

ИРПД в подкритическом состоянии показаны на рис. 8.1. Большую часть периода пульсации коэффициент размножения меньше единицы, а размножение в импульсе невелико. Поэтому средняя мощность реактора определяется реактивностью между импульсами и слабо реагирует на изменение максимальной реактивности  $\epsilon_m$  в области  $\epsilon_m < 0$ . Энергия основных импульсов быстрее увеличивается с приближением к точке  $\epsilon_m = 0$

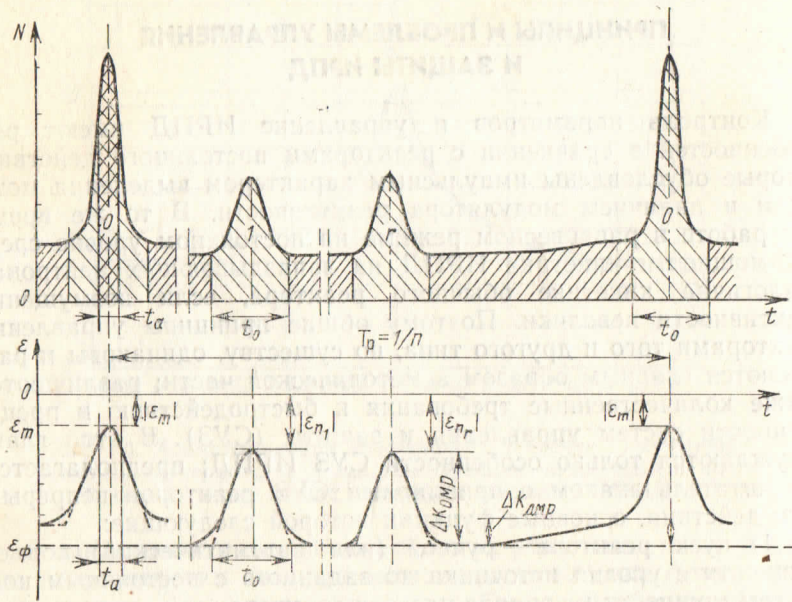


Рис. 8.1. Пульсации реактивности  $\epsilon$  и мощности  $N$  в импульсном подкритическом реакторе:  
0 — основной импульс мощности; 1 — первый побочный импульс; r — r-й (последний) побочный импульс

(мгновенная критичность), однако все же медленнее, чем мощность обычного реактора [обратите внимание на характер зависимости энергии импульсов мощности от максимальной реактивности в формуле (5.42)]. В области  $\epsilon_m > 0$  основные импульсы растут очень быстро с подъемом реактивности.

Неравномерность изменения мощности реактора с ростом реактивности (медленное при  $\epsilon_m < 0$  и быстрое при  $\epsilon_m > 0$ ), низкий уровень мощности в области источника в сочетании с импульсным режимом создают специфические трудности для определения степени подкритичности при пуске и экстраполяции на равновесную импульсную надкритичность.

Полезно вывести количественные соотношения для зависимости средней мощности, мощности основных и побочных им-

пульсов и фона реактора — величин, которые можно регистрировать детекторами нейтронов — от реактивности ИРПД.

Очевидно, что выделяемая за период реактора энергия, деленная на длительность периода (назовем эту величину средней мощностью), складывается из мощности основных импульсов, побочных импульсов и мощности фона:

$$\bar{N} = N_0 + N_{\pi} + N_{\phi}, \quad (8.1)$$

где

$$N_0 = (S + \bar{N}\beta) M(\epsilon_m) n; \quad (8.1a)$$

$$N_{\pi} = (S + \bar{N}\beta) \sum_{i=1}^r M(\epsilon_{ni}) n; \quad (8.1b)$$

$$N_{\phi} = (S + \bar{N}\beta) \frac{1}{|\epsilon_{\phi}|} [1 - (r+1)nt_0], \quad (8.1в)$$

при большой частоте всплеск  $n \geq 1 \text{ с}^{-1}$ ;  $\epsilon_{\phi} = \epsilon_m - \Delta k_{MP}$ . При измерении фона импульсы, очевидно, не учитываются, поэтому при  $N_{\phi}$  введен множитель  $1 - (r+1)nt_0$ . Фактор умножения источника в импульсе  $M(\epsilon_m)$  определен в гл. 5. Выражение (8.1) разрешается относительно  $\bar{N}$ :

$$\bar{N} = S \frac{k_{\pi}}{\beta(1 - k_{\pi})}, \quad (8.2)$$

где

$$k_{\pi} = \beta n \left\{ M(\epsilon_m) + \sum_{i=1}^r M(\epsilon_{ni}) + \frac{[1 - (r+1)nt_0]}{|\epsilon_{\phi}| n} \right\}$$

— импульсный коэффициент размножения; в области  $\epsilon_m < \epsilon_{m0}$  он меньше единицы.

Явные зависимости мощности основных и побочных импульсов и мощности фона от реактивности даются следующими формулами:

$$N_0 = Q_0 n = S \frac{M(\epsilon_m) n}{1 - k_{\pi}}; \quad (8.2a)$$

$$N_{\pi} = S \frac{\sum_{i=1}^r M(\epsilon_{ni}) n}{1 - k_{\pi}}; \quad (8.2б)$$

$$N_{\phi} = S \frac{[1 - (r+1)nt_0]}{|\epsilon_m - \Delta k_{MP}| (1 - k_{\pi})}. \quad (8.2в)$$

Для иллюстрации на рис. 8.2 приведены графики так называемых умножений источника (величин  $N_x/S$ ), рассчитанных для реактора ИБР-2 ( $\beta = 2,3 \cdot 10^{-3}$ ;  $\Delta k_{MP} = 0,04$ ,  $\epsilon_{ni} = \epsilon_{n0} = \epsilon_m - 0,008$ ;  $r = 9$ ;  $n = 5 \text{ с}^{-1}$ ;  $t_0 = 1,414 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ ;  $\alpha v^2 = 1,73 \cdot 10^5 \text{ с}^{-2}$ ).



