

ЭЛЕКТРОНИКА И АВТОМАТИКА ФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

УДК 621.039.5

СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА ИГР ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ИСПЫТАНИЙ

О.А. Горбаненко, Ю.М. Казьмин*, В.В. Дзалбо

Национальный ядерный центр Республики Казахстан (НЯЦ РК)

**Институт атомной энергии НЯЦ РК*

В работе рассмотрены назначение и область использования реактора ИГР, необходимость совершенствования системы автоматического регулирования мощности реактора. Приведены описание структуры системы и ее составных элементов, а также алгоритма функционирования; результаты модельных исследований и характеристик системы.

Одной из проблем развития атомной энергетики является повышение безопасности эксплуатации реакторных установок. Актуальность этой проблемы прежде всего связана с последствиями, которые могут иметь место в случае повторения аварии, подобной Чернобыльской. Исключение такого рода аварий, уменьшение вероятности их возникновения, а также последствий других тяжелых аварий и инцидентов есть комплексная задача, в решении которой одно из ведущих мест занимает реакторный эксперимент.

Более 40 лет подобные эксперименты проводятся в рамках различных программ, связанных с развитием и обоснованием безопасности атомной энергетики, на импульсном исследовательском реакторе (ИГР [1]). Являясь одним из мощных в мире источников нейтронного и γ -излучений, реактор ИГР отличается еще и высокой динамикой изменения мощности и возможностью моделирования запроектных наиболее тяжелых аварий реакторного типа RIA с дополнительным наложением условий, характерных для технологических аварий типа LOCA.

Для расширения функциональных возможностей реактора ИГР, повышения точности и качества реакторного эксперимента, а также для повышения его собственной безопасности в рамках модернизации технических средств реактора ИГР разработана система автоматического регулирования мощности.

В настоящей статье приведены концепция новой системы автоматического регулирования мощности, ее основные характеристики, а также описаны технические и программные средства, используемые для ее создания.

Реактор ИГР имеет два режима работы:

- режим неуправляемого изменения мощности;
- режим регулирования мощности в соответствии с заданной диаграммой пуска.

Режим неуправляемого изменения мощности не представляет собой большого интереса в плане его реализации. Он осуществляется посредством ввода положительной реактивности определенной величины, что вызывает экспоненциальное изменение мощности. Рост мощности продолжается до момента, пока значение реактивности не станет равным нулю за счет появления отрицательной реактивности, обусловленной значительным отрицательным коэффициентом реактивности равным $-0,03 \beta/\text{град}$, что приводит впоследствии к снижению мощности при дальнейшем разогреве активной зоны реактора.

Режим неуправляемого изменения мощности не представляет собой большого интереса в плане его реализации. Он осуществляется посредством ввода положительной реактивности определенной величины, что вызывает экспоненциальное изменение мощности. Рост мощности продолжается до момента, пока значение реактивности не станет равным нулю за счет появления отрицательной реактивности, обусловленной значительным отрицательным коэффициентом реактивности равным $-0,03 \beta/\text{град}$, что приводит впоследствии к снижению мощности при дальнейшем разогреве активной зоны реактора.

В данном режиме обеспечивается изменение мощности в виде, представленном на рис. 1. Этот режим мощности условно называется «вспышка». За единицу измерения мощности на ИГР принята 1 условная единица (усл. ед.) – мощность полученная во «вспышке» с начальным скачком реактивности $\rho_0=1,8 \beta$, (1 усл. ед. = 250 МВт).

