

УДК 621.039.562

Экспериментальное исследование алгоритмов прямого цифрового управления нейтронным полем на реакторе ИРТ-2000

Филипчук Е. В., Потапенко П. Т., Крюков А. П., Трофимов А. П., Дунаев В. Г.,
Кузнецов Н. А., Федулов В. В.

С развитием ядерной энергетики все более актуальной становится проблема использования ЭВМ для управления нейтронным полем больших реакторов. В последнее время этому вопросу уделяется значительное внимание. В работе [1] дан обзор методов использования ЭВМ для управления реакторами на ряде зарубежных АЭС, в работе [2] рассмотрены вопросы синтеза подобных систем. На исследовательском реакторе планируется использовать ЭВМ для контроля и регистрации пространственного распределения нейтронного поля [3].

Настоящая статья посвящена экспериментальному исследованию различных алгоритмов прямого цифрового управления нейтронным полем реактора ИРТ-2000 МИФИ. Правомочность изучения особенностей пространственного регулирования на исследовательском реакторе показана в работе [4]. При проведении подобных экспериментов исследовательские реакторы могут с успехом использоваться в качестве физической модели, с их помощью могут быть решены методические вопросы контроля, разработки и выполнены экспериментальные проверки различных алгоритмов и структур систем управления на базе реальной аппаратуры [5].

Существующая тенденция применения ЭВМ для управления реактором состоит в использовании модульных взаимосвязанных систем ЭВМ, что позволяет повысить надежность и гибкость цифровой системы управления. Требования безопасности приводят к необходимости использовать на низшем уровне иерархии автоматизированной системы управления — прямом цифровом управлении реактором — специализированные ЭВМ, которые реализуют несложные функции управления, но при этом обладают высокой надежностью. Правомочность такого подхода объясняется еще и тем, что общую мощность необходимо регулировать с весьма малыми тактами, что, по существу, исключает возможность использования сложных законов управления.

На основе этих соображений оказалось возможным использовать для экспериментальных исследований ЭВМ «Наири-С». Для сопряжения аналоговых подсистем ввода — вывода с процессором был сконструирован специальный логический блок управления вводом — выводом на базе интегральных схем, который подключался к сумматору через схему согласования, выполненную на транзисторах. Такое построение канала ввода — вывода информации

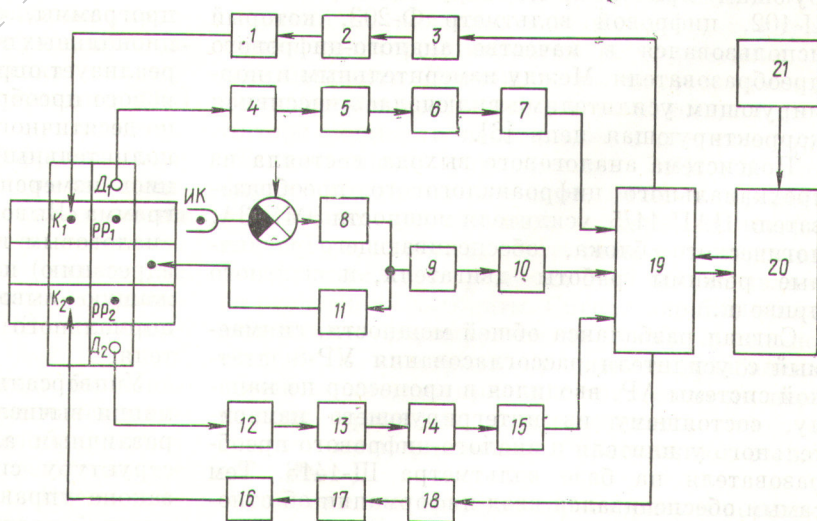


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной системы управления реактором ИРТ-2000.

1, 16 — выходные приводы с логическим блоком; 2, 17 — усилители мощности ЭМУ-8А; 3, 18 — цифроаналоговые преобразователи ЦАП-11/5; 4, 12 — измерительные усилители И-37; 5, 13 — пассивные корректирующие цепи; 6, 14 — нормирующие усилители И-102; 7, 15 — вольтметры Ф-203; 8 — усилитель рассогласования УР-8; 9 — интегрирующий измерительный усилитель; 10 — вольтметр Ш-1413; 11 — штатный привод АР; 19 — канал ввода — вывода; 20 — процессор «Наири-С»; 21 — пишущая машинка «Бюксу».

