На правах рукописи

ГОРБАНЕНКО Олег Анатольевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

(Применительно к реакторному комплексу ИГР)

/05.13.06 –автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отрасли - атомная промышленность)/

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск – 2005

Работа выполнена в Республиканском государственном предприятии «Национальный ядерный центр Республики Казахстан» (РГП НЯЦ РК).

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент Дядик В.Ф.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Кербель Б. М

кандидат технических наук, доцент Громаков Е.И.

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежаля».

Защита состоится 27 декабря 2005 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета ДС 212.025.03 при Томском политехническом университете по адресу: 634034 г. Томск, пр. Ленина, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан 16 ноября 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат химических наук, доцент И.И. Жерин

Общая характеристика работы.

Актуальность работы. Испытания и экспериментальные исследования новых материалов, опытных образцов изделий, оборудования и техники являются заключительным этапом, определяющим дальнейшую судьбу разработок. Осуществление данной деятельности без применения специальных технических средств, позволяющих автоматизировать процесс испытаний и исследований, где участие человека ограничено, а важность и ответственность в успешной реализации научных экспериментов велика, не представляется возможным. Особенно это актуально в области атомной науки и техники при проведении комплексных испытаний и исследований материалов и элементов конструкций реакторов различного назначения.

Основу экспериментальной базы проведения испытаний и исследований в области атомной науки и техники составляют исследовательские ядерные реакторы. Одним из представителей этого класса реакторов является импульсный уран-графитовый реактор (реактор ИГР), который имеет лучшие нейтронно-физические характеристики среди реакторов своего класса.

Эффективность проведения экспериментов на базе исследовательского реактора зависит не только от его характеристик и параметров, а также и от технического оснащения экспериментальной базы реактора, к которой относятся системы измерения, обработки и отображения экспериментальной информации, системы управления технологическими устройствами и агрегатами реактора, системы управления и защиты реактора и т.д.

Важное место в составе технических средств обеспечения реакторных экспериментальных исследований и испытаний занимает система автоматического регулирования мощности (система АРМ), от эффективности и надежности которой зависит не только судьба дорогостоящего эксперимента, но и безаварийная эксплуатация реакторной установки.

Принимая во внимание тот факт, что длительность реакторного эксперимента (РЭ), проводимого на реакторе ИГР, составляет единицы секунд, а погрешность поддержания заданного уровня мощности не должна превышать (1÷2) % от задания, то альтернативы автоматическому регулированию мощности реактора ИГР не существует.

Необходимость развития экспериментальной базы «Комплекса исследовательский реактор ИГР» (далее по тексту – реакторный комплекс ИГР) также обусловлена и другими обстоятельствами, к которым можно отнести решение следующих задач:

1. Расширение спектра исследовательских и экспериментальных программ,

реализуемых на базе реакторного комплекса ИГР.

2. Проведение сложных и ответственных испытаний материалов и элементов конструкций реакторной техники.

3. Реализация комплекса исследовательских программ, связанных с изучением динамики импульсного реактора при «импульсном» изменении нейтронной мощности в активной зоне реактора.

4. Изучение и исследование различных аспектов, связанных с безопасностью быстрых реакторов.

Решению вышеизложенных задач и посвящена данная работа.

Целью настоящей диссертационной работы является проработка теоретических и практических аспектов проектирования системы АРМ импульсного ядерного реактора, применительно к реакторному комплексу ИГР, разработка и создание надежной системы АРМ реактора ИГР, а также моделирование, исследование и анализ аварийных ситуаций, которые могут иметь место при работе реактора ИГР в режиме автоматического регулирования мощности.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Исследование динамических характеристик реактора ИГР на модели применительно к синтезу АРМ в пределах рабочего диапазона регулирования мощности реактора.

2. Синтез адаптивного алгоритма регулирования мощности реактора ИГР.

3. Синтез алгоритмов включения и коррекции отклонений параметров «пусковой» мощности – вспышки относительно расчетных значений.

4. Разработка структуры АРМ и исследование параметров настройки в зависимости от режима работы реактора.

5. Синтез структуры системы АРМ реактора ИГР, разработка опытного образца, обоснование и выбор программно-технических средств (ПТС) реализации.

7. Проведение комплексных модельных исследований опытного образца системы АРМ реактора ИГР.

8. Проведение производственных испытаний системы АРМ реактора ИГР.

Научная новизна. Основные научные достижения работы следующие:

1. Результаты исследований реактора ИГР на имитационной модели (ИМ) позволили выявить его наиболее характерную и существенную характеристику – зависимость динамических параметров модели реактора от нейтронной мощности.

2. Впервые разработан и применен в практике алгоритм регулирования мощности реактора ИГР с параметрической адаптацией.

3. Разработаны алгоритмы автоматического включения АРМ, исключающие зависимость качества реализации диаграммы пуска (ДП) от начальных параметров «пусковой» мощности – вспышки.

4. Разработаны и впервые использованы в практике алгоритмы коррекции от-

клонений параметров «пусковой» мощности от расчетного значения.

5. Впервые применен метод непрерывного преобразования регулируемого параметра во всем диапазоне регулирования мощности для реактора ИГР.

6. Разработан и реализован в структуре АРМ принцип непрерывного контроля процесса регулирования, что повысило безопасность проведения РЭ в режиме автоматического регулирования мощности реактора.

Практическая ценность. Применение адаптивного алгоритма регулирования позволило повысить качество реализации РЭ, сократить сроки на подготовку системы АРМ реактора ИГР к эксперименту и повысить надежность проведения исследований на реакторе в режиме автоматического регулирования мощности.

Наличие в структуре АРМ функции автоматического включения и коррекции отклонения «пусковой» вспышки от расчетного значения позволило исключить срыв РЭ по причине ее несоответствия требуемым (расчетным) параметрам.

Результаты работы были использованы для создания системы АРМ реактора ИГР, которая была внедрена в составе СУЗ реакторного комплекса ИГР.

Апробация результатов работы и публикации.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на Всероссийской научной конференции (г. Москва, 2002) «Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB», Международной научной конференции (г. Томск, 2002) «Проблемы и перспективы технологий атомной промышленности» и научных семинарах.

Результаты диссертации опубликованы в четырех научно-технических изданиях, защищены тремя авторскими свидетельствами. Отдельные результаты теоретических и экспериментальных исследований отражены в научно-технических отчетах и материалах опытно-конструкторских работ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 175 страницах машинописного текста, иллюстрируется 114 рисунками и 25 таблицами и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 131 наименований и 4 приложений.

Основные научные положения, представляемые к защите.

На защиту выносятся:

1. Модельные исследования динамических характеристик реактора ИГР в частотной области, позволившие получить обобщенную модель реактора, отражающую основную особенность – зависимость динамических параметров модели реактора ИГР от нейтронной мощности.

2. Адаптивный алгоритм регулирования мощности реактора ИГР, позволивший реализовать систему регулирования мощности (АРМ) реактора, обеспечивающую реализацию реакторных экспериментов с заданным качеством.

3. Алгоритмы автоматического включения АРМ и коррекции отклонений па-

раметров «пусковой» вспышки относительно расчетного (оптимального) значения.

4. Алгоритмы настройки АРМ в зависимости от режима работы реактора ИГР и качества реализации диаграммы пуска.

5. Структура опытного образца системы АРМ и комплексный анализ результатов экспериментальных исследований опытного образца системы АРМ реактора ИГР.

Содержание работы.

Глава 1. В данной главе приведены: назначение, конструктивные особенности и характеристики реактора ИГР, область применения в научной и экспериментальной практике. Особое внимание уделено исследованию динамических характеристик реактора ИГР на модели в частотной области применительно к синтезу АРМ.

Особенностью реактора ИГР являются его режимы работы: режим самогасящегося (нерегулируемого) изменения мощности (вспышка) и режим изменения мощности в соответствии с заранее заданной диаграммой пуска (ДП) – регулируемый режим.

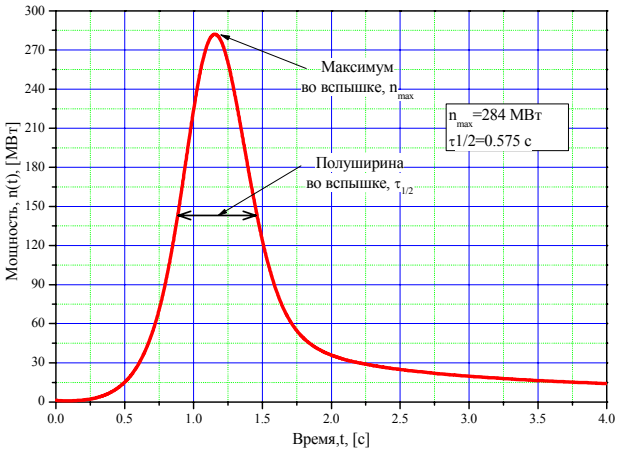


Рис. 1. Изменение мощности в режиме вспышки при $\rho_o = 1,86\,\beta_{эф}$

Иллюстрация режима вспышки приведена на рис. 1. Параметры вспышки, в основном, определяются величиной начальной реактивности ρ_o, к которым относятся: максимальная мощность $n_{\max}$, полуширина $\tau_{1/2}$, интеграл мощности $J_n(t)$ во вспышке и т.д.