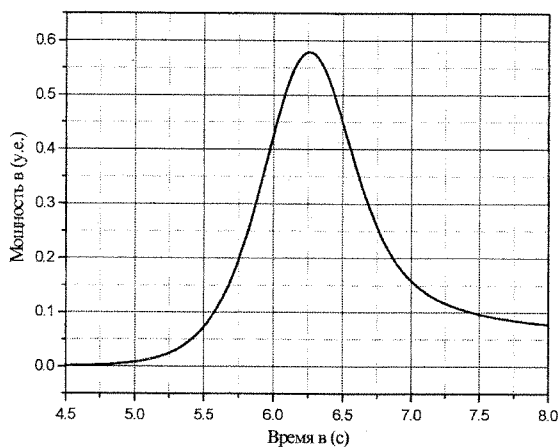


Рис. 1. Изменение мощности во

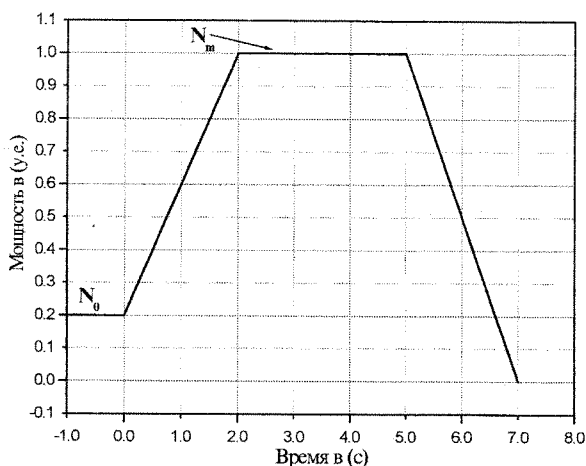


Рис. 2. Диаграмма пуска

Режим неуправляемого изменения мощности рассматривается в настоящей статье по той причине, что он является составляющим элементом при формировании режима пуска регулятора мощности, о котором будет сказано ниже.

Регулируемый режим мощности осуществляется с помощью автоматического регулятора по заранее заданной диаграмме пуска, характер и параметры, которой определяются из условий проведения конкретного эксперимента. Вид стандартной диаграммы пуска приведен на рис. 2, хотя она может иметь и более сложную форму.

Диаграмма пуска, как правило, характеризуется четырьмя основными параметрами:

- начальным значением мощности N_0 , при котором происходит включение регулятора;
- скоростью изменения мощности от начального уровня мощности до стационарного уровня;
- стационарным уровнем мощности N_m , при котором осуществляется поддержание (стабилизация) требуемого уровня мощности;
- снижение мощности с заданным темпом до нулевого значения.

В состав системы автоматического регулирования мощности входят модули, определяющие основное функциональное содержание системы, а именно: подсистема информационного обеспечения, подсистема имитации и регулятор мощности. Структурная схема системы автоматического регулирования мощности реактора ИГР приведена на рис. 3.



Рис. 3. Структурная схема системы автоматического регулирования мощности реактора ИГР

Такое построение системы автоматического регулирования мощности вызвано требованиями, суть которых состоит в том, что система должна обеспечивать регистрацию, отображение и представление экспериментальной информации, имитацию работы объекта управления (реактора ИГР) и регулирование мощности с требуемой точностью. По этой причине состав системы автоматического регулирования мощности определен тремя основными компонентами.

Подсистема имитации является одним из основных элементов системы автоматического регулирования и предназначена для моделирования динамики реактора в целях подготовки регулятора мощности к эксперименту. Она реализована на принципе полунатурного моделирования, т.е. моделируется только основная часть подсистемы (кинетика реактора), а остальные составляющие (в целом имитатор реактивности): следящая система по положению рабочего органа, двигатель, привод рабочего органа (компенсирующего стержня), – имитируют изменение реактивности в зависимости от положения рабочих органов в активной зоне. Структурная схема подсистемы имитации приведена на рис. 4.

Структурная схема подсистемы имитации приведена на рис. 4.

