.T. *Nuclear reactor control systems*. Moscow. MIFI Publ., 1991. 64 p. (in Russian).

Authors

Tolokonsky Andrey Olegovich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: toloconne@yandex.ru

Volodin Vasiliy Sergeevich, Engineer

E-mail: aincrad32@gmail.com