Регулируемый режим начинается со вспышки, с последующим переходом к реализации ДП. Типовой вид ДП приведен на рис. 2.

Структура регулирующего устройства и, в частности, АРМ определяется характеристиками объекта управления (ОУ), а также техническими требованиями, предъявляемыми к проектируемой системе регулирования. Получение необходимой информации об ОУ (реактор ИГР) на основе экспериментальных исследований динамических характеристик непосредственно на реакторе затруднительно, а в большинстве случаев не представляется возможным по ряду причин, одной из которых является повышенная ядерная опасность объекта исследования. Решением этой проблемы является использование специальных программно-технических средств, обеспечивающих замещение объекта исследования его «виртуальным» образом – моделью.

В данной работе автором рассматривается современный подход к исследованиям динамических характеристик реактора ИГР на основе имитационной модели (ИМ), что стало возможным благодаря появлению специальных программных и технических средств моделирования сложных динамических объектов.

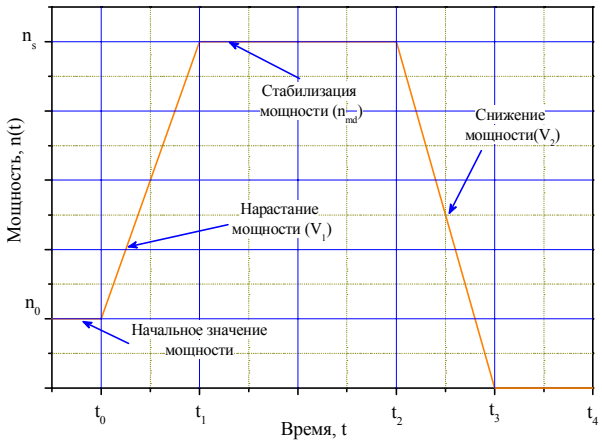


Рис. 2. Типовой вид диаграммы пуска

Основой любой ИМ является математическая модель, представляющая собой, как правило, систему дифференциальных/алгебраических уравнений, отражающих наиболее важные и существенные характеристики моделируемого объекта или системы.

Основным параметром, подлежащим моделированию при исследовании характеристик реактора ИГР, является нейтронная мощность реактора с учетом влияния отрицательного температурного эффекта реактивности, вызванного тем, что активная зона (АЗ) реактора не охлаждается и температура АЗ изменяется в пределах: от 300 до 1300 К.

Математическая модель реактора ИГР, описывающая изменение нейтронной мощности в АЗ реактора в точечном приближении с учетом температурного коэффициента реактивности (ТКР), представлена следующими уравнениями:

$$\frac{dn(t)}{dt} = n(0) + \frac{\rho - 1}{l} \cdot n(t) + \sum_{i=1}^{6} \lambda_i \cdot c_i(t) + q \qquad (1)$$

$$\frac{dc_i(t)}{dt} = c_i(0) + \frac{\beta_i}{l} n(t) - \lambda_i \cdot c_i(t) \qquad (2)$$

$$\rho = \rho_o - \rho_{\text{ткр}} \qquad (3)$$

где q – источник нейтронов; $n(t)$ – нейтронная мощность реактора; $n(0)$ – начальное значение мощности при $t = 0$; ρ – суммарная реактивность, $\rho = (k_{эф} - 1)/(k_{эф}\beta_{эф})$; λ_i – постоянная распада i-группы запаздывающих нейтронов; l – среднее время генерации нейтронов, приведенное к $\beta_{эф}$, $l = l_o / \beta_{эф}$; β_i – выход i-группы запаздывающих нейтронов; c_i – концентрация i-группы запаздывающих нейтронов; $c_i(0)$ – концентрация i-группы запаздывающих нейтронов при $t = 0$; $\rho_{\text{ткр}}$ – реактивность, обусловленная изменением температуры активной зоны реактора, $\rho_{\text{ткр}} = J_n(t) \cdot \alpha_{\text{ткр}}(J_n)$; $\alpha_{\text{ткр}}(J_n)$ – ТКР, выраженный через интеграл мощности J_n; ρ_0 – начальный скачок реактивности.

Приведенная выше математическая модель кинетики реактора была реализована в среде программного пакета MatLab/Simulink.

Верификация ИМ относительно реакторных пусков показала, что погрешность моделирования вспышки в диапазоне от 100 до 1000 МВт составляет не более 10%. При мощности ниже 100 МВт погрешность моделирования увеличивается до 20%, но это не влияет на качество синтеза АРМ, так как наиболее динамичный диапазон регулирования мощности находится в пределах от 300 до 1000 МВт. На рис. 3 приведена иллюстрация сравнительного анализа модельного и экспериментального пусков.

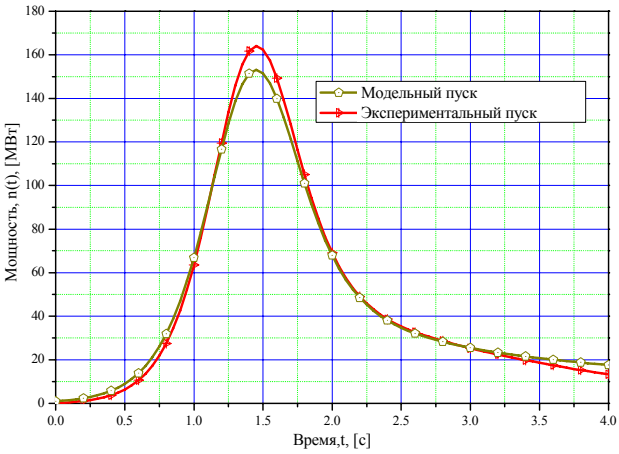


Рис. 3. Сравнительный анализ модельного и экспериментального пусков при $\rho_0 = 1,62\beta_{эф}$

Основным направлением модельных исследований являлось изучение характеристик реактора в частотной области на ИМ с целью определения зависимости динамических параметров модели реактора от мощности. С этой целью были проведены модельные исследования реактора на уровнях мощности: 0,05; 0,1; 1; 10; 50; 100; 500; 1000 и 2000 МВт, соответственно. Диапазон исследуемых уровней мощности реактора перекрывает рабочий диапазон работы АРМ, который находится в пределах от 1 до 1000 МВт.

В результате модельных исследований характеристик реактора в частотной области с использованием метода линеаризации, было получено семейство логарифмических амплитудных и фазовых частотных характеристик (ЛАЧХ и ЛФЧХ) для каждого уровня мощности. Результаты исследований приведены на рис. 4.

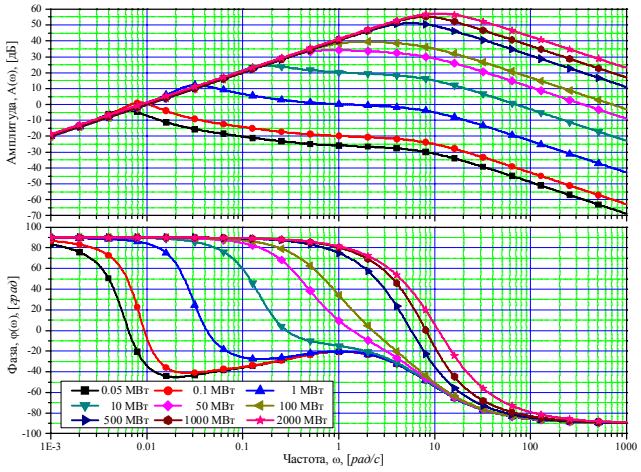


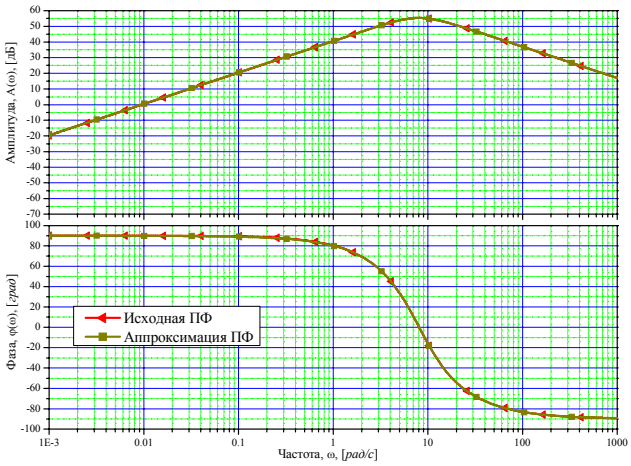
Рис. 4. ЛАЧХ и ЛФЧХ модели кинетики реактора ИГР при различных уровнях мощности

Из приведенных результатов видно, что реактор ведет себя в области низких частот как дифференцирующее звено, а в области верхних частот как интегрирующее звено.

