

товлении, в значительной степени упростит ядерную паропроизводительную установку и снизит ее стоимость.

Поступила в Редакцию 5/IV 1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Субботин В. И. и др. «Теплоэнергетика», 1974, № 9, с. 24.
2. Mizshak S. Progress Rep. № 1. USA, EC. Rep. DP-380, 1959.
3. Бабарин В. П. и др. В сб.: Теплообмен, гидродинамика и теплофизические свойства веществ. М., «Наука», 1968, с. 45.
4. Калинин Э. К. и др. Интенсификация теплообмена в каналах. М., «Машиностроение», 1972.
5. Мигай В. К. «Инж.-физ. журн.», 1972, т. XXII, № 2, с. 248.
6. Долгов В. В. и др. «Атомная энергия», 1960, т. 19, вып. 1, с. 10.
7. Зенкевич Б. А. и др. «Атомная энергия», 1969, т. 27, вып. 5, с. 391.

УДК 621.039.562

Зонное регулирование мощности энергетического реактора

ЕМЕЛЬЯНОВ И. Я., ФИЛИПЧУК Е. В., ФИЛИППОВ А. Г., ШЕВЧЕНКО В. В., ПОТАПЕНКО П. Т., НЕБОЯН В. Т.

Традиционная система регулирования мощности реактора содержит один регулятор, имеющий в качестве датчика мощности несколько ионизационных камер, а в качестве исполнительного органа несколько регулирующих стержней с системой синхронизации их положения.

Стремление к высоким экономическим показателям современных крупных АЭС вызывает необходимость работы реактора при нагрузках (топлива, замедлителя), близких к предельно допустимым, что противоречит требованию безопасности реактора. Распределение мощности по объему активной зоны обладает большой чувствительностью к локальным возмущениям (перегрузка твэлов, ввод и извлечение из активной зоны инструментов, датчиков и т. п.), что вследствие малых запасов до предельных нагрузок может вызвать аварийную ситуацию. Поэтому необходимо оснастить современные реакторы системой регулирования распределения мощности.

Авторами выполнен тщательный анализ различных структурных схем систем регулирования [1—4], которые условно можно разделить на состоящие из нескольких идентичных зонных регуляторов без искусственных связей между ними; содержащие кроме названных независимых зонных регуляторов еще и дополнительный регулятор интегральной мощности и на системы с искусственными связями между регуляторами.

Выбор числа зон и датчиков. При проектировании системы зонного регулирования необходимо учесть, что наиболее важной функцией ее является регулирование интегральной мощности, причем с качеством не хуже, чем у традиционной системы регулирования. Система не

должна уступать по надежности традиционной системе регулирования. Должны быть соблюдены условия ядерной безопасности.

Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют системы первого типа. Задача облегчается тем, что в настоящее время ядерная техника располагает малоинерционными датчиками внутриреакторного контроля нейтронного потока.

Выбор типа, числа и расположения датчиков, регулирующих стержней и зонных регуляторов, анализ и синтез многосвязной системы регулирования являются узловыми моментами методики проектирования системы зонного регулирования.

Минимальное число зон регулирования определяется числом неустойчивых гармоник [5], максимальное — имеющимися на реакторе стержнями регулирования. Большинство энергетических реакторов обладает достаточно устойчивым распределением мощности и большим числом регулирующих стержней. На число зон и стержней регулирования накладываются также ограничения по максимально допустимой скорости внесения реактивности стержнями автоматической системы, что вызывает необходимость снижения скорости сервоприводов при увеличении числа зон. При использовании нескольких стержней в зоне для каждого локального регулятора потребовалась бы система синхронизации стержней.

Таким образом, число зон регулирования необходимо выбирать, учитывая число стержней, необходимых для автоматического регулирования интегральной мощности (от 4 до 7). В каждом локальном регуляторе следует использовать по одному регулирующему стержню.

Более сложным представляется вопрос о числе и расположении датчиков для локальных регуляторов. Так как датчики должны измерять мощность зоны, которую обслуживает данный регулятор, их максимальное число равно числу топливных каналов в данной зоне, при этом мощность зоны определяется как сумма мощностей каждого канала, регистрируемой соответствующими датчиками.

При стремлении сократить число датчиков следует учитывать, что показания любого датчика в основном зависят от положения ближайших к нему стержней и не соответствуют мощности зоны.