пульса мощности, которая осуществлялась на первых пусках ИБР (см. рис. 6 из работы [1]).

Если состояние реактора (умножение источника) в начале пуска известно достаточно хорошо, то экстраполяцию на мгновенную и импульсную критичность можно вести по трафарету, построенному в соответствии с истинным ходом функций  $S/N_0$  или  $S/N_a$ . Именно этот способ чаще всего применяется на реакторе ИБР-30.

Определенные трудности при пуске ИРПД создают флуктуации мощности реактора. Рассмотрим ситуацию при измерении интенсивности основных вспышек мощности  $N_0$ . Число делений в подкритическом реакторе за время  $\Delta t$  флуктуирует с относительной дисперсией (см. § 7.1):

$$\Delta_p^2 = \bar{v}\Gamma_2/S\Delta t|\varepsilon|.$$

Следует учесть, что фактическое время замера импульсной мощности  $\Delta t$  на несколько порядков меньше астрономического времени замера  $t_{\text{замер}}$ :

$$\Delta t/t_{\text{замер}} = t_0 n \approx \theta_{1/2} n \ll 1.$$

Статистическая точность замера импульсной мощности определяется как флуктуациями реактора, так и статистикой регистрации нейтронов детектором. Суммарная дисперсия

$$\Delta^2 = \Delta_p^2 + \Delta_{\text{дет}}^2 = \frac{\bar{v}\Gamma_2}{S t_{\text{замер}} \theta_{1/2} n |\varepsilon|} + \frac{1}{N_0 t_{\text{замер}} C_{\text{дет}}}. \quad (8.3)$$

Численные оценки показывают, что при малой частоте импульсов первое слагаемое является определяющим при эффективности детектора  $C_{\text{дет}} > 10^{-4}$  отсчет/деление. Если считать удовлетворительной погрешность замера  $N_0$  3%, то с источником интенсивностью  $S = 10^7$  нейтр./с и  $n = 1$  с<sup>-1</sup> необходимое время замера в подкритическом реакторе при  $|\varepsilon_m| \sim 10^{-3}$  оказывается порядка 1000 с.

В области мгновенной критичности, применяя для  $\Delta_p^2$  формулу (7.4), получаем время замера уже в десять раз больше при  $\tau \approx 10^{-8}$  с, т. е. около 3 ч (!).

Увеличение точности замеров при пуске реактора может быть достигнуто применением более интенсивного внешнего источника нейтронов. Для приближенной оценки необходимого интенсивности источника рекомендуется следующее соотношение, полученное из (8.3):

$$S \geq 10^9/n. \quad (8.4)$$

При такой интенсивности источника обеспечивается 3%-ная погрешность регистрации в пятиминутном замере.

Другая особенность ИРПД — *малый диапазон измерения скорости счета*. Действительно, предельная скорость счета де-

тектора в постоянном потоке частиц без просчетов  $N_{\text{пр}} \sim 10^5$  имп./с; при измерении же импульсной мощности регистрация фактически идет только во время максимума мощности реактора, что приводит к необходимости уменьшить скорость счета до величины порядка  $N_{\text{пр}} \theta_{1/2} n$ . Если считать минимальной скорость счета 10 имп./с (3%-ная погрешность за 5 мин измерений), то диапазон измерения будет примерно  $1:n$ ; при  $n \leq 1$  с<sup>-1</sup> измерения вообще невозможны с принятой нами скоростью счета.

Большой диапазон детектирования будет для мощности фона, так как идет регистрация практически постоянного потока («вырезаются» только основные и побочные импульсы, скважность которых велика). С приближением к импульсной критичности мощность фона меняется в соответствии с ростом интенсивности запаздывающих нейтронов [множитель  $(1-k_n)^{-1}$  в формулах (8.2)]; обратное умножение фона стремится к нулю при  $\varepsilon_m \rightarrow \varepsilon_{m0}$  — импульсной критичности. Экстраполяция на импульсную критичность по фоновой мощности возможна, однако, только из области  $\varepsilon_m > 0$  (см. рис. 8.3).

Вообще говоря, до сих пор еще не найдено вполне удовлетворительного решения проблемы малоинерционной регистрации мощности и экстраполяции на критичность из области источника. Перспективно использование интенсивных источников нейтронов в сочетании с интегрально-токовым методом регистрации частиц в импульсе мощности. На реакторе с высоким уровнем средней мощности в качестве источника можно использовать фотонейтроны бериллия или дейтерия. Можно также применить импульсный генератор нейтронов, запуск которого синхронизирован с модуляцией реактивности. Обычная электростатическая трубка для ускорения ионов дейтерия легко дает на нейтронопроизводящей мишени до  $10^6$  нейтр./имп.; этого достаточно, чтобы зарегистрировать энергию индивидуальных вспышек реактора с хорошей точностью при любой подкритичности.

**Подъем мощности до номинальной.** После выхода на импульсную критичность в реакторе поддерживается любой установленный уровень мощности. Чтобы поднять мощность с уровня источника до номинального значения, надо ввести небольшую избыточную реактивность; начнется экспоненциальный рост, обусловленный накоплением ИЗН.