Аналитически результаты модельных исследований представлены в виде передаточной функции (ПФ) для каждого исследуемого значения мощности. Пример аналитического представления результатов модельных исследований для уровня мощности 1000 МВт приведен ниже:

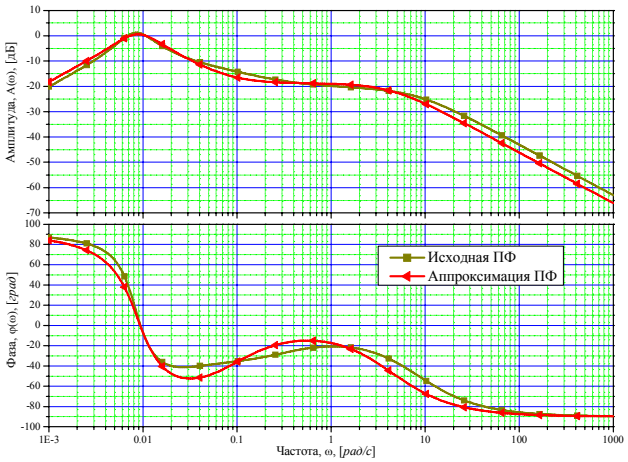
$$W_{\text{игр}}^{1000}(s)=\frac{7098\ s^7+3{,}268e4\ s^6+3{,}808e4\ s^5+1{,}26e4\ s^4+\ldots}{s^8+16{,}76\ s^7+126{,}7\ s^6+372{,}1\ s^5+381{,}7\ s^4+122{,}5\ s^3+\ldots}$$
$$\frac{+1302\ s^3+39{,}15\ s^2+0{,}3084\ s}{+12{,}55\ s^2+0{,}3767\ s+0{,}002966} \qquad (4)$$

Выражение (4) является достаточно громоздким для проведения дальнейшего анализа с целью синтеза алгоритма регулирования мощности. Следовательно, дальнейшие исследования характеристик реактора были направлены на поиск более простой формы описания динамики реактора, но достаточной для решения задачи синтеза АРМ. В результате этих исследований было показано, что исходную модель реактора можно представить ПФ (моделью) третьего порядка. На рис. 5 и 6 приведены иллюстрации сравнительного анализа результатов аппроксимации исходной



$$W_{\text{игр}}^{\text{ап}}(s)=\frac{105{,}6\ s\ (0{,}485s+1)}{(0{,}466s+1)(0{,}0154s^2+0{,}186s+1)}$$

Рис. 5. ЛАЧХ и ЛФЧХ исходной и аппроксимируемой ПФ при уровне мощности 1000 МВт



$$W_{\text{игр}}^{\text{ап}}(s)=\frac{122{,}2\ s\ (12s+1)}{(0{,}23s+1)(1{,}27e4\ s^2+115{,}2\ s+1)}$$

Рис. 6. ЛАЧХ и ЛФЧХ исходной и аппроксимируемой ПФ при уровне мощности 0,1 МВт

ПФ реактора ИГР передаточной функцией третьего порядка для уровней мощности 1000 и 0,1 МВт, соответственно.

Полученное новое описание модели реактора ИГР было представлено в виде последовательно соединенных элементарных звеньев вида:

$$W_1(s)=T_1 s \qquad (5)$$

$$W_2(s)=\frac{T_3 s+1}{T_2 s+1} \qquad (6)$$

$$W_3(s)=\frac{1}{T_4^2 s^2+2\zeta T_4 s+1} \qquad (7)$$

где T_1, T_2, T_3 и T_4 – постоянные времени ПФ $W_1(s), W_2(s)$ и $W_3(s)$, соответственно, при этом $W_{\text{игр}}(s)=W_1(s)\cdot W_2(s)\cdot W_3(s)$; ζ – декремент затухания.

При дальнейших исследованиях параметров T_1, T_2, T_3, T_4 и ζ, представленных в выражениях (5), (6) и (7) в зависимости от уровня мощности реактора, было получено следующее:

$$\overline{T}_1 = \left(\sum_{i=1}^{k} T_{1i} \right) / k = 116{,}22\,; \tag{8}$$

$$\overline{T}_2 = \left(\sum_{i=1}^{k} T_{2i} \right) / k = 0{,}27\,; \tag{9}$$

$$\overline{T}_3 = \frac{5{,}0683}{n^{0{,}341}}\,; \tag{10}$$

$$\overline{T}_4 = \frac{23{,}33}{n^{0{,}729}}\,, \tag{11}$$

где k – количество результатов исследований (в данном случае, k=9).

Декремент затухания не имеет явной зависимости от уровня мощности и его значение в исследуемом диапазоне мощностей изменяется незначительно. В данном случае его значение принято равным $\overline{\zeta}$=0,72.

В результате проведенных исследований впервые была получена обобщенная модель реактора ИГР, которая имеет следующий вид:

$$\overline{W}_{\text{игр}}(s) = \left(\frac{\dfrac{5{,}0683}{n^{0{,}341}} s + 1}{0{,}27 s + 1} \right) \cdot \left(\frac{116{,}22\, s}{\left(\dfrac{23{,}33}{n^{0{,}729}} \right)^2 s^2 + \left(\dfrac{16{,}8}{n^{0{,}729}} \right) s + 1} \right) \tag{12}$$

Сравнительный анализ данной модели (12) относительно исходной (4) и аппроксимируемой моделей приведен на рис. 7 и 8 для уровней мощности 1000 и 0,1 МВт, соответственно.

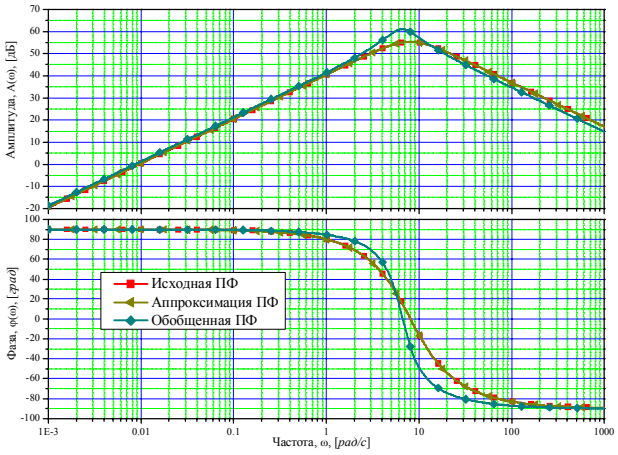


Рис.7. ЛАЧХ и ЛФЧХ исходной, аппроксимируемой и обобщенной моделей реактора при уровне мощности 1000 МВт

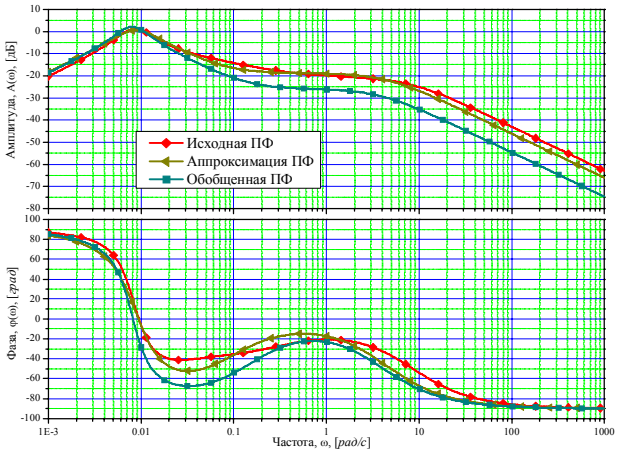


Рис.8. ЛАЧХ и ЛФЧХ исходной, аппроксимируемой и обобщенной моделей реактора при уровне мощности 0,1 МВт

Применение обобщенной модели реактора на начальном этапе синтеза АРМ является наиболее рациональным с точки зрения проведения эскизного проектирования системы: синтеза алгоритма регулирования мощности и структуры АРМ; выбора параметров настройки регулятора и т.д.

Выражение (12) отражает существенную особенность модели реактора ИГР, которая выражается зависимостью динамических параметров модели реактора от нейтронной мощности.