Можно предложить следующую эмпирическую методику определения числа датчиков для зонного регулятора.

1. При номинальном распределении мощности перемещают какой-либо стержень в данной зоне, компенсируя это перемещением стержней в других зонах. Измеряют ответное отклонение мощности зоны по изменению мощности всех или большого числа (20—50) топливных каналов, а также по нескольким (1—10) заранее выбранным датчикам.

2. Эксперимент и измерения повторяются для различных стержней зоны.

3. Определяют максимальную и среднюю погрешности в измерении отклонений мощности зоны по одному, двум, трем и т. д. датчикам относительно этих отклонений, определенных по всем (или большому числу) топливных каналов. Предварительная обработка результатов подобных экспериментов для реакторов типа РБМК представлена в таблице.

4. По заданной статической точности регулирования, пользуясь полученной зависимостью, определяют число датчиков в зоне. Следует напомнить, что определение мощности зоны по n датчикам уменьшает также случайную составляющую погрешности датчиков примерно в \sqrt{n} раз.

Зависимость погрешности от числа датчиков при разбиении на четыре зоны

Число датчиков	Погрешность, %		Число датчиков	Погрешность, %	
	средняя	максимальная		средняя	максимальная
1	35	90	5	1	2
2	12	17	6	1	1
3	3	6	50	≪ 1	≪ 1
4	1,5	3			

Структурная схема и метод расчета. В системе регулирования могут, например, использоваться β -эмиссионные внутриреакторные датчики (особенно предпочтительны датчики с эмиттером из кобальта и платины вследствие своей малой инерционности), а также малогабаритные камеры деления. При разделении реактора на зоны в виде секторов возможно совместное применение внутризонных датчиков и ионизационных камер. Так, в структурной схеме четырехканальной системы зонного регулирования (рис. 1) мощность каждой зоны измеряется датчиками внутри и вне активной зоны. При этом внутриреакторные датчики расположены на границе соседних зон, и поэтому их показания характеризуют мощность двух зон. Этим достигается значительная экономия оборудования, так как при трех датчиках на квадрант их всего восемь. Сигналы от датчиков поступают на усилители сигналов ошибки, где сравниваются с уставкой, вырабатываемой задатчиком мощности, и после усиления поступают на схему управления приводом.

Главное структурное отличие этой системы от традиционного автоматического регулятора мощности — исключение из системы блока синхронизации положения стержней и индивидуальное управление сервоприводами от усилителей ошибки.

Расчет структуры систем, подобных представленной на рис. 1, в первом приближении может выполняться при использовании точечной модели реактора. При этом считается, что все зонные регуляторы подключены параллельно к объекту регулирования с передаточной функцией «точечного» реактора $W_0(S)$. Достоинство этой приближенной методики в том, что она работает и при неидентичных зонных регуляторах. Например, если система регулирования включает в себя m зонных регуляторов с передаточными функциями W_1, W_2, \dots, W_m , то оценку устойчивости многосвязной системы можно проводить по устойчивости эквивалентной одноконтурной системы с передаточной функцией в разомкнутом состоянии:

$$W_{\text{экив}}(S) = W_0(S) \sum_{i=1}^m W_i(S).$$

Как нетрудно видеть, методика одинаково пригодна для анализа линейных систем и систем с релейным управлением привода. В последнем случае для эквивалентной одноконтурной системы применимы все известные методы анализа релейных систем.

