

Выбор эффективности поглощающих стержней для защиты от превышения заданного уровня мощности

А. А. САРКИСОВ, В. Н. ПУЧКОВ, Б. А. МЕЛЬНИКОВ

УДК 621.039.566.8

Большинство используемых алгоритмов аварийной защиты (АЗ) предусматривает экстренное выключение реактора при появлении сигнала о превышении заданного уровня мощности. При этом проявляется два крайне нежелательных эффекта: 1) в конструктивных элементах активной зоны возникают значительные термические напряжения, что отрицательно влияет на их надежность; 2) для восстановления режима работы реактора требуется много времени, что существенно ухудшает маневренность установки.

Известно, что в большинстве случаев срабатывание защиты по сигналу о превышении мощности происходит из-за высвобождения реактивности при выходе из строя системы управления или в результате ошибок, допущенных обслуживающим персоналом.

В ряде случаев, когда высвобождение реактивности обусловлено перемещением органов управления, имеется возможность при достижении некоторого заданного превышения мощности прекратить действие источника возмущения введением блокировки в цепи управления поглотителями. При этом для ликвидации аварийной обстановки вместо выключения реактора можно быстро ввести в активную зону поглощающие стержни, эффективность которых равна величине высвобожденной реактивности. Функционально эти обязанности можно возложить, например, на резервный регулятор (РР), находящийся постоянно в «горячем» резерве. При таком варианте стержни АЗ должны выполнять роль страхующего органа. Для этого порог их срабатывания должен быть несколько завышен.

Основная задача исследования заключалась в определении минимальной эффективности поглощающих стержней, которые обеспечили бы надежную защиту реактора при возмущениях по реактивности во всех случаях, когда эти стержни срабатывают одновременно с прекращением действия источника возмущений. Исследование выполнено на реакторе ИР-100 и на электронной модели кинетики реактора, реализованной на АВМ МН-14.

При проведении эксперимента на ИР-100 в центральный экспериментальный канал помещался поглощающий стержень, который с помощью специального сервопривода извлекался

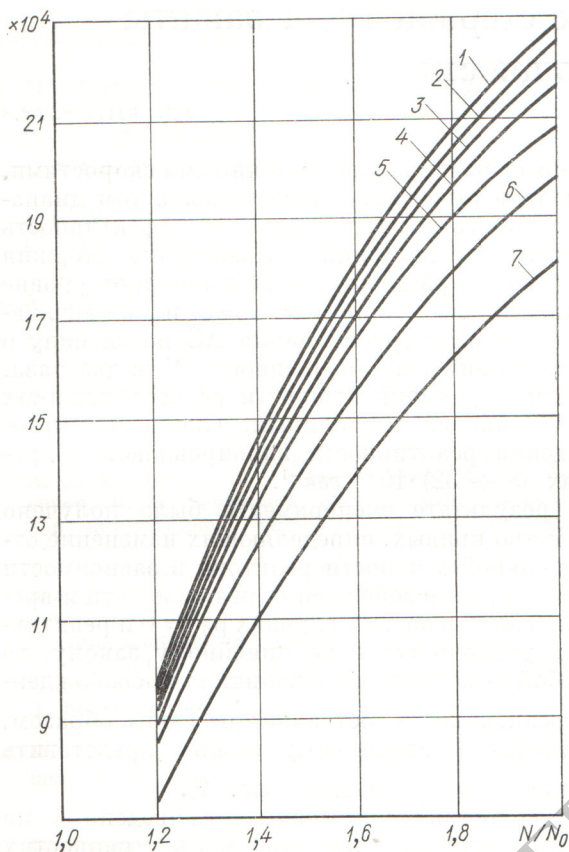
из зоны с различными постоянными скоростями. При этом стержень перемещался в том диапазоне, где его дифференциальная эффективность практически постоянна. Извлечение стержня начиналось при некотором стационарном уровне мощности $N_0 = 0,5N_3 = \text{const}$ и заканчивалось в момент срабатывания АЗ по сигналу о превышении заданной мощности N_3 в два раза. Заданный уровень мощности во всех режимах поддерживался постоянным. Скорость высвобождения реактивности варьировалась в пределах $(8 \div 32) \cdot 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$.

В результате эксперимента было получено семейство кривых, определяющих изменение относительной мощности реактора в зависимости от скорости высвобождения реактивности и времени. Так как во всех случаях $\rho_0 = 0$ и реактивность увеличивается по линейному закону, то в любой момент времени величина высвобожденной реактивности составляет ρt . Таким образом, полученные зависимости можно представить в виде $\rho = f(\dot{\rho}, N/N_0)$ (рис. 1).

Из сопоставления кривых, приведенных на рис. 1, следует, что при малых скоростях высвобождения реактивности величина ρ , соответствующая данному значению N/N_0 , существенно зависит от скорости высвобождения реактивности. По мере увеличения $\dot{\rho}$ эта зависимость принимает характер насыщения и становится более слабой. В связи с этим исследование было продолжено на электронной модели кинетики реактора, что позволило увеличить скорость высвобождения реактивности до $68 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$.