В соответствии с обычной идеологией разгона реакторов на ИРПД используется логарифмирование сигнала, чтобы расширить область работы детектирующей аппаратуры. Контроль разгона ведется по периоду изменения мощности.

При определении периода разгона ИРПД нельзя не учитывать флуктуации сигналов импульсно-токовых детекторов, регистрирующих вспышки реактора. Флуктуации особенно велики при малом значении мощности [см. формулу (7.5)]. Так,



на ИБР-30 при  $N \sim 1$  Вт среднеквадратический разброс энергии всплеск, обусловленный только стохастическим характером размножения нейтронов, превышает 50%, а при  $N \sim 0,1$  Вт (область импульсной критичности) отдельные импульсы мощности вообще не развиваются. Кроме того, нельзя забывать о статистике регистрации нейтронов детектором и механических флуктуациях реактивности. Поэтому определение периода разгона возможно лишь при усреднении сигнала за некоторый временной интервал. Способы усреднения в принципе такие же, какие рассмотрены в следующем параграфе.

Контроль реактора в логарифмическом диапазоне возможен и по фоновой мощности, которая следует за изменением средней мощности ИРПД. Однако регистрация импульсов мощности все-таки необходима, так как отдельные чрезмерно большие всплески должны быть зарегистрированы ранее, чем их «почувствует» аппаратура, измеряющая усредненный сигнал.

### § 8.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ

**Особенности регулирования мощности.** 1. Как было показано в гл. 5, при малых возмущениях реактивности ( $\Delta \epsilon \leq 10^{-4}$ ) поведение ИРПД аналогично поведению реактора со стационарным потоком, если эффективную долю запаздывающих нейтронов считать примерно на порядок меньше истинной. Поэтому амплитуда всплеска мощности ИРПД очень чувствительна к изменениям реактивности в импульсе, что налагает определенные требования к прецизионности всех элементов системы регулирования.

2. Существенно, что ИРПД — дискретная система. Подход к оценкам возможности и работоспособности системы АР во многом отличается от общепринятого для стационарных реакторов. Например, здесь особенно остро встает вопрос о выборе критерия регулирования. Если в стационарном реакторе значения мгновенной и средней мощностей практически не различаются, то в ИРПД энергия, выделяемая за период (эквивалент мгновенной мощности), может изменяться в несколько раз, в то время как усредненное за много периодов значение этой величины меняется лишь в пределах нескольких процентов.

3. Импульсный характер работы ИРПД определяет высокий уровень флуктуаций, которые ограничивают точность поддержания мощности. При случайном характере возмущения реактивности, когда изменение реактивности в импульсе не зависит от параметров других импульсов мощности, никакая система регулирования не способна уменьшить дисперсию амплитуд (или энергии) всплеск. (Речь идет о системе регулирования, которая изменяет реактивность после очередного всплеска мощности. В принципе можно измерить реактивность (или мощность) еще в начале развития всплески, предсказать

на основании этого измерения и известного характера модуляции реактивности амплитуду всплески и вмешаться в развитие импульса мощности. Но для этого быстродействие исполнительного механизма регулирования должно быть порядка  $10^{-5}$ — $10^{-4}$  с. Пока в литературе описан единственный вариант возможного быстрого регулирования импульсного реактора с использованием сильного внешнего импульсного источника (см. [2]); но такая система в сущности есть бустер, а не

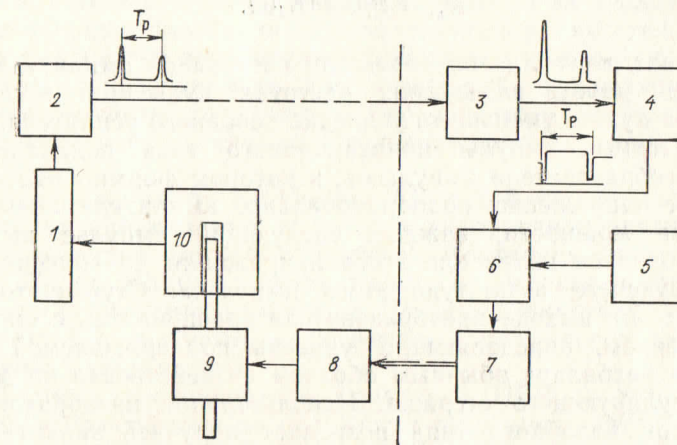


Рис. 8.4. Структурная схема автоматического регулирования мощности реактора ИБР:

1 — ионизационная камера, регистрирующая импульсы мощности реактора (10); 2 — предварительный усилитель импульса тока; 3 — усилитель АР; 4 — преобразователь импульсов; 5 — задатчик мощности; 6 — блок сравнения; 7 — усилитель мощности; 8 — электромеханический усилитель; 9 — привод стержня АР; 10 — реактор

ИРПД.) Более того, вследствие флуктуаций нужно ограничить быстродействие системы регулирования, так как слишком сильная обратная связь уменьшает ее устойчивость.

*Коррелированные флуктуации реактивности* могут быть уменьшены выбором подходящего быстродействия регулирующей системы.