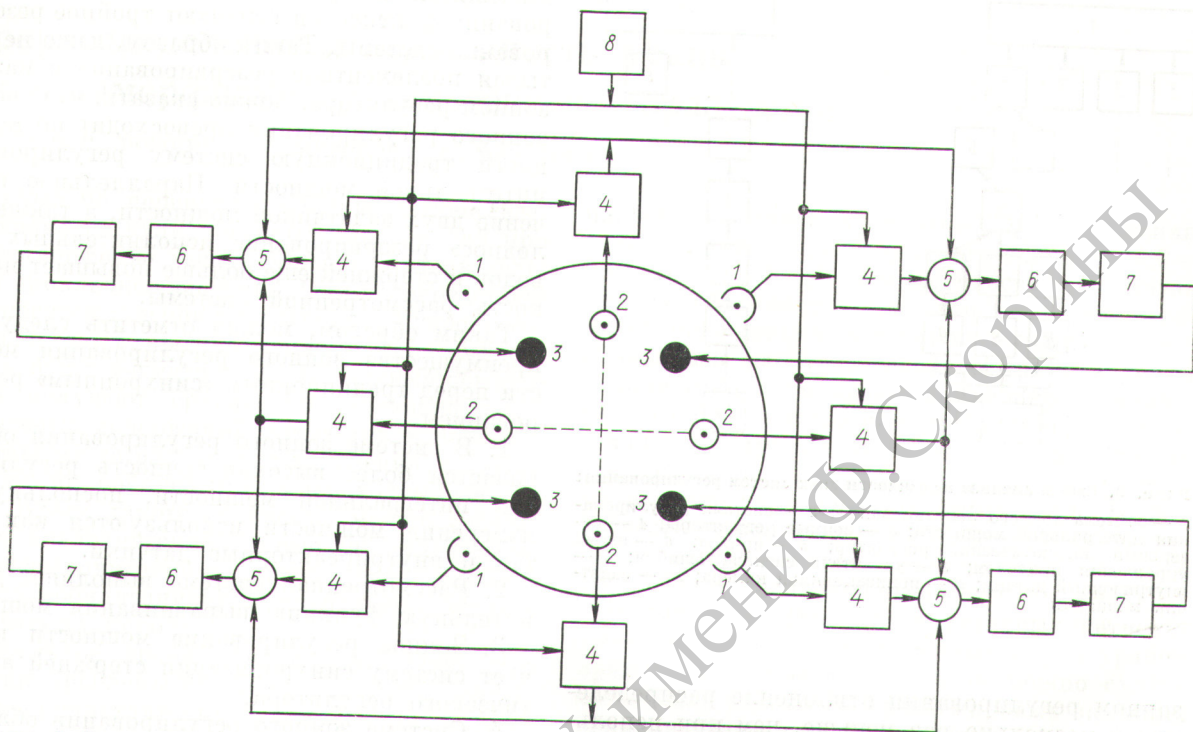


Рис. 1. Структурная схема системы зонного регулирования:

1 — ионизационная камера; 2 — внутриреакторный датчик; 3 — регулирующий стержень; 4 — усилитель сигнала ошибки; 5 — сумматор; 6 — схема управления приводом; 7 — привод; 8 — задатчик мощности

Для изучения систем управления нейтронным полем весьма эффективен метод аналогового моделирования. Схемы и методика расчета моделей нейтронных полей в реакторе приведены в работе [4]. По этой методике, например, построена сеточная модель реактора РБМК, включающая 233 узла сетки и 134 операционных усилителя. Модель позволяет находить оптимальное расположение датчиков и стержней в зоне регулирования, исследовать статические и динамические характеристики систем регулирования нейтронного поля. Например, была исследована четырехканальная система зонного регулирования с безынерционными внутриреакторными датчиками (как на рис. 1). Характеристики элементов контура зонного регулятора выбирались подобными элементам существующей системы регулирования интегральной мощности. Это позволяет реализовать системы зонного регулирования на зарекомендовавшей себя в эксплуатации аппаратуре. При статической точности релейного зонного регулятора 0,5% номинального потока и штатной скорости внесения реактивности время отра-

ботки возмущающих и управляющих воздействий составило 5—7 с, что соответствует быстрейшему воздействию традиционного регулятора интегральной мощности. Эффективность зонного регулирования наглядно характеризует рис. 2, где показано отклонение статического распределения нейтронного потока по диаметру активной зоны AB , проходящему через регулирующие стержни, при подаче возмущения $\Delta K = 0,015 \beta$ в точку C (β — эффективная доля запаздывающих нейтронов). Видно, что при