в процессор «Напри-С» позволило на основе неизменяемой системы команд машины реализовать управление аналого-цифровыми и цифро-аналоговыми преобразователями, запись в память и считывание информации, необходимой для управления. Указанный блок сопряжения позволяет обеспечить ввод — вывод дискретной информации по трем каналам, а при необходимости с небольшими дополнениями и по большему числу каналов, что существенно увеличивает вычислительную мощность машины.

Полная структурная схема экспериментальной системы прямого цифрового управления и картограмма активной зоны ИРТ-2000 приведены на рис. 1. В качестве датчиков нейтронного потока D_1 и D_2 в системе применялись размещенные в вытеснителях топливных кассет эмиссионные детекторы типа ДПЗ-11П, успешно используемые ранее в экспериментах с автоматическими системами управления реактором [4, 6, 7]. Борные стержни K_1 и K_2 использовались в качестве исполнительных органов системы управления, стержни PP_1 и PP_2 — для возмущения реактивности. При проведении экспериментов по прямому цифровому управлению реактором общая мощность стабилизировалась штатным автоматическим регулятором (АР). Для связи реактора с ЭВМ использовались серийные измерительные приборы и преобразователи, скомпонованные в соответствующие подсистемы аналогового входа и выхода.

Подсистема аналогового входа одного канала управления включала датчик ДПЗ-11П, измерительный усилитель тока И-37 с регистрирующим прибором, нормирующий усилитель И-102, цифровой вольтметр Ф-203, который использовался в качестве аналого-цифрового преобразователя. Между измерительным и нормирующим усилителями включалась пассивная корректирующая цепь [6].

Подсистема аналогового выхода состояла из трехканального цифроаналогового преобразователя ЦАП-11/5, усилителя мощности ЭМУ-3А, логического блока, обеспечивающего различные режимы работы двигателя, и штатного привода.

Сигнал разбаланса общей мощности, снимаемый с усилителя рассогласования УР-8 штатной системы АР, вводился в процессор по каналу, состоящему из интегрирующего измерительного усилителя и аналого-цифрового преобразователя на базе вольтметра Щ-1413. Тем самым обеспечивался ввод информации об относительном положении стержня АР.

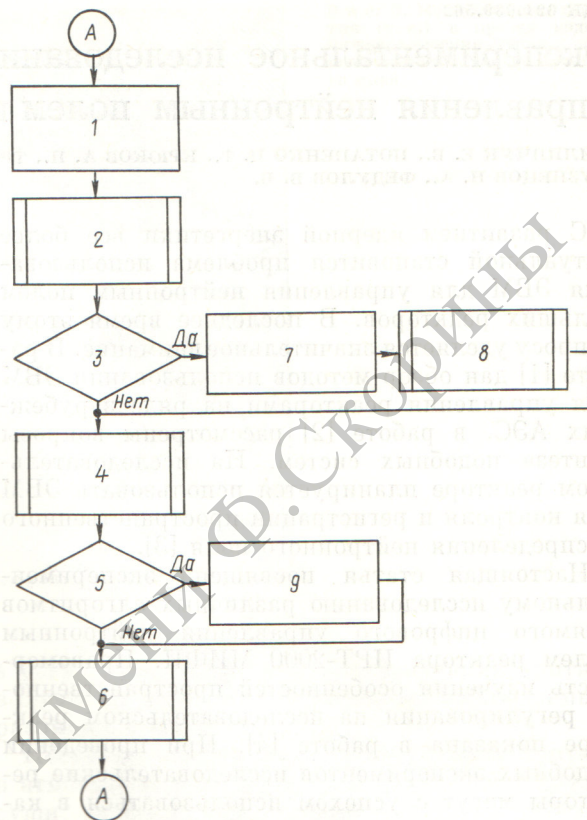


Рис. 2. Структурная схема управляющей программы:

1 — таймер; 2 — подпрограмма «Ввод»; 3 — необходим ввод новых уставок; 4 — подпрограмма вычисления управляющих воздействий; 5 — нарушены ограничения; 6 — подпрограмма «Вывод»; 7 — сброс ЦАП; 8 — подпрограмма ввода уставок; 9 — формирование управляющего воздействия

На рис. 2 приведена структура управляющей программы, состоящей из нескольких функциональных подпрограмм. Подпрограмма «Ввод» реализует опрос соответствующего аналого-цифрового преобразователя, преобразование двоично-десятичного выходного кода вольтметра в дополнительный код, используемый машиной, и запись измеренной величины в память. Подпрограмма «Вывод» обеспечивает управление цифроаналоговым преобразователем (сброс в «нуль», адресацию) и преобразует информацию, подлежащую выводу, к виду, необходимому для нормального функционирования преобразователя.