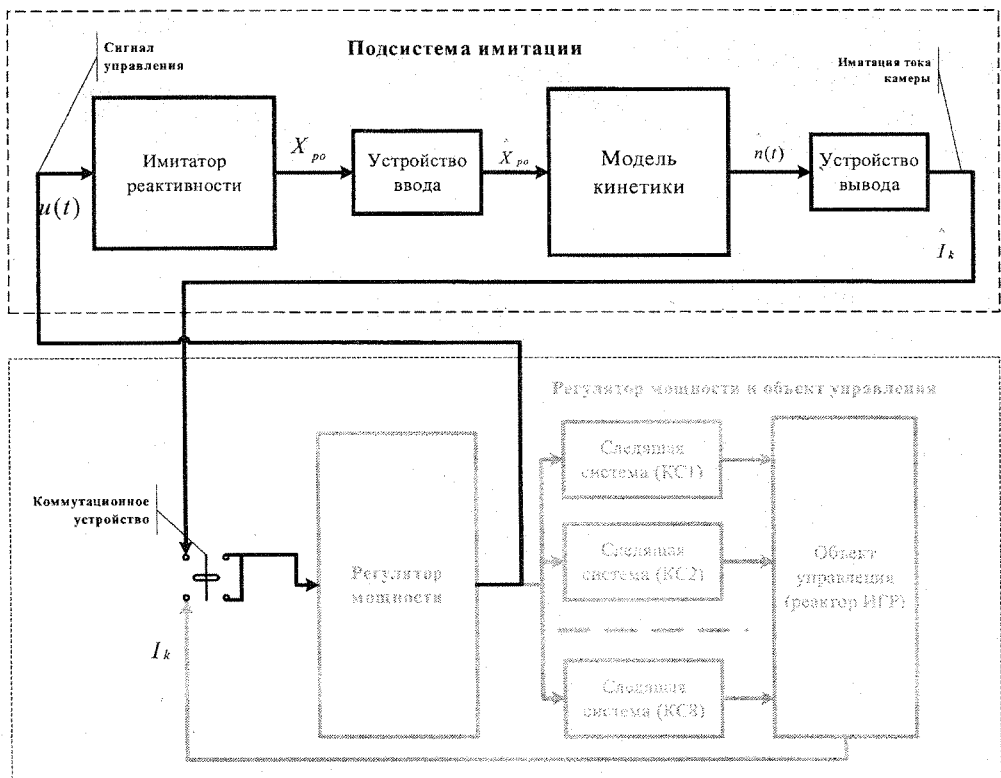


Рис. 4. Структурная схема подсистемы имитации с привязкой к регулятору мощности

Основным элементом подсистемы имитации является модель кинетики, которая моделирует нейтронно-физические процессы, происходящие в активной зоне реактора с учетом температурного коэффициента реактивности и эффективности рабочих органов (компенсирующих стержней).

Основой модели кинетики являются уравнения динамики с шестигрупповым приближением [2,3], которые приведены ниже:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho - 1}{l} \cdot n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot c_i(t) + s; \quad (1)$$

$$\frac{dc_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{l} \cdot n(t) - \lambda_i \cdot c_i(t); \quad (2)$$

$$\rho = \rho_0 + \rho_{p.o} - \rho_T, \quad (3)$$

где $n(t)$ – нейтронная мощность; β_i – i -я доля запаздывающих нейтронов ядер-предшественников; $c_i(t)$ – количество ядер-предшественников i -й группы; l – среднее время жизни нейтронов; s – внешний источник нейтронов; ρ – суммарная реактивность в β , где $\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$; ρ_0 – начальная реактивность, обусловленная положением пусковых стержней в активной зоне реактора; $\rho_{p.o}$ – реактивность рабочего органа; ρ_T – тепловая реактивность, вызванная отрицательным температурным коэффициентом, $\rho_T = f(J_n)$, J_n – интеграл мощности, $J_n = \int n(t) \cdot dt$. На основании представленных выше уравнений разработана структура модели кинетики, которая приведена на рис. 5.