**Принципы регулирования.** Система автоматического поддержания средней мощности в диапазоне от нескольких ватт до нескольких киловатт на первом в мире ИРПД в Дубне показана на структурной схеме рис. 8.4. Детекторами нейтронов служили импульсно-токовые ионизационные камеры, наполненные метаном. Амплитуда импульсов на выходе камер пропорциональна амплитуде импульсов мощности реактора. Входной каскад усилителя обеспечивал линейную передачу сигнала с погрешностью 1% к основному усилителю во всем динамическом диапазоне изменения мощности. В основном усилителе



предусматривалось управляемое изменение коэффициента усиления в 3000 раз. Большой диапазон регулировки коэффициента усиления сигнала объясняется, помимо требования поддержания мощности от 5 до 1000 Вт (200 раз), также необходимостью работы реактора в режимах с разной частотой повторения импульсов — от 83 до нескольких герц. Амплитуда же импульсов при заданной средней мощности обратно пропорциональна частоте их повторения  $n$ :

$$N_m = Q/\theta = \bar{N}/\theta n.$$

Вследствие этого для поддержания постоянной амплитуды сигнала при работе на нижних частотах пульсации мощности реактора нужно уменьшить усиление основного усилителя.

Усиленный импульс ионизационного тока подавался на вход преобразователя импульсов, в котором формировалось постоянное напряжение, пропорциональное амплитуде очередного импульса мощности; каждый следующий импульс вызывал скачкообразное изменение этого напряжения до значения, соответствующего амплитуде этого импульса. Ступенчатое напряжение на выходе преобразователя сравнивалось с опорным напряжением, определяющим уровень поддерживаемой мощности, а разбаланс обычным образом воздействовал на движение регулирующего стержня. Использование преобразователя импульсов подобного типа позволяет получить значительный выигрыш в скорости срабатывания системы по сравнению с интегрирующими элементами на  $RC$ -цепочках [3]. Правда, инерция исполнительного механизма привода АР сводит на нет быстроту реакции электронного тракта системы АР.

В диапазоне рабочих мощностей система АР ИБР функционировала, в общем, удовлетворительно. Работа ее нарушалась при увеличении разброса амплитуд импульсов мощности, вызываемом чаще всего рассинхронизацией подвижных зон реактора.

Для устранения ненужных возмущений системы АР быстрыми колебаниями амплитуд вспышек в принципе возможны два решения: а) формирование сигнала разбаланса с усреднением по нескольким вспышкам реактора и б) введение зоны нечувствительности.

В системе АР реактора ИБР-30 был реализован второй принцип. Сигнал разбаланса оставался равным нулю (т. е. стержень АР был неподвижен), пока амплитуда импульса не отклонялась от среднего уровня более чем на некоторую, наперед заданную величину. Ширина зоны нечувствительности задавалась в зависимости от разброса амплитуд вспышек. Скорость движения стержня АР при выходе сигнала из зоны нечувствительности была постоянной, т. е. использовалась так называемая «релейная» схема регулирования.

При работе ИБР-30 на номинальной мощности система АР не используется — мощность достаточно хорошо поддерживается саморегулированием.

При реализации системы АР ИРПД по первому принципу главной проблемой является способ усреднения.

Автоматическое регулирование реактора SORA построено по тому же принципу, что и описанная ранее система АР ИБР [3, 4]. Здесь амплитуды импульсов усредняются интегрированием сигналов разбаланса, каждый из которых пропорционален разности между энергией реактора за период пульсации и опорным значением, в исполнительном двигателе. Усреднение фактически производится с весовым множителем, который убывает экспоненциально для импульсов, пришедших ранее данного момента, с периодом, определяемым инерционностью исполнительного механизма. Последний импульс имеет наибольший вес.

Как показал А. К. Попов [5], такой способ усреднения оптимален при наличии случайных некоррелированных возмущений реактивности («белый шум»). Критерием оптимальности А. К. Попов выбрал условие минимума дисперсии ожидаемой амплитуды очередного импульса. Весовые множители при усреднении следует выбирать в соответствии с разбросом случайных значений реактивности.

Система регулирования реакторов ИБР и SORA очень проста, и фактически не отличается от общепринятой на реакторах со стационарным потоком. К недостаткам ее следует отнести невозможность регулирования с малой постоянной времени, что необходимо при работе в условиях быстрых коррелированных возмущений реактивности.

Более гибкой (но в то же время технически сложной) является система регулирования на ИБР-2, где усреднение импульсов производится логическим образом. Сигнал разбаланса формируется как разность между опорным напряжением и величиной

$$W_n = W_{n-1} + (A_n - W_{n-1})/k, \quad (8.5)$$

где  $n$  — порядковый номер импульса,  $A_n$  — усиленная амплитуда импульса с камер, пропорциональная энергии  $n$ -й вспышки мощности реактора;  $k > 1$  — постоянный коэффициент, определяющий степень вклада очередного импульса в разбаланс;  $W_0 = 0$ .

Из (8.5) можно получить явное выражение для  $W_n$ :

$$W_n = \frac{A_n}{k} + \frac{A_{n-1}}{k} \left(1 - \frac{1}{k}\right) + \dots + \frac{A_{n-l}}{k} \left(1 - \frac{1}{k}\right)^l + \dots,$$

которое наглядно показывает уменьшение весового множителя для удаленных импульсов мощности. Оператор выбирает  $k$



в зависимости от режима работы реактора ( $k$  изменяется от 4 до 32).

Исполнительным механизмом служит малоинерционный шаговый двигатель. Разумеется, система регулирования ИБР-2 включает в себя как частные случаи, описанные выше. С одной стороны, при  $k=32$  и малой скорости шагового двигателя усреднение осуществляется по многим импульсам и регулирование очень инерционно. Шаговый двигатель позволяет создать и зону нечувствительности. С другой стороны, инерционность этой системы может быть значительно уменьшена по сравнению с реакторами ИБР и SORA. Так, время реакции системы на 10%-ное скачкообразное изменение мощности при  $k=4$  и  $n=50$  Гц равно 0,2 с.