Универсальная программа обработки информации вычисляет управляющие воздействия по различным алгоритмам, программно изменяет структуру системы управления и параметры закона управления. Функционирование управляющей программы происходит следующим об

разом. По сигналу от счетчика, имитирующего работу таймера, происходит иницирование подпрограммы «Ввод». После завершения операции ввода и преобразования управление передается программе ввода уставок. Если по требованию оператора необходим ввод новых уставок, то происходит сброс цифроаналогового преобразователя и машина переходит в состояние ожидания.

Установка задается оператором с пульта (пишущая машинка типа «Консул»), после чего управление передается блоку обработки информации — вычислению управляющего воздействия. В программе предусмотрена возможность аналогичным образом изменять вид и параметры закона управления. Далее управление передается в блок проверки ограничений, и окончательно сформированное управление с помощью подпрограммы «Вывод» поступает на вход соответствующего цифроаналогового преобразователя. Затем управление передается таймеру, и через время такта цикл повторяется. Для управляющей программы использовался мнемокод машины «Наири-С».

Следует подчеркнуть, что подобная архитектура аппаратных и программных средств позволяет успешно имитировать работу реальной управляющей ЭВМ в сочетании с реальной конфигурацией подсистем аналогового входа и выхода.

Проводимые эксперименты касались исследований динамики системы, определения настроек и проверки работоспособности системы при различных типовых возмущениях. Подобным образом были исследованы линейные и релейные системы с синфазной и несинфазной работой каналов при различных законах управления. В результате получены следующие основные количественные характеристики:

1. При мощности 2000 кВт ток каждого ДПЗ составлял примерно 2 мкА.

2. Сигнал на входе аналого-цифрового преобразователя Ф-203 после коррекции и нормирующего усилителя И-102 составлял сотни милливольт, что дало возможность стабильно работать на вольтовом пределе вольтметра с тремя значащими цифрами. При этом обеспечивалась стабилизация токов ДПЗ с погрешностью 0,5%.

3. Подсистема аналогового выхода была настроена таким образом, чтобы при максимальном управляющем сигнале по соображениям безопасности скорость внесения реактивности ограничивалась значением $0,03 \beta/\text{с}$. Время такта составляло 1 с.

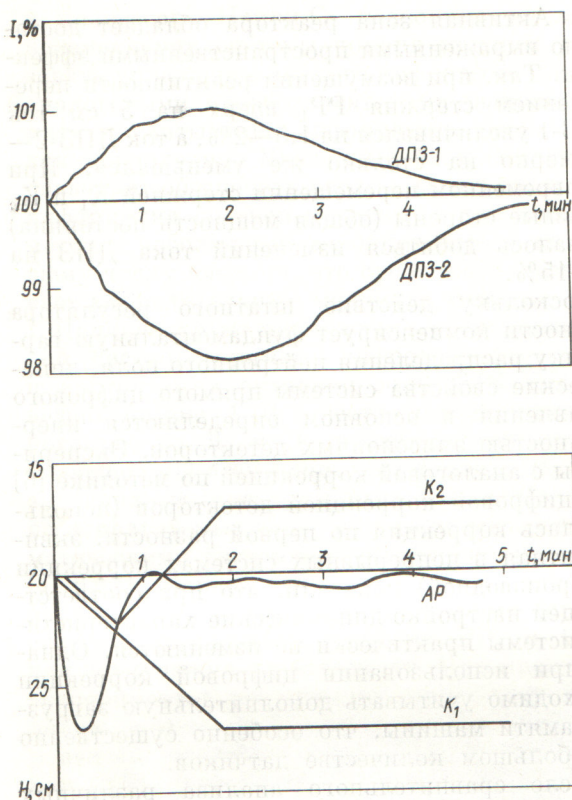
4. Активная зона реактора обладает достаточно выраженными пространственными эффектами. Так, при возмущении реактивности перемещением стержня РР₁ вверх на 5 см ток ДПЗ-1 увеличивался на 1,5—2%, а ток ДПЗ-2 — примерно на столько же уменьшался. При одновременном перемещении стержней К₁ и К₂ в разные стороны (общая мощность постоянна) удавалось добиться изменений тока ДПЗ на 10—15%.

