

Рис. 2. Переходные процессы в модели при ступенчатом изменении реактивности $\delta k_{14} = 0,2\beta$ для реактора с $\kappa_T = -\beta$, $\kappa_\Phi = 0$ (а) и при $\kappa_T = -\beta$, $\kappa_\Phi = +2\beta$ (б)

на входе усилителя У-1 суммируются «паровые» вклады от всех ячеек, предшествующих рассматриваемой (по ходу теплоносителя).

Нули напряжений в узлах сетки означают соответствующие базовому нейтронному полю.

На аналоговой модели проведено большое количество экспериментов по динамике и статике нейтронного поля. Здесь приведены наиболее характерные результаты. Ячейки модели далее индексируются двумя цифрами, первая из которых является номером канала

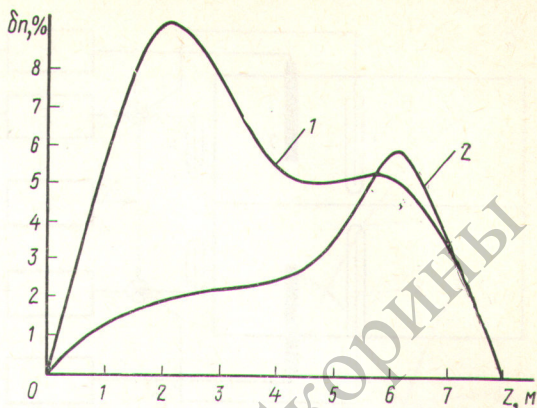


Рис. 3. Статистические распределения отклонения нейтронного поля по высоте в первом канале при $\delta k_{12} = 0,2\beta$ (1) и $\delta k_{16} = 0,2\beta$ (2)

(в соответствии с рис. 1, б), а вторая — номером узла в этом канале, начиная снизу. Так, δk_{14} и δn_{14} означают входные и выходные сигналы для четвертого снизу узла первого канала.

На рис. 2 приведены переходные процессы отклонений нейтронного поля при ступенчатом изменении k_∞ в ячейке 14 на величину $\delta k_{14} = 0,2\beta$ для реактора с $K_T = -\beta$ и $K_\Phi = 0$ (см. рис. 2, а) и с $K_T = -\beta$ и $K_\Phi = +2\beta$ (см. рис. 2, б).

На рис. 3 приведены статические распределения для изменения δk_{12} (1) и δk_{16} (2) на величину $0,2\beta$ ($K_T = -\beta$, $K_\Phi = +2\beta$).

Из рис. 2—3 видно, что положительный паровой коэффициент реактивности не только увеличивает отклонения нейтронного поля в ответ на локальные возмущения реактивности, но и вызывает значительную асимметрию в реакциях верхней и нижней частей активной зоны.

Аналоговая модель позволяет в короткий срок провести обширные исследования по динамике нейтронного поля и систем трехмерного зонного регулирования мощности.

Поступило в Редакцию 26/V 1977 г.

УДК 621.039.562

Трехмерное зонное регулирование мощности реактора

ЕМЕЛЬЯНОВ И. Я., ФИЛИПЧУК Е. В., ПОТАПЕНКО П. Т., КРЫЛОВ В. М.

При нестабильности реактора по отношению к первым азимутальной и высотной гармоникам стабилизация нейтронного поля реактора может быть обеспечена двухъярусной системой регулирования с несколькими зонными регуляторами на верхнем и нижнем ярусах.

Такая система полезна и при устойчивом распределении мощности, так как позволяет уменьшить локальные погрешности регулирования распределения мощности и тем самым увеличить теплотехническую надежность реактора. Так, при форсировании мощностей в реакторах за счет интенсификации теплообмена [1] или других мер в число параметров, лимитирующих

мощность, войдет температура твэлов, их оболочек, замедлителя. В этом случае проблема стабилизации и регулирования высотного распределения мощности становится весьма актуальной.

Однако и в реакторах, где поле нейтронов по высоте практически не лимитирует мощность и не ограничивает теплотехническую надежность, высотные перекосы и нестабильность поля крайне нежелательны. Они вызывают «термокачки», приводящие к преждевременному выходу из строя твэлов, изменяют эффективность стержней, обуславливают изменение мощности реактора автоматическим регулятором (при постоянной