Глава 2. Основное содержание данной главы посвящено синтезу алгоритма регулирования мощности реактора ИГР, разработке структуры и алгоритмов «Пуска/включения» АРМ, исследованию его параметров настроек в зависимости от режима работы ОУ и качества реализации ДП на модели.

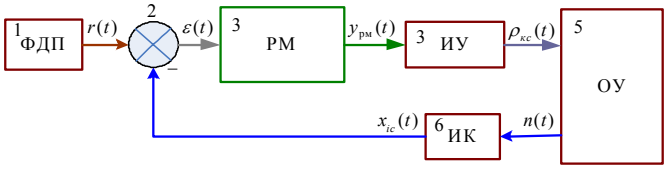


Рис. 9. Структура автоматического регулятора мощности

1 – формирователь ДП (ФДП); 2 – сумматор; 3 – регулятор мощности (РМ); 4 – исполнительное устройство (ИУ); 5 – объект управления (ОУ) /реактор ИГР/; 6 – датчик нейтронного потока (ИК); $r(t)$ – сигнал задания; $\varepsilon(t)$ – сигнал рассогласования (ошибка); $y_{рм}(t)$ – сигнал управления ИУ; $\rho_{кс}(t)$ – сигнал управления ОУ (величина реактивности КС); $x_{ic}(t)$ – сигнал с выхода ионизационной камеры; $n(t)$ – нейтронная мощность.

Структура АРМ (рис. 9) представляет собой классический вариант системы регулирования с обратной связью по отклонению регулируемого параметра относительно задания, которым является ДП. Одной из особенностей данной структуры АРМ является исполнительное устройство (ИУ), состоящее из восьми независимых каналов регулирования положения компенсирующих стрежней (КС). Каждый канал регулирования положения КС состоит из регулятора положения КС, регулятора скорости вращения вала исполнительного двигателя (ИД) и редуктора с червячной передачей, осуществляющего преобразование вращательного движения вала ИД в поступательное перемещение рейки, к концу которой прикреплен КС.

ИУ имеет два режима работы: позиционирование КС, которое выполняется перед началом проведения РЭ, и перемещение КС в зависимости от вида управляющего сигнала, поступающего с выхода РМ. Исполнительное устройство относится к неизменной части АРМ, за исключением устройства управления ИД, которое в дальнейшем было модернизировано с целью достижения оптимального управления по скорости перемещения КС с учетом динамических параметров неизменной части ИУ, к которой относятся: исполнительный двигатель; редуктор; компенсирующий стержень.

Следовательно, синтез алгоритма регулятора мощности рассматривался относительно объекта управления, состоящего из ИУ, работающего в режиме регулятора скорости ИД, и реактора ИГР (12), параметры которого были определены в главе 1.

Аналитическое описание ИУ в виде ПФ в режиме регулирования скорости ИД, полученное в результате экспериментальных исследований, имеет следующий вид:

$$W_{\text{рс}}^{\text{иу}}(s) = \frac{(0{,}0105s+1)\cdot 31{,}4}{0{,}008396s^2+0{,}2268s+1}\cdot e^{-0{,}04s}. \qquad (13)$$

В результате проведенной работы автором был разработан алгоритм регулирования с контуром адаптации по параметру $1/n$, аналитическое выражение которого имеет следующий вид:

$$W_{\text{рм}}(s) = K_P\cdot\left(1+\frac{1}{T_I s}+\frac{T_{D1}\dfrac{g_{T_D}}{n}s}{T_N s+1}+\frac{T_{D2}\dfrac{g^2_{T_D}}{n}s^2}{T_N s+1}\right)\cdot\left(\frac{T_1 s+1}{\dfrac{T_2}{n}s+1}\right), \qquad (14)$$

где n – регулируемый параметр (нейтронная мощность); K_P – коэффициент передачи пропорционального звена; T_I – постоянная времени интегрирования и $K_I = 1/T_I$ – коэффициент передачи интегратора; T_{D1} – постоянная времени дифференцирующего звена первого порядка (первая производная); T_{D2} – постоянная времени дифференцирующего звена второго порядка (вторая производная).

На основании синтезированного алгоритма регулирования мощности (14) была разработана функциональная схема РМ, которая приведена на рис. 10. Полученный алгоритм регулирования мощности приближенно можно представить в виде ПИДД структуры, хотя он несколько сложнее, так как в состав данного алгоритма входят еще два звена: демпфирующее и форсирующее. Следующим этапом синтеза АРМ являлась разработка алгоритма «запуска/включения» АРМ.

Данная задача обусловлена тем, что регулируемый режим мощности начинается с формирования вспышки с параметрами, которые определяются параметрами предстоящего реакторного эксперимента и зависят от величины начальной реактивности ρ_0, значение которой определяется рядом факторов: калибровкой пусковых стержней, температурой АЗ реактора и т.д.

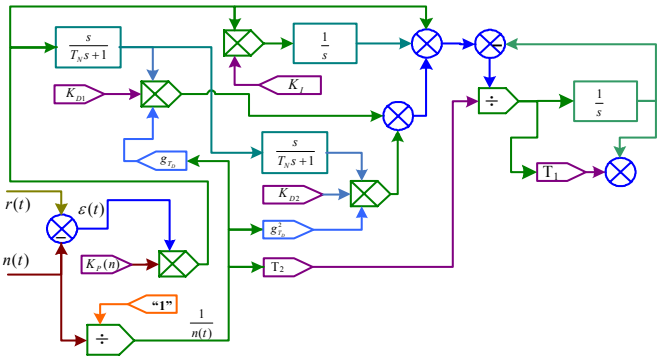


Рис. 10. Функциональная схема регулятора мощности

$r(t)$ – задание (ДП); $n(t)$ – регулируемый параметр; $\varepsilon(t)$ – рассогласование; $y_{\text{рм}}(t)$ – выходной сигнал управления; K_{D1} – коэффициент передачи дифференциатора, 1-ая производная ($K_{D1} = 1/T_{D1}$); K_{D2} – коэффициент передачи дифференциатора, 2-ая производная ($K_{D2} = 1/T_{D2}$).

В работе был предложен алгоритм включения АРМ, основанный на реализации следующих условий:

1) если темп нарастания мощности на начальном участке ДП выше (50÷100) МВт/с и уровень стабилизации мощности превышает 100 МВт, то включение АРМ осуществляется по условию: скорость изменения мощности во вспышке равна скорости изменения мощности на начальном участке ДП (способ включения по скорости);

2) если рассмотренное выше условие не выполняется, то включение регулятора осуществляется, когда максимальная величина мощности во вспышке равна значению уровня мощности стабилизации ДП.

Иллюстрация первого способа (Способ А) включения приведена на рис. 11, который является идеализированным вариантом реализации включения АРМ. В действительности на практике достаточно сложно обеспечить такое условие. Для компенсации отклонений параметров вспышки от расчетного значения был разработан алгоритм коррекции по скорости.

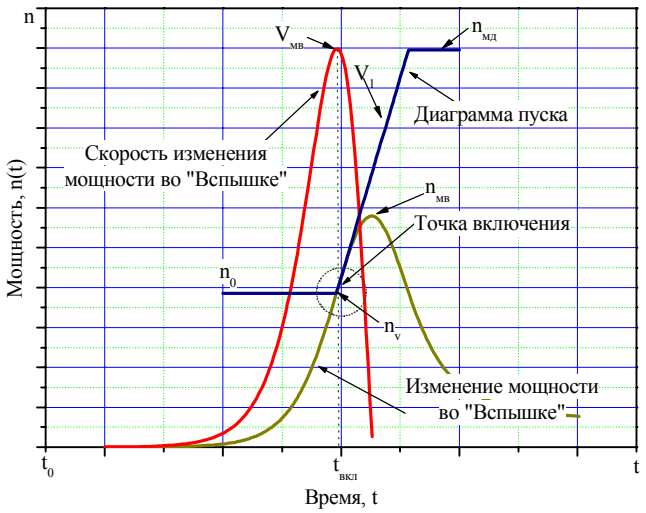


Рис. 11. Иллюстрация реализации способа А включения регулятора

$V_{мв}$ – максимальное значение темпа изменения мощности во вспышке; n_0 – начальное значение мощности ДП; V_1 – значение темпа изменения мощности на начальном участке ДП; $n_{мд}$ –максимальное значение мощности на «полке» ДП; $n_{мв}$ – максимальное значение мощности во вспышке; n_v – значение мощности во вспышке в точке экстремума.

Отклонение скорости во вспышке компенсировалось введением дополнительного участка в ДП, реализуемого в виде полинома:

$$n_i(t) = a + b \cdot t + c \cdot t^2, \tag{15}$$

где $n_i(t)$ – текущее значение мощности; a, b, c – коэффициенты полинома; t – текущее время.