Поскольку действие штатного регулятора мощности компенсирует фундаментальную гармонику распределения нейтронного поля, динамические свойства системы прямого цифрового управления в основном определяются инерционностью эмиссионных детекторов. Эксперименты с аналоговой коррекцией по методике [6] и с цифровой коррекцией детекторов (использовалась коррекция по первой разности, эквивалентная в непрерывных системах коррекция по производной) показали, что при соответствующей настройке динамические характеристики системы практически не изменяются. Однако при использовании цифровой коррекции необходимо учитывать дополнительную загрузку памяти машины, что особенно существенно при большом количестве датчиков.

После сравнительного анализа различных структур прямого цифрового управления в качестве базовой была выбрана релейная система с синфазной работой каналов. Эта структура обладает рядом преимуществ, среди которых следует отметить простоту подсистемы аналогового выхода, большую гибкость и простоту в настройке, позволяющие реализовать практически любые алгоритмы управления.

Одной из наиболее важных задач в управлении реактором является регулирование общей мощности. Возможно, что по соображениям безопасности необходимость в аналоговом регуляторе мощности не отпадает и для реактора, оборудованного управляющей ЭВМ. В этом случае одной из функций ЭВМ в процессе управления должно быть поддержание стержней АР в наиболее эффективном положении. Возможным путем решения этой задачи является следующий алгоритм. Сигнал ошибки в каждом канале формируется из суммы локальной ошибки и интеграла от сигнала разбаланса общей мощности, причем с точностью до переходных процессов можно считать, что этот сигнал пропорционален положению стержня АР.

Работу такой системы характеризует переходный процесс при компенсации возмущения по



Р и с. 3. Изменение токов ДПЗ-1 и положений управляющих стержней H при компенсации возмущения по реактивности

реактивности, вызванного перемещением стержня PP_1 на 5 см вверх (рис. 3). Вначале перераспределение токов ДПЗ определяется быстродействующим регулятором общей мощности. Далее синхронное перемещение стержней K_1 и K_2 возвращает стержень АР в исходное положение, и в заключение происходит перераспределение положений стержней зонного регулирования для получения требуемой формы поля.

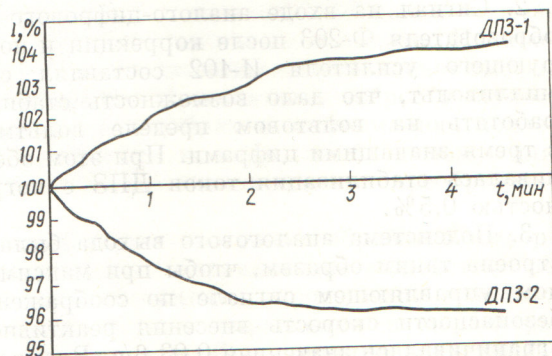
К достоинствам этого алгоритма следует отнести высокую надежность и мобильность в управлении полной мощностью; недостатком является необходимость точного согласования уставок, определяющих форму поля, с уставкой полной мощности. От этого недостатка свободен алгоритм с нормированием локального сигнала нейтронного поля на средний уровень. В соответствии с ним локальный сигнал ошибки определяется сравнением реперного значения формы поля с измеряемой величиной. Основное преимущество алгоритма состоит в независимости сигнала ошибки от мощности. Экспери-

ментально подтверждено, что при соответствующей настройке каналов изменение полной мощности не приводит к срабатыванию стержней K_1 и K_2 .

Следует подчеркнуть, что, в отличие от рассмотренных ранее схем, алгоритм с нормированием сигнала ошибки не обеспечивает регулирования полной мощности, поэтому необходимым условием эксплуатации становится наличие автоматического регулятора мощности. В этом случае введение в алгоритм регулирования сигнала, пропорционального интегралу от сигнала разбаланса общей мощности, позволяет синтезировать структуру, сочетающую достоинства рассмотренных ранее систем. Действительно, данный алгоритм, по существу, обеспечивает стабилизацию полной мощности по сигналу от усилителя рассогласования штатного регулятора, поддерживая при этом заданную форму нейтронного поля по сигналам соответствующих внутризонных датчиков. Для фиксированной формы поля требуемая мощность определяется единственной уставкой.

Важно отметить, что наличие стержней автоматического регулятора мощности не является обязательным. Экспериментальная проверка работоспособности системы прямого цифрового управления при отключенном штатном АР показала, что в этом случае обеспечивается приемлемое качество процессов как в режиме стабилизации (компенсация локальных возмущений), так и при управляемом перераспределении нейтронного поля. В качестве примера на рис. 4 представлены переходные процессы при управляемом изменении профиля поля — задании разнополярных уставок.