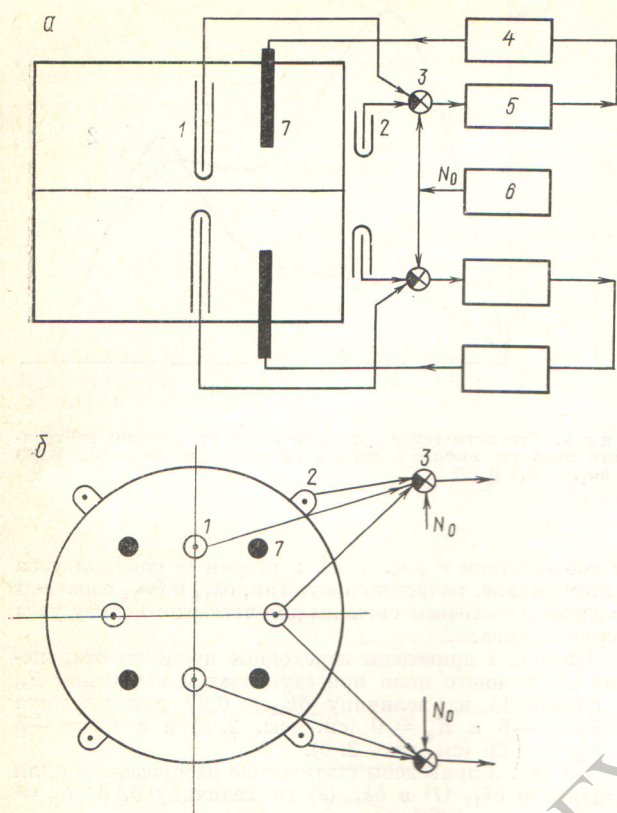


Рис. 1. Структурная схема системы двухъярусного зонного регулирования мощности (а) и расположение датчиков и стержней в плане (б)

«установке» за счет локального изменения поля вблизи ионизационных камер и другие вредные эффекты.

Предлагаемые здесь многоярусные системы регулирования, в отличие от описанных ранее [1], обеспечивают стабилизацию объемного распределения мощности и подавление пространственных колебаний мощности.

Принципы построения двухъярусной системы регулирования иллюстрирует рис. 1, на котором представлена структурная схема системы, размещение датчиков и зонных регуляторов в реакторе. Для примера показана система с четырьмя регуляторами (7) на верхнем и нижнем «этажах». В каждом из 8 идентичных регуляторов имеется несколько датчиков — внутриреакторных (1) и вне реакторных (2) ионизационных камер, элемент сравнения (3), усилитель сигнала ошибки (5) и сервопривод стержня (4). В качестве исполнительных стержней в нижних регуляторах используются нижние стержни-поглотители, а в верхних — верхние стержни (в близлежащих каналах СУЗ). Нормальный рабочий ход стержней — от крайнего положения до центра активной зоны. Задатчик мощности (6) является общим для всех регуляторов. Система предназначена для регулирования интегральной мощности и стабилизации объемного распределения мощности.

Значительного увеличения точности регулирования можно достичь в многоярусных системах с секционированными газообразными регуляторами с изменяемым

давлением газообразного поглотителя нейтронов. Вариант конструкции такого регулятора изображен на рис. 2. Он представляет собой герметичный канал 1, разделенный «глухими» перегородками 2 на 3 секции (большее количество секций нецелесообразно). К каждой секции подведены индивидуальные линии 3, питающие секции поглощающим газом. В верхней части каждая линия подключена к манометру для измерения давления газа — поглотителя и далее к трехходовому клапану, соединяющему секцию с коллектором высокого ($0,95 \text{ кгс/см}^2$) или низкого давления газа ($0,01 \text{ кгс/см}^2$), либо запирающему линию. Регулятор устанавливается в охлаждаемый водой 4 канал 5 с необходимым технологическим зазором. Ниже и выше газовых секций канал 1 засыпан графитом 6.

Как показали эксперименты на реакторе ИРТ-2000, эффективность такого регулятора, заполненного ^3He до давления 1 кгс/см^2 , близка к эффективности штатного стержня СУЗ.

^3He — единственный пока пригодный для промышленного использования поглощающий нейтроны газ ($\sigma_a = 5200 \text{ б}$). При поглощении тепловых нейтронов

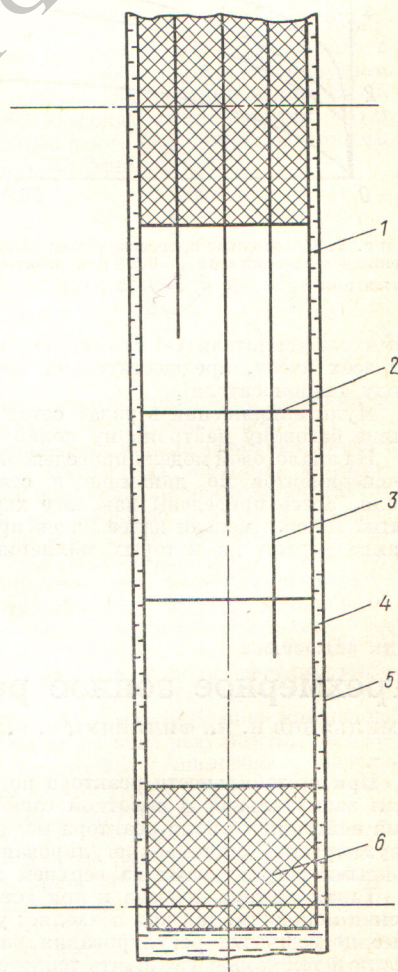


Рис. 2. Секционированный регулятор с газообразным поглотителем нейтронов

образуется тритий и выделяется энергия $\sim 0,6$ МэВ. Ориентировочная стоимость ^3He фирмы «Изотоп» около 60 руб. за 1 л. при нормальных условиях и зависит от категории очистки.