Значения коэффициентов полинома (15) определяются из граничных условий: при t=0 и t=t_k, где t_k – момент времени, при котором $n_i(t)_{t=t_k} = n_0$ и $\left.\dfrac{dn_i(t)}{dt}\right|_{t=t_k} = V_1$.

Иллюстрации реализации алгоритма компенсации по скорости (Способ А) приведены на рис. 12 и 13, соответственно, при различных значениях ρ_0.

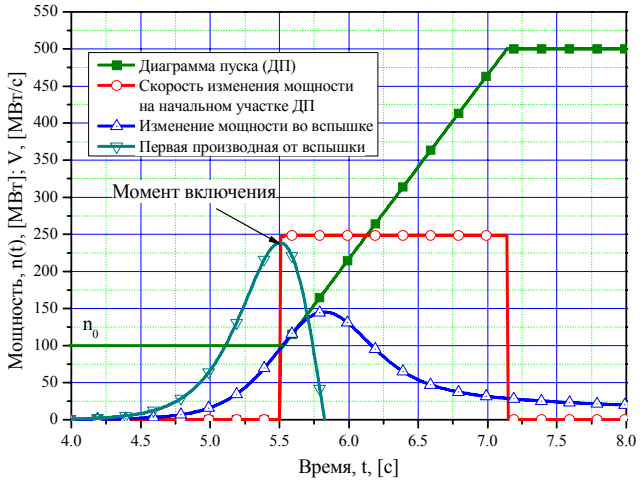


Рис. 12. Реализация режима включения регулятора при $\rho_0 = 1{,}58\,\beta_{эф}$, (оптимальное условие)

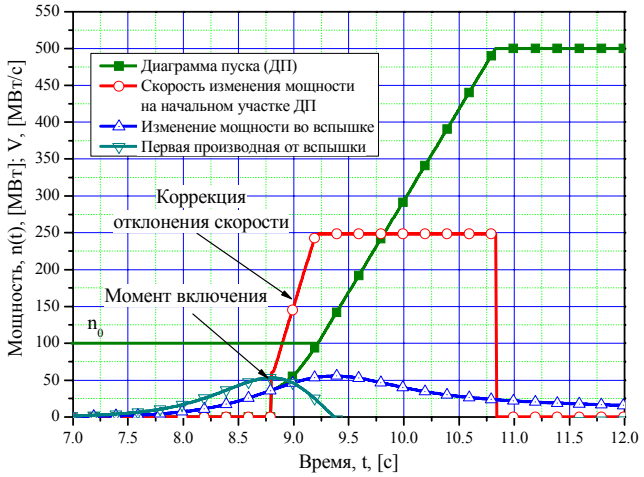


Рис. 13. Реализация режима включения регулятора при $\rho_0 = 1.29\,\beta_{эф}$, (неоптимальное условие)

Модификацией вышеизложенного способа включения является Способ $А_м$, при котором начальное значение n_0 ДП равно уровню мощности стабилизации $n_{мд}$ ДП, что позволяет упростить режим включения РМ, когда не требуется точная реализация темпа изменения мощности на начальном участке ДП. В этом случае, отклонение параметров «пусковой» вспышки может быть в два-три раза относительно параметров вспышки при использовании Способа А включения АРМ.

Принцип реализации включения АРМ по условию равенства максимальной мощности во вспышке уровню стабилизации ДП приведен на рис. 14 (Способ В).

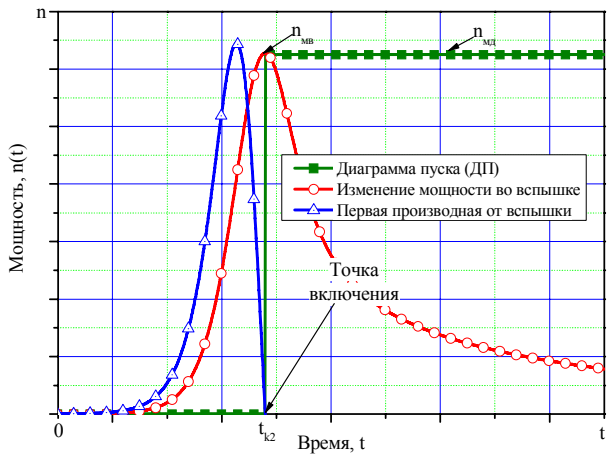


Рис. 14. Иллюстрация Способа В включения регулятора

Этот принцип включения наиболее приемлем при реализации ДП с малым уровнем мощности стабилизации (ниже 100 МВт). Для компенсации отклонения параметров вспышки от расчетного значения используется корректирующий полином вида:

$$n_i(t) = a_2 + b_2 \cdot t\,, \tag{16}$$

где a_2 и b_2 – коэффициенты полинома.

Значения коэффициентов полинома определяются из граничных условий: при t=0 и t=t_{k2}, где t_{k2}– время, при котором выполняется условие $n_i(t)_{t=t_{k2}} = n_{мд}$. В этом случае, коэффициент a_2 определяется из начальных условий $n_i(t)_{t=0} = n_{мв}$, т.е.

$a_2 = n_{мв}$; $b_2 = k \cdot n_{мв}$, где k – множитель, принятый равным $k = 0{,}1$.

Иллюстрации реализации алгоритма по уровню (Способ В) приведены на рис. 15 и 16, при отклонении ρ_0 на (минус) $0{,}1\beta_{эф}$ и $0{,}1\beta_{эф}$ относительно расчетного значения ρ_0 ($1{,}325\beta_{эф}$), соответственно.

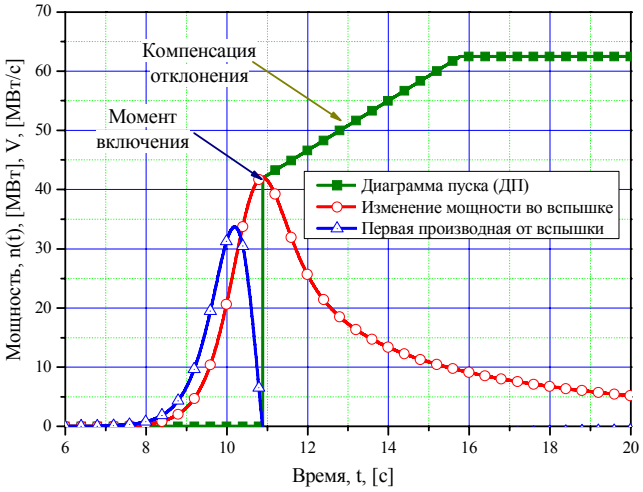


Рис. 15. Реализация режима включения регулятора при отклонении ρ_0 от расчетной величины на (минус) $0{,}1\beta_{эф}$, Способ В

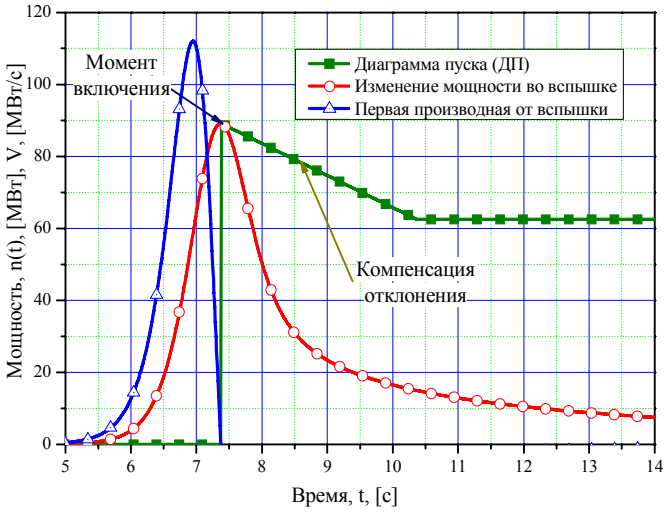


Рис. 16. Реализация режима включения регулятора при отклонении ρ_0 от расчетной величины на $0{,}1\beta_{эф}$, Способ В

Анализ алгоритмов включений АРМ показал, что их применение позволяет обеспечить устойчивое включение АРМ при отклонении ρ_0 в пределах (8÷15) % от расчетного значения, при этом перерегулирование в момент включения не превышает (5÷10)%.

В работе также приведено описание алгоритма формирования ДП, который является составной частью устройства включения АРМ.

ДП является задающим параметром РМ, определяющим режим реализации РЭ и представляет собой набор типов линейных участков, характеризующих изменение мощности в РЭ. Независимо от количества участков, содержащихся в ДП, используются только три типа участков: наклонные с положительным и отрицательным значением производной и горизонтальный участок (полка).

Минимальное количество участков равно двум при использовании Способа $А_м$ и Способа В включения, трем – при Способе А.