Проведенные эксперименты являются только первым шагом в прямом цифровом управлении нейтронным полем реактора. Однако создание



Р и с. 4. Управляемое изменение профиля нейтронного поля

новых высоконадежных комплексов с ЭВМ, работающими в реальном времени, все более широкое внедрение их в системы контроля АЭС дают основание говорить о практической возможности использования ЭВМ в замкнутом контуре управления. Результаты испытания на реакторе ИРТ-2000 различных структур и алгоритмов прямого цифрового управления могут быть полезными при проектировании реальных управляющих систем для больших энергетических реакторов.

Поступила в Редакцию 26/VII 1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дунаев В. Г., Потапенко П. Т. «Атомная техника за рубежом», 1974, № 12, с. 10.
2. Филинчук Е. В. и др. «Атомная энергия», 1975, т. 39, вып. 1, с. 12.
3. Апостолов Т., Узунов И., Марков А. В сб.: Опыт эксплуатации и использования исследовательских реакторов. Симп. СЭВ. Предял, 1974, с. 813.
4. Филинчук Е. В. и др. «Атомная энергия», 1975, т. 39, вып. 2, с. 90.
5. Боужик Я., Гадомски А., Лятек С. «Kernenergie», 1976, v. 19, N 6, p. 183.
6. Андреев Л. Г. и др. «Атомная энергия», 1976, т. 40, вып. 4, с. 335.
7. Мительман М. Г. и др. «Атомная энергия», 1975, т. 39, вып. 4, с. 272.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Содержание статей, направляемых в журнал «Атомная энергия», должно быть изложено с предельной ясностью и краткостью. Следует избегать повторения данных таблиц и графиков, а также представления численных результатов в виде таблиц и графиков одновременно.

Объем обзоров, как правило, не должен превышать 20—22 стр., оригинальных статей — 10—12 стр., аннотаций депонированных статей — 2 стр., писем в редакцию — 5 стр. машинописного текста (включая рисунки с подписями, таблицы и библиографию).

При подготовке рукописей авторы должны руководствоваться следующими правилами:

1. Тексты (среди них обязательно должен быть первый машинописный экземпляр) и иллюстрированные материалы представляются в четырех экземплярах в окончательно отработанном для печати виде. Текст должен быть отпечатан через два интервала по 28—29 строк на одной стороне листа с полями не уже 4 см; рукописные вставки не допускаются.

2. Оформление текста (написание формул, выделение греческих и латинских, строчных и прописных букв, сокращение слов и т. д.) производится в соответствии с общими правилами, принятыми для научно-технических журналов. Трудно различимые в рукописном обозначении буквы и знаки должны быть пояснены на полях.

3. Единицы всех физических величин должны быть обозначены в системе СИ.

4. Прилагаемые к тексту таблицы нумеруются по порядку, каждая таблица должна иметь заголовок.

5. Рисунки выполняются черной тушью на бумаге размером 15×20 см; фотографии должны иметь контрастные изображения, размер фотографий 12×18 см.

6. Подписи к рисункам прилагаются на отдельном листе. В тексте должны быть ссылки на рисунки.

7. Цитируемая литература приводится в конце работы общим списком с указанием:

а) для журнальных статей — фамилий и инициалов авторов, названия журнала, года, номера тома, выпуска и страницы;

б) для книг — фамилий и инициалов авторов, полного названия книги, места издания, издательства и года издания; для иностранных книг указываются также данные русского перевода;

в) для статей в сборнике — фамилий и инициалов авторов статьи, названия сборника, инициалов и фамилий составителя или редактора сборника, части, выпуска, места издания, издательства, года и страницы.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

8. К статьям, обзорам и письмам в редакцию должны быть приложены рефераты, составленные по правилам реферативных журналов, с четко сформулированной целью и результатами работы. Кроме того, рефераты к статьям и обзорам должны быть переведены на английский язык (в строгом соответствии с русским рефератом).

9. Названия всех работ, присылаемых в редакцию (статьи, обзоры, депонированные статьи и письма в редакцию) должны быть переведены на английский язык, фамилии и инициалы авторов даны в английской транскрипции.

10. Тексты и рисунки должны быть подписаны всеми авторами. Необходимо указывать точный адрес, номер телефона, фамилию, полное имя и отчество авторов.

Редакция посылает автору только одну корректуру, которую необходимо вернуть в предельно короткий срок.

Рукописи, не соответствующие этим требованиям, не рассматриваются. Отклоненные статьи не возвращаются.