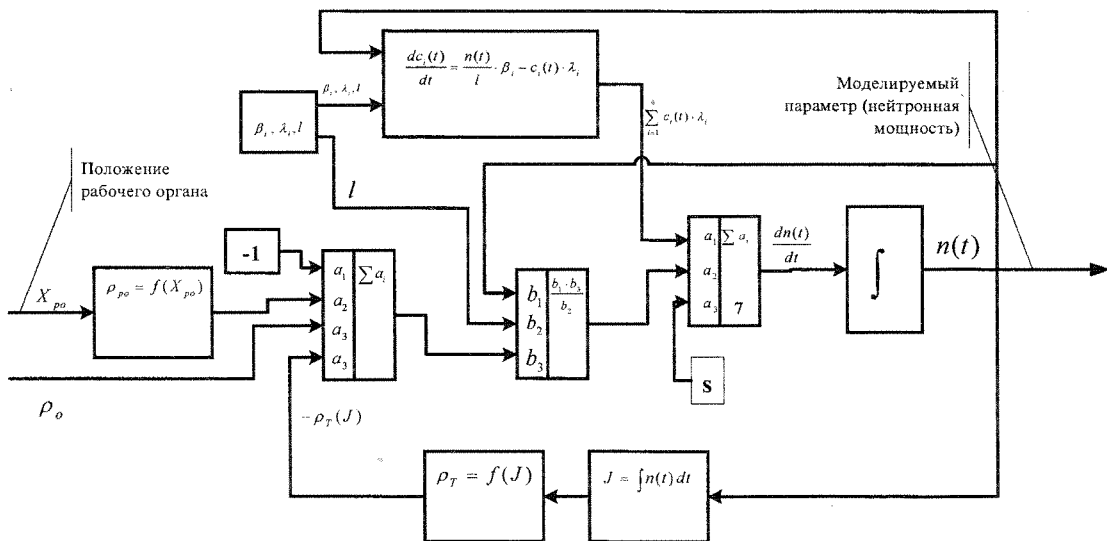


Рис. 5. Структурная схема модели кинетики

Данная структура модели кинетики и в целом подсистема имитации реализованы на основе промышленного компьютера фирмы Advantech и с использованием программного обеспечения LabView [4] фирмы National Instruments. Подсистема имитации обеспечивает моделирование нейтронной мощности в диапазоне от 10^{-2} до 10 усл. ед., при этом погрешность моделирования не превышает 10 %.

Сравнительные результаты модельного и экспериментального пусков приведены на рис. 6 при начальном скачке реактивности $\rho_0 = 1,86 \beta$. При этом погрешность моделирования мощности данного режима не превышает 5 %.

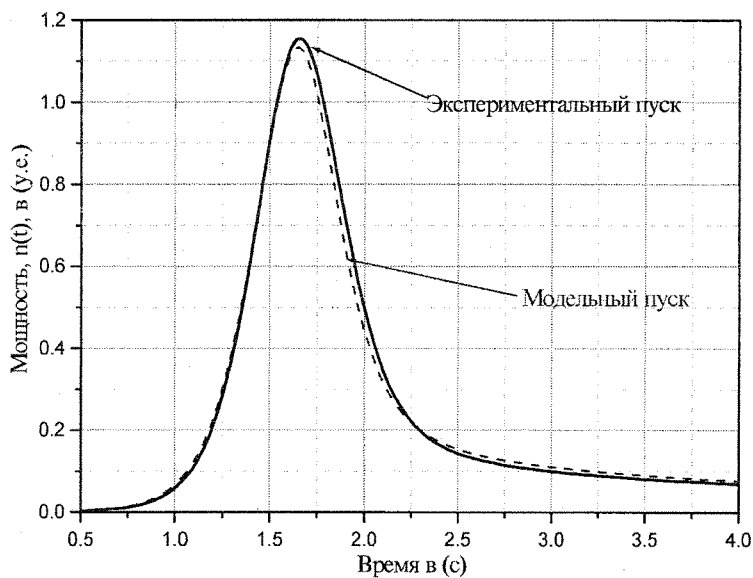


Рис. 6. Графики изменения мощности модельного и экспериментального пусков при $\rho_0 = 1,86 \beta$

Основным элементом системы автоматического регулирования является регулятор мощности, который обеспечивает автоматический переход в режим регулирования и реализацию заданной диаграммы пуска с требуемой точностью. Важным элементом в структуре регулятора мощности является модуль включения, который осуществляет автоматическое включение регулятора в режим автоматического регулирования. Наличие данного модуля в структуре регулятора обусловлено способом его включения (пуска), суть которого состоит в том, что первоначально формируется режим неуправляемого изменения мощности «вспышка» с параметрами, определяемыми конкретной диаграммой пуска. При достижении текущего изменения значения мощности, определяющего момент включения регулятора, происходит его включение. При этом также выполняется условие равенства скорости текущего значения мощности и скорости на начальном участке диаграммы пуска. Более наглядно реализация этого принципа показана на рис. 7.