Исходные данные для построения диаграммы пуска задаются в виде таблицы, в которой указываются начальное и конечное значения параметров участков ДП. К этим параметрам относятся время t_i в i-ой точке и значение выходного параметра ДП в данной точке $y_i(t_i)$.

Форма представления параметров ДП приведена в таблице 1.

Таблица 1. Форма записи параметров ДП.

Параметры ДП	Участок 1		Участок 2		Участок 3	
	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец
y_i	$y_{н1}$	$y_{к1}$	$y_{н2}= y_{к1}$	$y_{к2}$	$y_{н3}= y_{к2}$	$y_{н3}$
t_i	$t_{н1}$	$t_{к1}$	$t_{н2}= t_{к1}$	$t_{к2}$	$t_{н3}= t_{к2}$	$t_{нк3}$

Время в ДП указывается в относительных величинах, при этом $t_{н1}$=0.

Функциональная схема реализации алгоритма формирования ДП приведена на рис. 17. В формирователе ДП предусмотрена дополнительная функция, обеспечивающая формирование независимого участка ДП с отрицательным наклоном, который выполняет функцию «Нормального останова». Данная функция предназначена для преднамеренного прекращения РЭ по команде оператора.

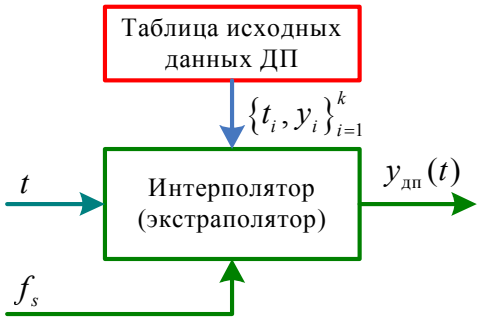


Рис. 17. Функциональная схема формирователя диаграммы пуска

В состав формирователя ДП входят: модуль исходных данных и линейный интерполятор (экстраполятор).

Следующим важным этапом разработки алгоритма регулирования мощности и структуры АРМ являлось определение параметров настройки РМ и оценка качества реализации ДП в рабочем диапазоне работы реактора.

К основным техническим требованиям, которым должен удовлетворять АРМ, относятся следующие:

1) диапазон регулируемой мощности от 1 до 1000 МВт;

2) максимальная скорость изменения мощности на начальном участке ДП, не менее 500 МВт/с;

3) максимальная динамическая ошибка регулирования (выход на стационарный режим), не более 10 %;

4) максимальная статическая ошибка поддержания заданного уровня мощности (режим стабилизации мощности), не более 2 %;

5) максимальная величина перерегулирования при воздействии возмущения по реактивности $0{,}1\beta_{эф}$, не более 10 %, и не более 20 % при воздействии возмущения по реактивности $0{,}2\beta_{эф}$.

Отработка алгоритма регулирования и определение параметров настройки РМ в зависимости от качества реализации ДП выполнялись с использованием программного пакета моделирования динамических систем VisSim.

В результате проведенных модельных исследований было установлено, что параметры настройки РМ являются функционально зависимыми переменными от задающего параметра – ДП. Таким образом, было определено, что параметры настройки РМ достаточно хорошо описываются следующими функциями:

1) $K_P(r)$ и $K_I(r)$ функцией вида:

$$y(x) = a + b \cdot \ln(x), \tag{17}$$

где $y(x)$ – значение функции; x – аргумент; a и b – коэффициенты полинома.

2) K_{D1} функцией вида:

$$y(x) = a + b \cdot x, \tag{18}$$

где $y(x)$ – значение функции; x – аргумент; a и b – коэффициенты полинома (17).

3) K_{D2} функцией вида:

$$y(x) = a + b \cdot \exp(-x/b_1) + c \cdot \exp(-x/c_1), \tag{19}$$

где $y(x)$ – значение функции; x – аргумент; a, b, b_1, c и c_1 – коэффициенты полинома.

Значения коэффициентов полиномов (17), (18) и (19) приведены в таблице 2.

Таблица 2. Значения коэффициентов полиномов

Параметр	Коэффициенты полинома				
	a	b	b_1	c	c_1
K_P	143,67	(минус) 19,14	-	-	-
K_I	0,114	0,0705	-	-	-
K_{D1}	0,45	0,00384	-	-	-
K_{D2}	19598,28	(минус) 19597,93	1,158·107	(минус) 0,36	15,34

В результате проведенных исследований удалось реализовать второй контур адаптации (автонастройка) по задающему параметру. Модифицированная функциональная схема РМ приведена на рис. 18.

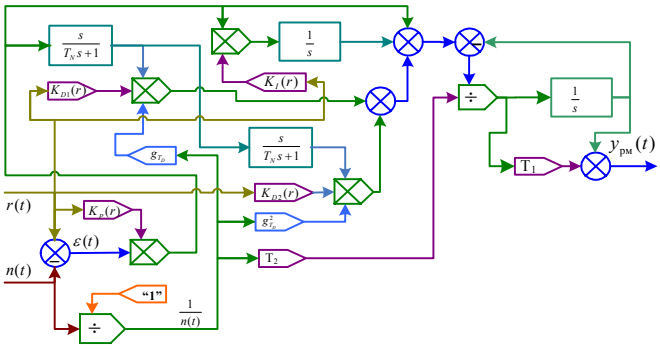


Рис. 18. Функциональная схема РМ с автоматическим выбором коэффициентов настроек

Дальнейшие исследования РМ были направлены на подтверждение результатов разработки АРМ посредством реализации серии ДП с целью оценки качества модельных пусков и исследования устойчивости АРМ к воздействию возмущений по реактивности. Проведены исследования для диапазонов реализации ДП в пределах от 1 до 1000 МВт при максимальном темпе изменения мощности на начальном участке ДП, не менее 500 МВт/с.

Некоторые иллюстрации исследований приведены на рис. 19 – 22. При этом на рис. 19 показана реализация наиболее динамичного режима регулирования мощности с темпом выхода 500 МВт/с при уровне стабилизации 1000 МВт. На рис. 20 приведен вариант реализации ДП с минимальным уровнем мощности при использовании Способа В включения.

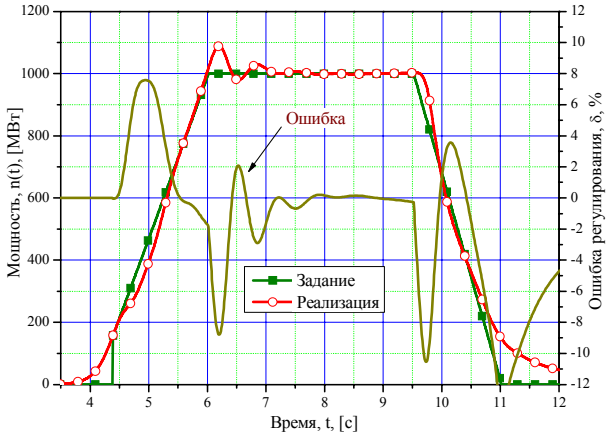


Рис. 19. Реализация «жесткого» модельного пуска

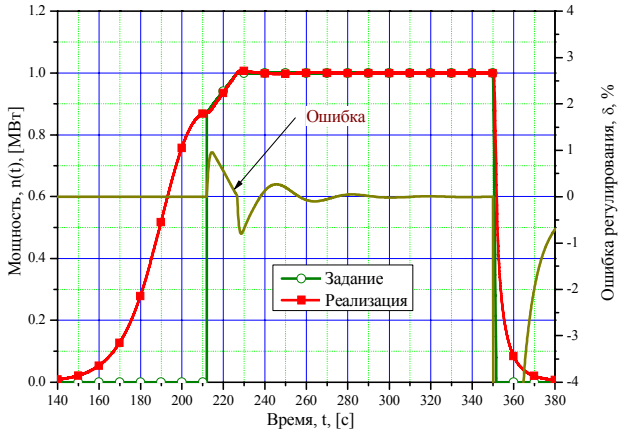


Рис. 20. Реализация модельного пуска с малым уровнем мощности

Для оценки работы второго контура адаптации по параметрам настроек, приведена реализация ДП с различными уровнями мощности, что наглядно показывает эффективность работы данного контура адаптации (рис. 21).

На рис. 22 приведен результат исследования РМ на воздействие возмущения по реактивности с уровнем 0,2 $\beta_{эф}$.