В заключение можно назвать еще один способ усреднения, которое производится самим реактором. Имеется в виду фоновая мощность реактора. Мощность между импульсами пропорциональна интенсивности запаздывающих нейтронов; последняя определяется предысторией реактора за несколько секунд до рассматриваемого момента и нечувствительна к быстрым колебаниям реактивности. Система регулирования по фону реактора предельно близка к обычным неимпульсным системам. Следует только позаботиться об отсекании вспышки нейтронов на детекторе. Однако инерционность этой системы, по-видимому, слишком велика.

### § 8.3. ПРИНЦИПЫ ЗАЩИТЫ ИРПД И КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

**Необходимые и достаточные условия безопасности.** Импульсный характер энерговыделения и глубокая модуляция реактивности в ИРПД вызывают необходимость специального подхода к аварийной защите реактора. В стационарном реакторе поток нейтронов и его изменение во времени, которое характеризует реактивность, постоянно регистрируются. В ИРПД реактивность между импульсами мощности очень низка, что затрудняет получение надежной информации об изменении базового значения реактивности. Будем пока считать, что единственный источник информации о состоянии реактора — интенсивность самой вспышки. Тогда фактическое время реакции аварийной защиты на превышение мощности не может быть меньше периода следования вспышек. Следовательно, для обеспечения ядерной безопасности ИРПД необходимо, чтобы недопустимое возмущение реактивности не могло быть введено за время между соседними импульсами:

$$\Delta \epsilon_{ав} / \gamma > T_p, \text{ или } \gamma < \Delta \epsilon_{ав} / T_p. \quad (8.6)$$

Здесь  $\Delta \epsilon_{ав}$  — такое превышение максимальной реактивности над значением  $\epsilon_{н0}$ , которое приводит к разрушению реактора;  $\gamma$  — скорость ввода неконтролируемой реактивности.

Условие (8.6) дополняется обычным требованием быстрого действия аварийной защиты:

$$\Delta \epsilon_{ав} / \gamma > \tau_{а.з}, \quad (8.7)$$

где  $\tau_{а.з}$  — время реакции аварийной защиты, включающее постоянную времени регистрирующей аппаратуры, время реакции исполнительных механизмов и время вывода аварийных блоков на расстояние, обеспечивающее компенсацию избыточной реак-

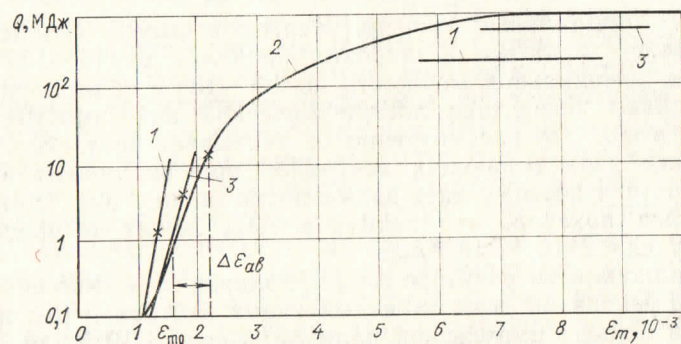


Рис. 8.5. Связь энергии вспышки мощности  $Q$  с максимальной реактивностью (расчет):

1 — для ИБР-30 ( $n=0,5$  Гц); 2 — для ИБР-2 ( $n=5$  Гц); 3 — для реактора SORA ( $n=50$  Гц)

тивности. Условие (8.7) можно заменить более сильным требованием

$$T_p > \tau_{а.з}, \quad (8.8)$$

которое совместно с (8.6) дает достаточное условие безопасности ИРПД. Если контроль состояния реактора возможен и между импульсами мощности, то условие (8.6) не является необходимым, а (8.7) можно рассматривать как необходимое и достаточное условие безопасной работы ИРПД.

**Предельно допустимое превышение реактивности  $\Delta \epsilon_{ав}$ .** Импульсный реактор примерно на порядок более чувствителен к изменению реактивности, чем реактор со стационарным потоком (см. § 5.2). Рисунок 8.5 дает наглядное представление о росте энергии импульсов мощности при вводе избыточной реактивности. Верхний предел энергии вспышки достигается при больших надкритичностях порядка 1%  $k_{эф}$ , когда изменение реактивности в области мгновенной надкритичности подчиняется линейному закону. Избыточная реактивность в больших вспышках гасится главным образом за счет расширения актив-



ной зоны, а не вследствие движения подвижного модулятора реактивности\*.

Допустимый уровень избыточной реактивности определяется по кривой  $Q(\epsilon_m)$  заданием предельно допустимого порогового значения энергии аварийной вспышки  $Q_{ав}$ . В рамках одночечной модели кинетики и для параболической зависимости реактивности от времени вблизи максимума реактивности связь  $\Delta\epsilon_{ав}$  и  $Q_{ав}$  дается выражением\*\*:

$$\Delta\epsilon_{ав} \approx \frac{\epsilon_{m0} \ln(Q_{ав}/Q_0)}{2B - 1/2} = \beta_{н} \ln(Q_{ав}/Q_0). \quad (8.9)$$

Здесь  $Q_0$  — нормальный уровень энергии вспышек. Отношение  $Q_{ав}/Q_0$  может меняться в широких пределах от  $10$ — $100$  при работе на номинальной мощности до  $10^6$ — $10^7$  в области источника. Однако вследствие логарифмической зависимости  $\Delta\epsilon_{ав}$  меняется мало. Это рассмотрение не учитывает увеличения интенсивности запаздывающих нейтронов при аварийном вводе реактивности и поэтому дает завышенную оценку  $\Delta\epsilon_{ав}$ . Детальный анализ показал, что величина  $\Delta\epsilon_{ав}$  лежит в пределах  $(2-10)\beta_{н}$  или  $2 \cdot 10^{-4}$ — $10^{-3} k_{эф}$ .