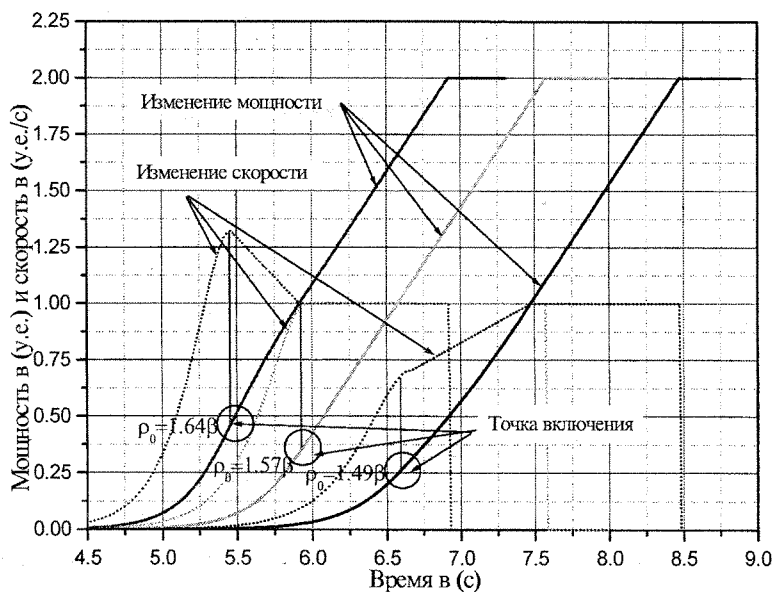


Рис. 7. Варианты включения регулятора мощности

Рассмотрены три случая включения (рис. 7):

1. когда скорость текущего значения мощности больше скорости, определяемой начальным участком диаграммы пуска;
2. когда скорость текущего значения мощности равна скорости, определяемой начальным участком диаграммы пуска;
3. когда скорость текущего значения мощности меньше скорости, определяемой начальным участком диаграммы пуска.

Структурная схема регулятора мощности (рис. 8) состоит из следующих модулей: формирователя диаграммы пуска, модуля включения, модуля нормирования коэффициента передачи регулятора, пропорционального, интегрирующего и двух дифференцирующих звеньев, сумматоров и блока следящих систем рабочих органов, обеспечивающего управление рабочими органами (компенсирующими стержнями), расположенными в активной зоне реактора. В данном регуляторе реализован закон управления ПИДД, который обеспечивает регулирование мощности в требуемом диапазоне ее изменения с соответствующим качеством.