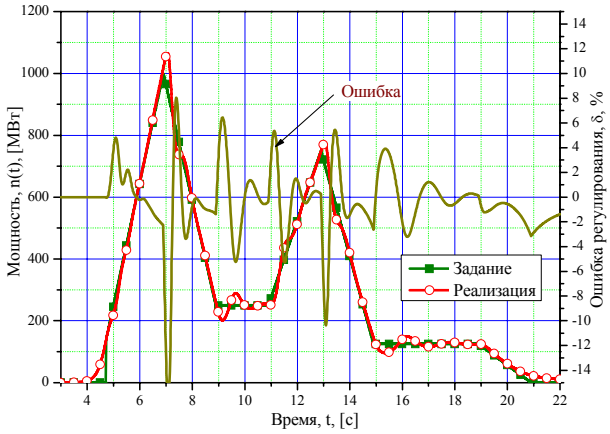


Рис. 21. Реализация сложного модельного пуска

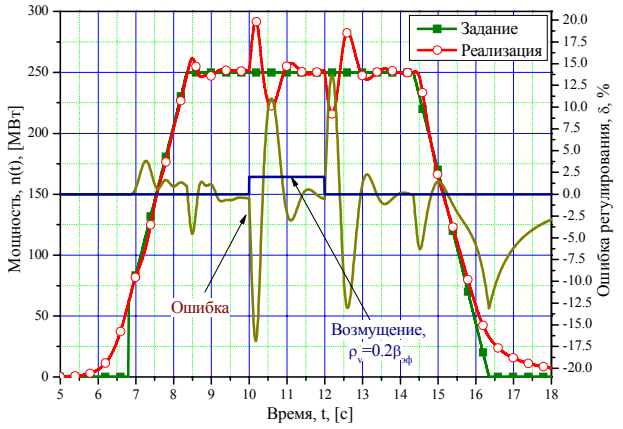


Рис. 22. Результаты исследования устойчивости регулятора мощности

Проведенная серия исследований подтвердила эффективность разработанного алгоритма регулирования мощности с параметрической адаптацией. Полученные параметры регулятора мощности полностью удовлетворяют заданным требованиям.

Глава 3. В данной главе рассматривались вопросы разработки и реализации опытного образца системы АРМ реактора ИГР, приведены характеристики и параметры устройств, входящих в состав системы АРМ.

Особенностью построения системы АРМ реактора ИГР является необходимость обеспечения реализации двух основных функций: подготовка АРМ к проведению РЭ на реальном объекте управления и реализация РЭ в режиме автоматического регулирования мощности. Такой подход построения структуры системы АРМ обусловлен тем, что проведение каких либо работ, связанных с подготовкой к РЭ непосредственно на реакторе не представляется возможным.

Таким образом, в системе АРМ реактора реализованы и функционально разделены два режима работы:

1) имитационный (подготовительный) режим, включающий в себя подготовку исходной информации по предстоящему РЭ; занесение исходных данных в контроллер (регулятор) АРМ; проверку результатов подготовки АРМ на имитаторе реактора ИГР;

2) штатный режим, включающий в себя: выполнение процедур подключения ионизационной камеры к РМ; приведение всех систем в исходное состояние; реализацию РЭ в соответствии с регламентом, принятым на реакторном комплексе ИГР.

Структурная схема системы АРМ реактора ИГР приведена на рис. 23 и включает в себя автоматический регулятор мощности, имитатор реактора ИГР и коммутационный модуль, обеспечивающий переход системы АРМ с имитационного режима работы на штатный.

Структура АРМ разработана на основании полученных алгоритмов регулирования мощности и включения РМ и другой информации, изложенной в главе 2 настоящей работы.

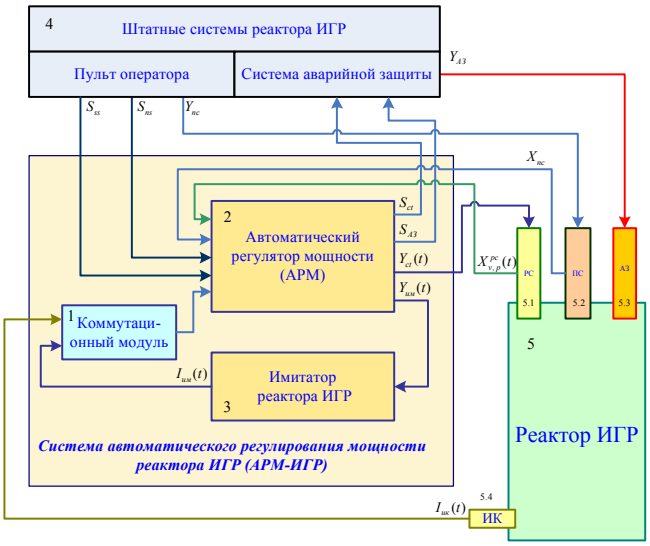


Рис. 23. Структурная схема системы АРМ реактора ИГР

S_{st} – логический сигнал разрешения работы регулятора; S_{ns} – логический сигнал, определяющий выполнение команды «Нормальный останов» с пульта управления оператора; S_{ct} – логический сигнал готовности регулятора к работе; $S_{АЗ}$ – логический сигнал аварийного останова реализации диаграммы пуска; $Y_{АЗ}$ – сигнал сброса стержней аварийной защиты; X_{nc} – сигнал, определяющий верхнее положение пусковых стержней (ПС); $I_{ик}(t)$ – сигнал на выходе ИК (ионизационной камеры); $I_{им}(t)$ – сигнал с выхода имитатора, имитирующий ИК; $X_{v,p}^{pc}(t)$ – сигнал с датчиков скорости и положения регулирующего стержня; $Y_{ct(t)}$ – сигнал управления регулирующими стрежнями; $Y_{им}(t)$ – сигнал управления имитатором; ИК– ионизационная камера; РС (КС) – регулирующие (компенсирующие) стержни; ПС – пусковые стержни; АЗ –стержни аварийной защиты.

Функциональная схема АРМ приведена на рис. 24 и включает в себя следующие основные модули: 1 – модуль включения; 2 – модуль оптимизации параметров РМ; 3 – формирователь ДП; 4 – регулятор мощности; 5 – исполнительное устройство; 6 – ОУ (реактор ИГР); 7 – ионизационная камера (ИК); 8 – устройство согласования; 9 – модуль контроля состояния.

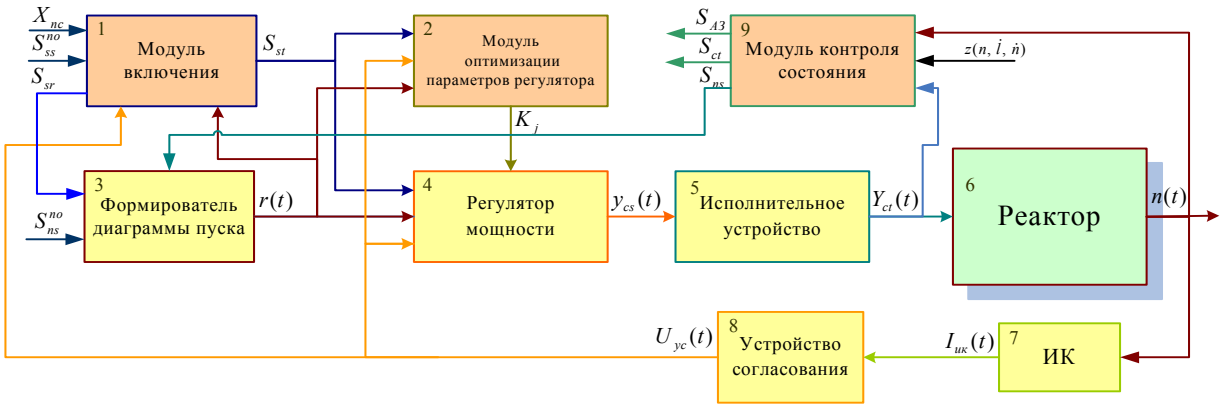


Рис. 24. Структурная схема АРМ

S_{sr} – логический сигнал разрешения работы формирователя диаграммы пуска; $S_{ss}^{по}$ – логический сигнал разрешения к пуску; $X_{пс}$ – логический сигнал «ПС вверху»; $S_{ns}^{по}$ – логический сигнал, определяющий выполнение команды «Нормальный останов»; S_{st} – логический сигнал разрешения работы регулятора мощности и модуля оптимизации параметров регулятора; K_j – значения параметров настройки регулятора; $y_{cs}(t)$ – сигнал управления исполнительным устройством; $Y_{ct}(t)$ – сигнал перемещения исполнительного органа (регулирующих стрежней); $n(t)$ – величина нейтронной мощности; $I_{ик}(t)$ – величина сигнала на выходе ионизационной камеры; $U_{ус}(t)$ – сигнал на выходе устройства согласования (преобразователя); $z(n, \dot{l}, \dot{n})$ – допустимые значения регулируемых параметров; S_{ns} – сигнал прекращения пуска посредством реализации режима «Нормальный останов»; S_{st} – сигнал готовности регулятора к работе; $S_{АЗ}$ – сигнал аварийного останова, который поступает в штатную систему аварийной защиты.