В стационарном реакторе  $\Delta\epsilon_{ав}$  приближенно можно считать равной эффективной доле запаздывающих нейтронов  $\beta_{эф}$ , которая много больше импульсной доли  $\beta_{н}$ :  $\beta_{эф} \approx 2,3 \cdot 10^{-3}$  для  $^{239}\text{Pu}$  и  $6,5 \cdot 10^{-3}$  для  $^{235}\text{U}$ .

**Скорость ввода избыточной реактивности  $\gamma$ .** Скорость ввода избыточной реактивности при оценке безопасности реактора определяется из анализа возможных неисправностей и отказов в его технологических системах и построения логической цепи последствий этих неисправностей, в одном (или нескольких) звеньях которой возможно возникновение избыточной реактивности. В целом конструкция ИРПД мало отличается от конструкции стационарного реактора на быстрых нейтронах; исключение составляет МР (см. гл. 6). Так что в анализе безопасности ИРПД, как правило, можно ограничиться рассмотрением неисправностей только в системе модуляции реактивности, как наиболее критичной в смысле потенциальной опасности ввода больших реактивностей.

Для ИРПД с высоким уровнем средней мощности специфическим источником быстрых изменений реактивности будут

\* Методы оценки энергии вспышек с учетом быстрых обратных связей см. в гл. 2, а также в книге [6].

\*\* Конкретные численные расчеты для мощных реакторов ИБР-2 и SORA показали, что влияние быстрых обратных связей внутри импульса на его энергию не существенно вплоть до таких аварий, в результате которых происходит плавление всей активной зоны. Поскольку реальные критерии целостности реактора (герметичность оболочки твэлов, температура фазовых переходов в топливе, см., например, [7]) дают такие значения допустимых энергий вспышек  $Q_{ав}$ , при которых до плавления зоны еще далеко, то можно рассчитывать энергию импульса без учета обратных связей внутри импульса.

также эффекты теплового удара в топливе (гл. 3 и § 7.3). Изменения реактивности, однако, едва ли могут превзойти  $\Delta\epsilon_{ав}$  (точнее, это должно быть обеспечено априори выбором номинального уровня мощности реактора).

Итак,  $\gamma_{ав}$  определяется из анализа последствий неисправностей в МР. Например, было оценено, что в ИБР-2 возможная скорость ввода реактивности при некоторых гипотетических поломках МР может достигать  $\gamma = 10^{-2} k_{эф}/\text{с}^{-1}$ , время ввода избыточной реактивности ( $\Delta\epsilon_{ав} = 7 \cdot 10^{-4} k_{эф}$ ) при этом  $\Delta\epsilon/\gamma = 0,07$  с, т. е. меньше промежутка между импульсами мощности  $T_p = 0,2$  с.

Таким образом, условие безопасности (8.6) не выполняется. Из этого примера следует, что в ИРПД иногда недостаточны контроль реактора и защита только по уровню амплитуды импульсов, а тем более по средней мощности реактора.

**Пример недостаточности защиты по превышению уровня мощности.** Наиболее специфична для ИРПД авария, вызванная рассинхронизацией вращения основного и вспомогательных МР. Пусть имеются два модулятора — быстрый, основной (ОМР), и медленный, дополнительный (ДМР). Оба МР при нормальной работе кинематически связаны так, что в момент основной вспышки находятся в положении максимальной эффективности. Предположим, что происходит разрыв кинематической связи, и ДМР начинает тормозиться. Из-за нарушения синхронности вращения ОМР приходит в зону раньше ДМР, и амплитуда основных импульсов падает. Если угол рассогласования в основной вспышке увеличивается, то в первом после основного побочном импульсе он, напротив, уменьшается при торможении ДМР. Через некоторое время после начала торможения произойдет совпадение (полное или почти полное) ОМР и ДМР в активной зоне в момент побочного импульса. К тому времени реактор заметно остынет, и в систему привнесется дополнительная реактивность  $\Delta\epsilon_t$ , которая ранее компенсировалась отрицательным температурным коэффициентом. Избыточная над импульсной надкритичностью реактивность в этом побочном импульсе

$$\Delta\epsilon = -\alpha_{дмр}\varphi^2 + \Delta\epsilon_t,$$

где  $\varphi$  — угол рассогласования ДМР и ОМР, может превзойти  $\Delta\epsilon_{ав}$ . При этом никакого превышения амплитуды основного или побочных импульсов над номинальным уровнем вплоть до последней катастрофической вспышки не наблюдается. При работе реактора на малом уровне мощности роль отрицательного температурного коэффициента исполняет система автоматического регулирования мощности, и картина аварии качественно не изменяется.

Результаты расчетов такой аварии, выполненные А. К. Поповым и А. Д. Роговым, представлены в табл. 8.1 и на рис. 8.6.