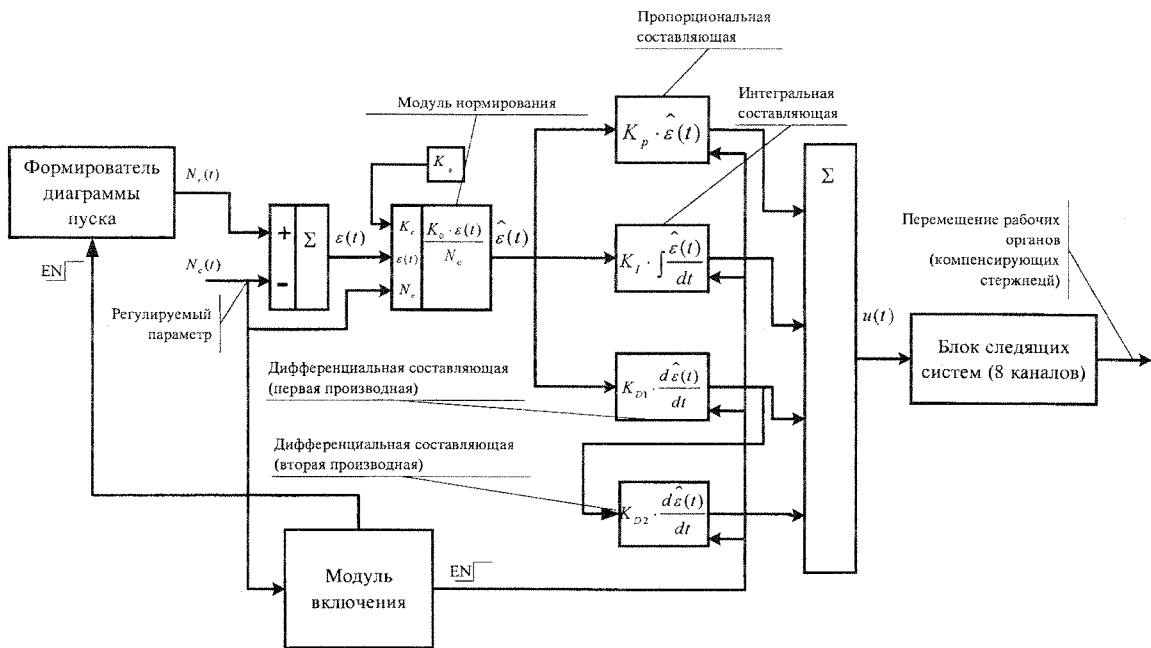


Рис. 8. Структурная схема регулятора мощности

Регулятор конструктивно реализован на базе контроллера типа PCI-7030/6040E [5] фирмы National Instruments, который обеспечивает реализацию выше рассмотренной структуры в реальном масштабе времени. В качестве базового программного обеспечения используется программный продукт фирмы National Instruments Lab-View RT, который работает в среде Windows 9x/NT/2000. Время дискретизации при реализации алгоритма регулирования составляет 10 мс, что вполне достаточно для реализации данной задачи.

Особенностью использования данного контроллера является то, что он обеспечивает реализацию прикладной задачи независимо от работы основного компьютера, что повышает надежность реализации процесса регулирования. Контроллер конструктивно размещен в шасси промышленного компьютера типа IPC-610 фирмы Advantech, в котором также установлены все необходимые компоненты Host компьютера.

Модельные исследования системы автоматического регулирования мощности показали хорошие результаты, которые полностью отвечают требованиям, предъяв-

ляемым к данной системе. Ниже приведены результаты модельных пусков для различных режимов реализации диаграмм мощности, которые в определенной степени характеризуют возможности системы автоматического регулирования.

Подсистема информационного обеспечения в данной статье не рассматривается, так как она имеет вспомогательное назначение в составе системы автоматического регулирования мощности.