Особенностью реализации АРМ является наличие в его структуре устройства согласования, обеспечивающего преобразование тока ИК в напряжение в логарифмическом масштабе, что исключило необходимость проведения калибровок канала измерения перед каждой реализацией РЭ. Установка масштаба регулируемой переменной осуществляется в цифровом коде непосредственно в АРМ. Автономные испытания и исследования устройства согласования показали, что оно обеспечивает качественное преобразование сигнала от различных типов нейтронных детекторов: КНК, КНТ и КТВ, при этом обеспечивает следующие характеристики: максимальная погрешность преобразования не более 0,5%; дрейф нуля не более 50 мкВ/^{o}С; диапазон преобразования тока составляет от $1{\cdot}10^{-8}$ до $1{\cdot}10^{-3}$ А.

Вторым составляющим элементом системы АРМ является имитатор реактора ИГР, который обеспечивает «замещение» реального объекта управления на период подготовки АРМ к РЭ. Основу имитатора составляет имитационная модель, рассмотренная в главе 1. Имитатор реактора ИГР реализован на основе принципа полунатурного моделирования, суть которого состоит в том, что часть оборудования, задействованного в имитаторе, является штатным, а именно: канал следящей системы

по положению КС, выполняющий функцию имитатора введенной реактивности в АЗ реактора. Подключение имитатора реактора ИГР к АРМ осуществляется через коммутационное устройство. Согласование по входному параметру (току) АРМ осуществляется с помощью преобразователя напряжение/ток, который настраивается на заданный режим реализации предстоящего РЭ.

В данной главе также приведены результаты разработки исполнительного устройства, модуля контроля состояния и ряда других вспомогательных устройств.

Важным этапом разработки системы АРМ являлся выбор и обоснование программно-технических средств (ПТС) реализации системы АРМ реактора ИГР, так как от функциональной и физической (технической) надежности ПТС зависит в конечном итоге успех практического использования разработки. В результате анализа ПТС различных производителей, специфики использования системы АРМ в производственных условиях и с учетом опыта проектирования систем подобного класса были выбраны ПТС фирмы National Instruments. Оборудование и программное обеспечение (ПО) этой фирмы отличается высокой надежностью и многофункциональностью технических средств, гибкостью и функциональной насыщенностью ПО, удобством его отладки и тестирования.

Аппаратную основу системы АРМ реактора ИГР составили контроллеры реального времени: PXI-8145 RT, на основе которого реализован РМ, включая все функции вспомогательных устройств (модуль включения; модуль контроля состояния и т.д.) и PCI-7030/6040 E, на основе которого реализована имитационная модель кинетики реактора ИГР.

Глава 4. Данная глава посвящена заключительному этапу в работе по реализации системы АРМ – исследованию опытного образца системы АРМ реактора ИГР. Испытания и исследования системы АРМ проводились в два этапа: предварительные – на имитаторе реактора ИГР и производственные – непосредственно на реальном объекте управления.

Основной объем исследований проводился на имитаторе реактора ИГР. В результате проведенных испытаний и исследований были получены следующие результаты:

1) АРМ обеспечивает регулирование мощности в диапазоне от 1 до 1000 МВт с максимальным темпом изменения мощности на начальном участке диаграммы пуска не менее 500 МВт/с, при этом максимальная величина перерегулирования не более 10 % на участке выхода на стационарный режим и не более 2% в режиме поддержания заданного уровня мощности (полка);

2) устройство включения АРМ обеспечивает автоматическое включение АРМ при отклонении параметров вспышки более чем в два раза от расчетного (оптимального) значения;

3) исследования на устойчивость показали, что АРМ сохраняет устойчивость

при воздействии возмущения по реактивности 0,2 $\beta_{эф}$, при этом величина перерегулирования не превышает 20%;

4) моделирование и исследование аварийной ситуации, в частности, при имитации выхода из строя двух каналов управления КС при их одновременном перемещении с максимальной скоростью вверх и вниз, показали, что система отрабатывает возмущение данного типа, при этом перерегулирование не превышает 10%;

5) при проведении ресурсных испытаний системы АРМ в течение 72 ч непрерывной работы, сбоев и отказов в системе зафиксировано не было.

В результате выполненной работы можно сделать заключение, что разработанная система АРМ реактора ИГР полностью удовлетворяет заданным требованиям.

Основные результаты и выводы

В результате проведенной работы были достигнуты следующие основные результаты:

1. Модельные исследования реактора ИГР в частотной области проводились впервые для данного типа реактора. На основании данных исследований была получена обобщенная модель, отражающая в явной форме зависимость динамических параметров модели реактора от нейтронной мощности, что послужило основой для аналитического синтеза алгоритма регулирования мощности реактора.

2. Разработан адаптивный алгоритм регулирования мощности реактора ИГР, который включает в себя два контура адаптации: компенсацию зависимости динамических параметров объекта управления (реактора ИГР) от регулируемой переменной и автоматическую коррекцию параметров настройки АРМ в зависимости от вида и характера задания – диаграммы пуска. На основании данного алгоритма регулирования была реализована структура АРМ. Модельные исследования подтвердили соответствие достигнутых характеристик АРМ заданным требованиям.

3. Разработанные алгоритмы включения АРМ и способы коррекции отклонения параметров вспышки от расчетных значений позволили исключить «ударное» включение АРМ и срыв реакторного эксперимента в том случае, когда условия включения не выполняются. Применение данных алгоритмов в структуре АРМ позволило снизить требования к точности реализации «пусковой» вспышки два раза, что исключило срыв РЭ в случае ошибки в расчете начального скачка реактивности.

4. Завершена разработка и реализация опытного образца системы АРМ. Система АРМ представляет собой комплекс программно-технических средств, обеспечивающих подготовку АРМ к эксперименту на реакторе, проверку готовности АРМ на имитаторе реактора ИГР и реализацию ДП на реальном объекте управления. Система АРМ реализована на основе технических и программных средств ведущих фирм, выпускающих оборудование для целей управления и контроля динамическими объектами различного назначения, в частности фирмы National Instru-

ments.

5. Проведенные комплексные испытания и исследования системы АРМ как на имитаторе реактора ИГР, так и на реальном объекте управления, подтвердили соответствие технических характеристик АРМ заданным требованиям, установленных техническим заданием.

Работа завешена внедрением системы АРМ на реакторном комплексе ИГР, подтвержденная актом внедрения № 01-20/174 вн. от 19.06. 2005 г.

Основная часть материалов, представленных в диссертации опубликована в следующих работах:

1. Горбаненко, О.А. Моделирование и исследование динамики реактора ИГР с применением Simulink/ О.А. Горбаненко, А.С. Клименко: Тез. докл. Всероссийской научной конференции «Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB» (28-29 мая 2002). М.: ИПУ РАН. 2002. 207 с.: ил.

2. А.с. 201699 СССР, МКИ^4 Н03 М 1/87. Программно-задающее устройство/ К.В Беловольский, О.А. Горбаненко, Г.В. Костюкевич, (СССР).– № 3072160/23-23; заявлено 05.06.84.

3. А.с. 1179542 СССР, МКИ^4 Н03 М 1/86. Преобразователь кода в частоту с переменным коэффициентом преобразования/ О.А. Горбаненко, (СССР).– № 3728104/24-24; заявлено 05.03.84; опубл. 15.09.85, Бюл. №34.

4. А.с. 1039026 СССР, МКИ^3 Н03 К 13/02. Преобразователь кода в частоту/ О.А. Горбаненко, (СССР).– № 3404419/19-21; заявлено 05.03.82; опубл. 30.08.83, Бюл. №32

5. Горбаненко, О.А. Имитационная модель кинетики импульсного графитового реактора/ О.А. Горбаненко, А.С. Клименко//Инженерно-технический журнал КИПиА в Казахстане. – 2005, №2(08), – С. 57-61.

6. Горбаненко, О.А. Создание системы автоматического регулирования мощности реактора ИГР для реализации динамических режимов испытаний/ О.А. Горбаненко, К.М. Казьмин, В.В. Дзалбо //Известия томского политехнического университета, том. 305, вып. 3, 2002 г. С. 376-383. Тематический выпуск, посвященный 95-летию Н.П. Курина, «Проблемы и перспективы технологий атомной промышленности».

7. Горбаненко, О.А. Автоматический регулятор мощности: Новое качество и безопасность при реализации динамических режимов на реакторе ИГР/ О.А. Горбаненко, Ю.М. Казьмин.//Вестник НЯЦ РК «Атомная энергетика и безопасность АЭС»: вып. 1 – Курчатов, 2002 г.– С. 117-124.