**Особенности аварийной защиты ИРПД.** Как было показано выше, время ввода недопустимо большой реактивности при



Таблица 8.1

Данные расчета аварии ИРПД с торможением ДМР

Постоянная времени торможения ДМР, с	60	100	300	1000
Кратность превышения амплитуды побочного импульса над номинальным значением амплитуды основного импульса	15	24	21	7,6
Время с начала торможения до появления аварийного импульса, с	1,6	2	3,2	5,4
Угол рассогласования ДМР и ОМР в аварийном импульсе, град	-3	-0,5	5	-9,6

Примечание. В расчетах принималось  $\omega_{\text{ДМР}}/2\pi=5 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_{\text{ОМР}}/2\pi=50 \text{ с}^{-1}$ ,  $\alpha_{\text{ДМР}}=5 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-2}$ ,  $N=4 \text{ Мвт}$ ,  $A_T=10^{-5} \text{ град}^{-1}$ .

нарушениях работы МР может быть меньше периода следования импульсов мощности при низких частотах модуляции. Отсюда следует, что аварийная защита ИРПД должна действовать не тогда, когда уже началось повышение мощности, а предупреждать разгон реактора. Это достигается введением постоянного контроля тех технологических параметров МР,

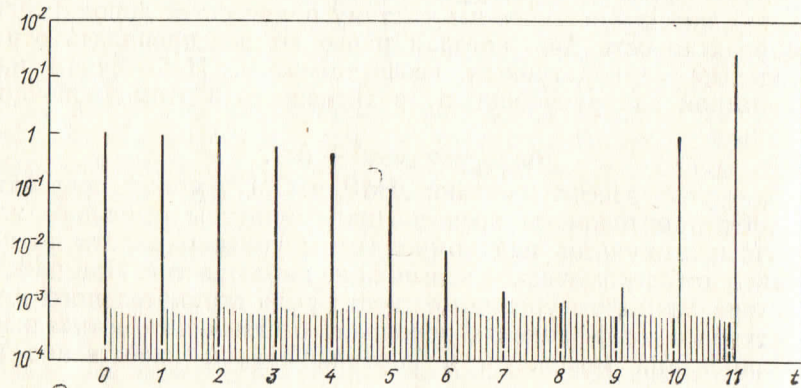


Рис. 8.6. Изменение амплитуды основных (жирные линии) и побочных импульсов мощности реактора (тонкие линии) при экспоненциальном падении скорости вращения ДМР с постоянной времени 100 с. Единица шкалы времени — 0,2 с, амплитуды — номинальный уровень

изменение которых несет потенциальную опасность превышения реактивности. Кроме того, вводится контроль реактивности в побочных импульсах мощности при модуляции двумя или более подвижными элементами. Оценить эту реактивность можно, измерив отношение амплитуды побочных импульсов к фону  $A_{\text{п}}/N_{\text{ф}}$ . Действительно,  $A_{\text{п}}=S/|\epsilon_{\text{п}}|$ , а  $N_{\text{ф}}=S/|\epsilon_{\text{ф}}|$ , откуда

$$\frac{A_{\text{п}}}{N_{\text{ф}}} = \frac{|\epsilon_{\text{ф}}|}{|\epsilon_{\text{п}}|} = \frac{|\epsilon_{\text{ф}}|}{|\epsilon_{\text{ф}}| - \Delta k_{\text{ОМР}}} = \frac{\epsilon_m - \Delta k_{\text{МР}}}{\epsilon_m - \Delta k_{\text{ДМР}}}$$

Значение  $A_{\text{п}}/N_{\text{ф}}$  увеличивается как при повышении базовой реактивности ( $\epsilon_{\text{ф}}$ ), так и при увеличении эффективности МР  $\Delta k_{\text{ОМР}}$ , например при его сдвиге в направлении к активной зоне. Кроме того, при рассинхронизации движения МР, которая рассматривалась выше, реактивность в побочных импульсах тоже изменяется.

Следует отметить, что измерение амплитуды побочных импульсов  $A_{\text{п}}$  без измерения фона не может обеспечить эффективного контроля реактивности. Дело в том, что амплитуда побочных импульсов  $A_{\text{п}}$  зависит не только от реактивности, но и от интенсивности источника запаздывающих нейтронов  $S$ . Последняя же флуктуирует в пределах нескольких процентов от ее среднего значения, в то время как превышение реактивности на величину  $\Delta \epsilon_{\text{ав}}$  дает изменение амплитуды побочных импульсов также на несколько процентов ( $\Delta A_{\text{п}}/A_{\text{п}} \approx \Delta \epsilon/\epsilon = \Delta \epsilon_{\text{ав}}/|\epsilon_m - \Delta k_{\text{ДМР}}|$  и равно  $\sim 10\%$  для ИБР-2 и  $20\%$  для ИБР-30). Поэтому при небольшом снижении уровня средней мощности уже нельзя зарегистрировать превышения реактивности в побочных импульсах. А уменьшить флуктуации среднего уровня мощности до  $1-2\%$  не представляется возможным, когда флуктуации всплеск мощности достигают  $20-30\%$  и даже более.

Контроль технологических параметров МР тем более необходим, что при пуске реактора вследствие больших флуктуаций амплитуд всплеск невозможен быстрый контроль реактивности (периода разгона). Эффективное время реакции аварийной защиты в случае контроля по периоду  $\tau_{\text{а.з}}$  будет определяться постоянной времени усреднения детектирующей аппаратуры и составит по крайней мере несколько секунд, а то десятки и даже сотни секунд (см. § 8.1). Условие (8.7) не будет выполнено.