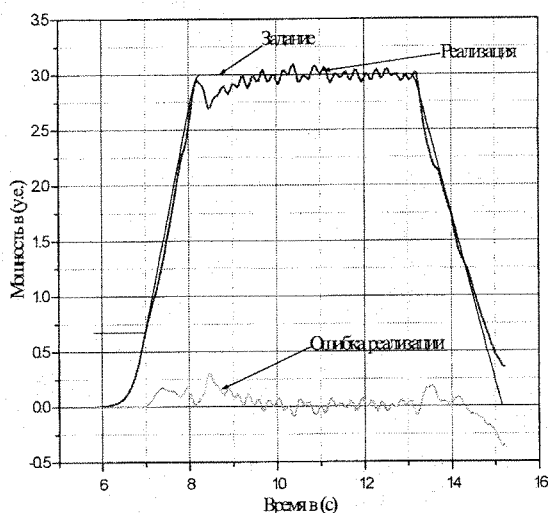


Рис. 9. Диаграмма пуска №1

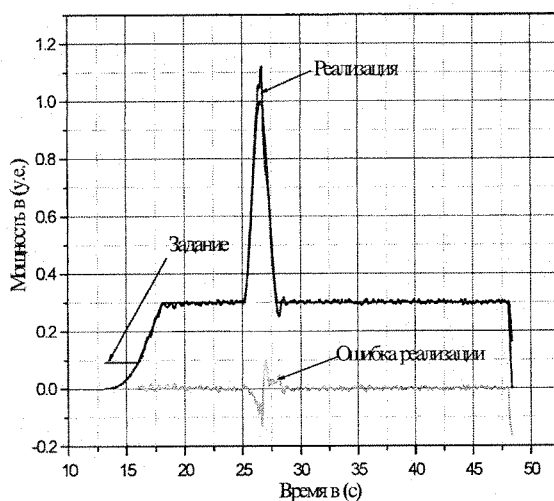


Рис. 10. Диаграмма пуска №2

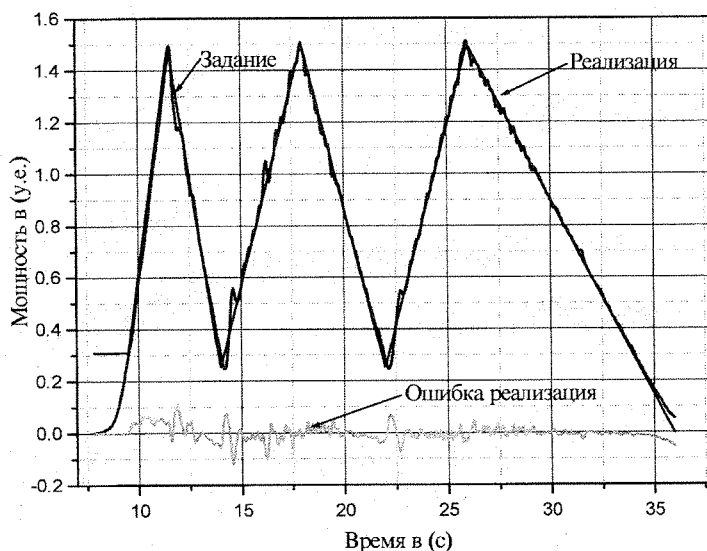


Рис. 11. Диаграмма пуска №3

В целом система автоматического регулирования мощности при данной конфигурации обеспечивает следующие характеристики:

- 1) диапазон регулируемой мощности от 200 кВт до 1000 МВт;
- 2) скорость нарастания изменения мощности от 100 кВт/с до 500 МВт/с.
- 3) погрешность регулирования заданного уровня мощности:
 - в динамическом режиме не более 8 % при скорости нарастания мощности на начальном участке диаграммы пуска не более 500 МВт/с.
 - в стационарном режиме не более 2 % при любом значении мощности;
- 4) вид и форма диаграмм пуска –любой;
- 5) режим включения регулятора – автоматический;
- 6) уровень слежения порога включения равен 1 % от максимального уровня мощности в стационарном режиме.

7) настройка регулятора мощности – автономная;

Рассмотренная в этой статье система автоматического регулирования мощности реактора ИГР является следующим шагом в развитии и совершенствовании технических средств реактора. Данная система существенным образом отличается от существующей, которая в настоящее время пока еще находится в эксплуатации. Основным преимуществом рассмотренной системы является улучшение функциональных характеристик и открытость структуры, обусловленная тем, что алгоритм регулирования и все логические и вспомогательные функции реализованы на программном уровне, что позволяет в дальнейшем проводить модернизацию и совершенствование алгоритмической части системы, не изменяя ее технического содержания, т.е. с минимальными затратами. Это очень важно, особенно для исследовательских стендов и установок, к которым и относится реактор ИГР.

Литература

1. Бать Г.А. и др. Исследовательские ядерные реакторы: Учебное пособие для вузов / Г.А. Бать, А.С. Коченов, Л.П. Кабанов. 2-е изд., пераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. 280 с.
2. Хетрик Д. Динамика ядерных реакторов: Пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1975. 400 с.
3. Rozon D. Nuclear Reactor Kinetics, Polytechnic International Press, 1998. 351 с.
4. LabView, User Manual, National Instruments, January 1998 Edition, Part Number 320999B-01
5. PCI/PXI-7030 and LabView RT User Manual, April 1999 Edition, Part Number 322154A-01

DESIGNING OF IGR REACTOR CONTROL SYSTEM FOR REALIZATION OF TEST DYNAMIC MODES

O.A.Gorbanenko, *Y.M.Kazmin, V.V.Dzalbo

National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan (NNC RK)

**Institute of Atomic Energy NNC RK*

Purpose and the field of IGR reactor usage and the necessity of IGR reactor control system development are described in this article. The description of the structure of IGR reactor control system and its components and the operating algorithms are given. There are also results of the modeling tests and system characteristics.

УДК 537.5: 621.039.6

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ ТЕРМОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ КТМ

В.К. Ясельский, К.И. Байструков, В.М. Павлов, Л.Н. Тихомиров *,
И.Л. Тажибаева *, Е.И. Громаков, А.В. Шарнин, Е.А. Драпико

Томский политехнический университет,

**Национальный ядерный центр Республики Казахстан*

Основным назначением термоядерной материаловедческой установки – токамака КТМ – является исследование взаимодействий плазма–стенка вакуумной камеры, плазма–пластины дивертора, плазма–лимитер при воздействии потоков энергии от 0,1 до 20 МВт/м² в широком диапазоне экспозиций и поведения испытуемых материалов в условиях воздействия на них мощных корпускулярных и тепловых потоков, а также переменных и постоянных электрических и магнитных полей, возникающих в процессе плазменных разрядов. Причем величина этих воздействий должна быть близка к ожидаемой в первом энергетическом реакторе ITER, чтобы можно было сделать вывод о применимости исследуемых материалов для изготовления