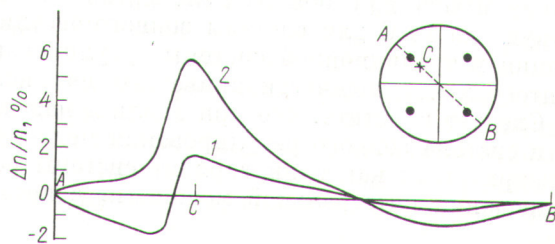
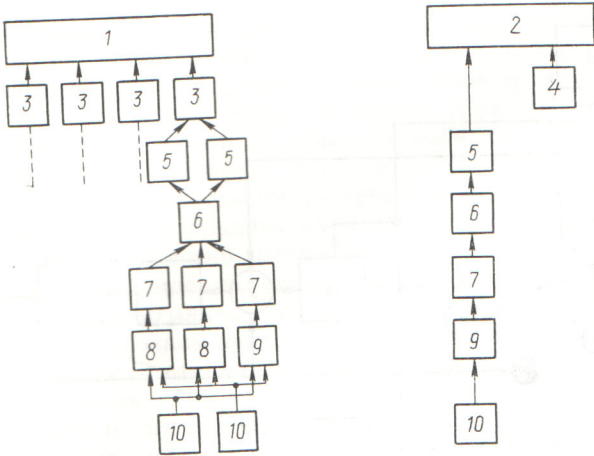


Рис. 2. Отклонение статического распределения нейтронного потока при отработке возмущения системой зонного регулирования (1) и традиционной системой регулирования интегральной мощности (2)



Р и с. 3. Схемы анализа надежности двух систем регулирования: 1 — система зонного регулирования; 2 — система регулирования интегральной мощности; 3 — зонные регуляторы; 4 — резервный автоматический регулятор; 5 — привод; 6 — схема управления приводом; 7 — усилитель сигнала ошибки; 8 — внутризонный датчик; 9 — ионизационная камера; 10 — задатчик мощности

зонном регулировании отклонение распределения в несколько раз меньше, чем при использовании традиционной системы регулирования.

Вопросы надежности системы. По общепринятой методике оценку надежности системы зонного регулирования в сравнении с традиционной системой регулирования интегральной мощности можно провести путем сравнительного анализа их релейно-контактных схем (РКС) [6], которые являются результатом замены функциональных связей элементов в исследуемых системах логическими связями. В РКС электрическими контактами представляются элементы, а проводниками — логические связи между элементами. Например, последовательное соединение нескольких элементов означает, что отказ всей группы элементов произойдет при отказе любого элемента. При параллельном соединении отказ группы элементов — это следствие выхода из строя всех элементов. Соответствующие РКС для системы зонного регулирования и традиционной системы регулирования интегральной мощности приведены на рис. 3.

Следует заметить, что при анализе надежности система зонного регулирования может рассматриваться как один вариант системы регулирования интегральной мощности, в которой

имеющиеся четыре идентичных канала регулирования фактически означают тройное резервирование системы. Таким образом, даже не учитывая поэлементное резервирование в каждом зонном регуляторе, можно сказать, что система зонного регулирования превосходит по надежности традиционную систему регулирования интегральной мощности. Параллельное включение двух задатчиков мощности, а также «холодное» резервирование исполнительных приводов и стержней еще больше повышает надежность рассмотренной системы.

Таким образом, можно отметить следующие преимущества зонного регулирования мощности перед традиционным «синхронным» регулированием.

1. В системе зонного регулирования обеспечивается более высокая точность регулирования интегральной мощности, поскольку для измерения мощности используются как вне-, так и внутривреакторные датчики.

2. Рассмотренная система выполняет дополнительную функцию выравнивания мощности.

3. Зонное регулирование мощности исключает систему синхронизации стержней автоматического регулятора.

4. Система зонного регулирования облегчает работу оператора при перегрузках и подъемах мощности. В стационарном режиме система обеспечивает стабилизацию радиального распределения мощности без участия оператора и, следовательно, подавление азимутальных колебаний распределения мощности.

5. Система зонного регулирования имеет большую структурную надежность по сравнению с традиционной системой регулирования интегральной мощности.

Поступила в Редакцию 23/X 1975 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов И. Я. «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1974, № 3, с. 97.
2. Косилов А. Н., Потапенко П. Т., Тимохин Е. С. «Атомная техника за рубежом», 1975, № 7, с. 17.
3. Филипчук Е. В. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 35, вып. 5, с. 317.
4. Филипчук Е. В. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 37, вып. 2, с. 118.
5. Хитчок А. Устойчивость ядерных реакторов. М., Госатомиздат, 1963.
6. Емельянов И. Я., Клемиш А. И., Поляков Е. Ф. «Атомная энергия», 1974, т. 37, вып. 5, с. 408.