Несколько слов о быстродействии исполнительных механизмов аварийной защиты. При тех нарушениях в работе ИРПД, которые приводят (или потенциально могут привести) к быстрому изменению реактивности ( $\gamma$  велико), необходима быстрая реакция аварийной защиты. На действующих и вновь создаваемых ИРПД обеспечено значение  $\tau_{\text{а.з}} \sim 0,02 \text{ с}$ , что равно периоду оборота ОМР. Такое быстродействие легко достигается



## Параметры ИРПД, рекомендуемые для контроля системой аварийной защиты

Контролируемый параметр	Допустимое отклонение от среднего значения (относительное)
Амплитуда (или энергия) основного импульса мощности	$\pm x_1$
Средняя амплитуда импульса за некоторое время (или мощность фона или амплитуда побочных импульсов)	$\pm \frac{x_1}{\sqrt{10n_p}}$
Логарифм отношения амплитуды основной вспышки к фону	$\pm 3\delta$
Отношение амплитуды побочного импульса к фону (при малой частоте вспышек)	$\pm x_2$
Период разгона реактора (при пуске)	—
Разброс амплитуд основных вспышек	$\pm x_3$
Частота вспышек	$\pm 0,05$
Положение подвижных модуляторов реактивности относительно активной зоны	$<  x_4 $
Фаза ДМР в основной вспышке (синхронность вращения МР)	$<  x_5 $
Вибрации привода МР	—

Примечание. 1)  $\delta = \Delta \epsilon / \epsilon_{\text{т0}}$  — полуширина флуктуаций реактивности, нормальный уровень; обычно  $\delta = 0,01 - 0,05$ . 2)  $x_1 = \exp(4B\delta) - 1$ ;  $0,2\delta < x_2 < \Delta \epsilon_{\text{ав}} / \Delta k_{\text{ДМР}}$ ,  $x_3 = 0,5B\delta$ .  $x_4$  и  $x_5$  — абсолютные отклонения;  $x_4 = \Delta \epsilon_{\text{ав}} / (dk/dx)$ , где  $dk/dx$  — производная реактивности по смещению МР в направлении к активной зоне;  $x_5 = \sqrt{\Delta \epsilon_{\text{ав}} / \alpha_{\text{ДМР}}}$ .

при использовании гидравлических или пневматических приводов блоков защиты, и даже пружинных приводов.

Отклонение от среднего значения некоторых рабочих параметров установки не влечет за собой опасности чрезмерно быстрого изменения реактивности. В таких случаях вместо того, чтобы приводить в действие сложную систему быстрой защиты, ресурс которой, как правило, невелик, целесообразнее использовать обычную систему блоков АЗ, падающих под действием силы тяжести. Если медленная защита действует одновременно с быстрой защитой (БАЗ), то эффективность последней может быть небольшой — достаточно, чтобы она компенсировала избыточную реактивность  $\Delta \epsilon_{\text{ав}}$ . На ИБР-2  $\Delta k_{\text{БАЗ}} = 4 \cdot 10^{-3}$  и примерно в 4 раза больше, чем  $\Delta \epsilon_{\text{ав}}$ . В табл. 8.2 приведены параметры ИРПД, рекомендуемые для аварийного контроля. Пороги срабатывания даются приближенными формулами.

Естественно, что контроль параметров обычных технологических систем реактора (контур охлаждения, система электропитания и т. д.) также необходим и на ИРПД.

## ГЛАВА 9

## БУСТЕРЫ

В импульсном реакторе периодического действия не удается получить нейтронную вспышку короче 30—40 мкс. Пожалуй, и в будущем не появятся технические возможности создания вспышек такой длительности в реакторе с механической пульсацией реактивности. Ширину нейтронного импульса можно уменьшить, используя реактор на быстрых нейтронах как усилитель внешнего импульсного источника нейтронов. Ядерный реактор, работающий в таком режиме, называют бустером (от английского глагола to boost — поддерживать, помогать, усиливать). Иногда бустер называют размножающей мишенью в отличие от мишени ускорителей из неделящегося вещества, которые тоже используются как источники нейтронов.

Реактор, работающий в бустерном режиме, может иметь постоянную (отрицательную) или модулированную реактивность. В последнем случае реактор называют импульсным бустером; по конструктивному оформлению и техническому оснащению импульсный бустер мало отличается от ИРПД. Чаще всего это — одна установка, способная работать в двух режимах.

## § 9.1. ЭЛЕМЕНТАРНАЯ НЕЙТРОННАЯ КИНЕТИКА БУСТЕРА \*

**Импульс стационарного бустера.** В подкритическом реакторе нейтронный импульс внешнего источника усиливается и затягивается. Выведем соотношение для формы и интенсивности реакторной вспышки в рамках одноточечной модели кинетики. Пусть коэффициент размножения реактора  $k$  постоянен и меньше  $1 + \beta_{\text{эф}}$ , т. е. реактор подкритичен на мгновенных нейтронах, а импульс от внешнего источника нейтронов интенсивностью  $S_s$  и длительностью  $T_s$  имеет прямоугольную форму. Если мощность источника велика, то стохастический характер процесса переноса и размножения нейтронов не проявляется. Тогда каждый нейтрон источника в подкритическом реакторе дает  $\phi_s^* / (1 - k)$  нейтронов во всех последующих поколениях, где  $\phi_s^*$  — ценность нейтрона источника относительно ценности ней-

\* Строгий вывод соотношений кинетики бустера дан в работе [1].