Преимущества и проблемы газового управления изложены в статье [3]. Газовое управление нашло промышленное применение пока лишь на французском тяжеловодном энергетическом реакторе EL-4.

Поскольку по условиям ядерной безопасности система газового регулирования может только дополнять твердые стержни, газовые регуляторы могут изучаться, например, в качестве многоярусной системы зонного регулирования мощности. При таком назначении ее явное преимущество перед стержневой в значительном увеличении точности регулирования. Двух- или трехъярусная газовая система может содержать в каждом зонном регуляторе несколько сообщающихся между собой газовых секций в разных каналах, управляемых от зонного регулятора общим трехходовым клапаном. Такая система оказывает «мягкое» распределенное в пространстве воздействие на нейтронное поле и по крайней мере в теоретическом отношении является идеальным регулятором нейтронного поля для канального реактора, поэтому заслуживает глубокой технической проработки.

Исследование на аналоговой модели приближается к испытаниям систем на реальном объекте. После того как построена аналоговая модель [2] в короткий срок может быть выполнен большой объем исследовательских работ.

Исследование многоярусных систем было проведено на аналоговой модели трехмерного реактора с кипящим теплоносителем [5]. Как показало моделирование, при увеличении парового коэффициента реактивности возникает неустойчивость нейтронного поля по радиусу и высоте реактора. При включении описанной выше двухъярусной системы регулирования обеспечивается стабилизация нейтронного поля.

При исследовании моделировались астатические регуляторы с безынерционными датчиками. Из полученных результатов исследования статичности и динамики регулирования приводятся статические характеристики, как наиболее интересные для рассматриваемого трехмерного регулирования нейтронного поля.

На рис. 3 приведены результаты аналогового моделирования, иллюстрирующие повышенную статистическую точность многоярусных систем по сравнению с одноярусными [2] и максимальная погрешность в зависимости от места локального возмущения по реактивности. По горизонтальной оси графиков обозначены номера j узлов модели, начиная снизу по ходу теплоносителя.

Главной причиной погрешностей при зонном регулировании является несовпадение пространственных координат локальных возмущений по реактивности и координат приложения регулирующего воздействия в активной зоне. Поэтому при заранее планируемых возмущениях по реактивности, таких, как перегрузка

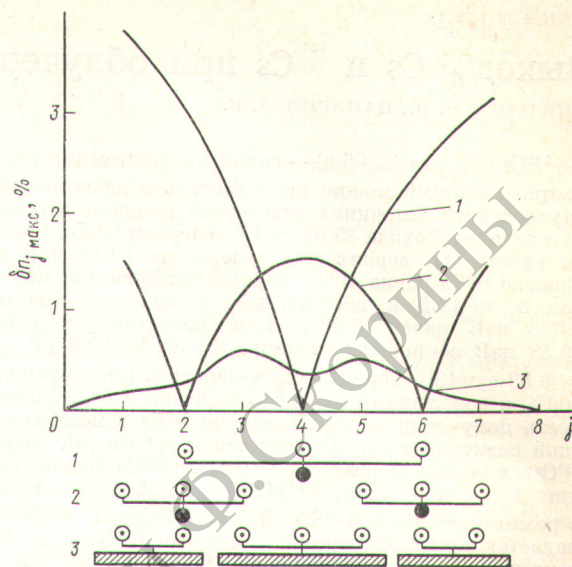


Рис. 3. Зависимость максимальных статистических погрешностей от высотной координаты локального возмущения по реактивности $\delta k = 0,2 \beta$ для одно- (1), двух- (2) и трехъярусной (3) систем:

● — положение концов стержней зонных регуляторов верхнего и нижнего ярусов; ○ — положение датчиков; заштрихованные участки — положение газовых регуляторов

топлива «на ходу», большой эффект в смысле повышения точности дает переключение перед началом перегрузки регулирующих органов зонных регуляторов на стержни, ближайšie к перегружаемому каналу. Эта мера на порядок уменьшает ошибки регулирования, поэтому, несмотря на трудности технической реализации, она может быть эффективной для энергонапряженных реакторов.

Повышение точности регулирования и способность стабилизации высотного распределения энерговыделения — основные достоинства многоярусных систем зонного регулирования мощности.

Поступило в Редакцию 26/V 1977 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов И. Я. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 37, вып. 2, с. 118.
2. Емельянов И. Я. и др. «Атомная энергия», 1978, т. 44, вып. 6, с. 519.
3. Потапенко Г. Т. «Атомная техника за рубежом», 1975, № 6, с. 22.