При математическом описании процесса пространственного распределения нейтронов в активной зоне не учитывалось и предполагалось справедливым одногрупповое представление спектра нейтронов. Допустимость такого упрощения в случае исследования переходных процессов при положительных скачках реактивности вплоть до $\Delta\rho = 6 \cdot 10^{-3}$ показана в работе [1]. Дифференциальные уравнения записаны для всех шести групп запаздывающих нейтронов, параметры которых выбраны в соответствии с рекомендациями работы [2] ($\beta = 0,0064$).

Среднее время жизни мгновенных нейтронов было принято равным $5 \cdot 10^{-5} \text{ сек}$. Температур-



Р и с. 1. Зависимость реактивности ρ , высвобожженной на момент увеличения мощности в N/N_0 раз, от скорости высвобождения реактивности $\dot{\rho}$ (сек^{-1}):

1 — $32 \cdot 10^{-5}$; 2 — $28 \cdot 10^{-5}$; 3 — $24 \cdot 10^{-5}$; 4 — $20 \cdot 10^{-5}$; 5 — $16 \cdot 10^{-5}$; 6 — $12 \cdot 10^{-5}$; 7 — $8 \cdot 10^{-5}$.

ная обратная связь не моделировалась, так как исследовались аварийные режимы, обусловленные высвобождением реактивности за счет извлечения из активной зоны органов регулирования. В таких условиях температурный эффект реактивности только смягчил бы аварийную обстановку за счет уменьшения скорости высвобождения реактивности.

Полученные на модели результаты обрабатывались по той же методике, что и экспериментальные данные. Приведенные на рис. 2 кривые также свидетельствуют о том, что начиная с некоторых больших значений $\dot{\rho}$ величина реактивности, высвобожженная на момент достижения порогового значения N/N_0 , практически не зависит от скорости высвобождения реактивности и определяется только значением N/N_0 . Это означает, что в пределе зависимость

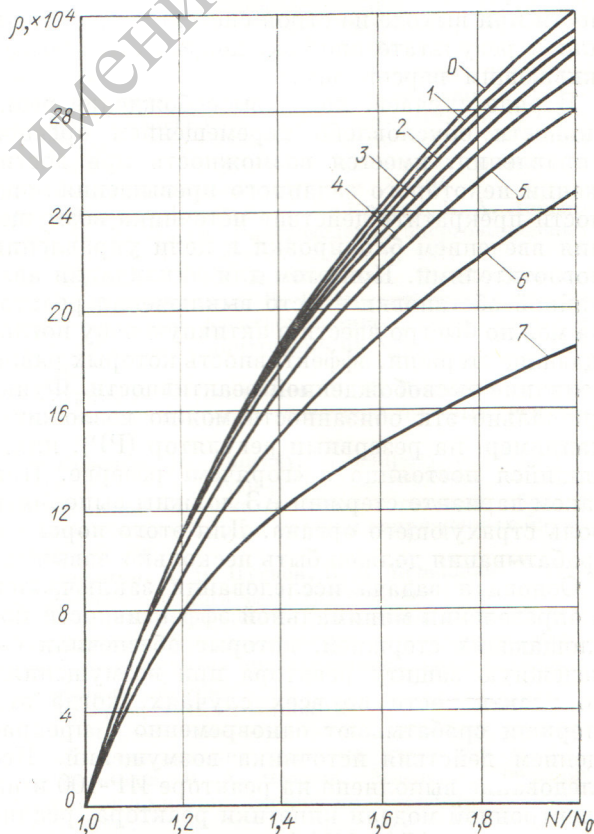
$\rho = f(\dot{\rho}, N/N_0)$ упрощается до соотношения вида $\rho = f(N/N_0)$, которое и представляет наибольший интерес.

Можно показать, что при рассмотрении быстротечных процессов продолжительностью не более 0,1 сек, когда $N_3 = N_0 = \text{const}$, $\rho_0 = 0$ и установка на срабатывание аварийной защиты по мощности не превышает 200—250% N_0 , интересующая нас предельная зависимость имеет вид

$$\rho = \beta (1 - N_0/N). \quad (1)$$

Эта зависимость характеризует максимальную величину реактивности, которая при указанных выше условиях может быть высвобождена в момент достижения порогового значения мощности; она представлена на рис. 2 в виде предельной кривой, обозначенной индексом нуль.

Таким образом, в простейшем случае, когда $N_3 = N_0 = \text{const}$ и $\rho_0 = 0$, эффективность по-



Р и с. 2. Зависимость ρ , высвобожженной на момент увеличения мощности в N/N_0 раз, от скорости высвобождения реактивности $\dot{\rho}$ (сек^{-1}):

0 — Lim; 1 — $68 \cdot 10^{-4}$; 2 — $56 \cdot 10^{-4}$; 3 — $44 \cdot 10^{-4}$; 4 — $32 \cdot 10^{-4}$; 5 — $20 \cdot 10^{-4}$; 6 — $8 \cdot 10^{-4}$; 7 — $2 \cdot 10^{-4}$.

глощающих стержней, необходимая для компенсации избыточной реактивности в рассматриваемой аварийной ситуации, может быть определена из выражения (1).

Однако на практике могут иметь место и более сложные аварийные ситуации, при которых реактивность, высвобожденная на момент увеличения мощности в N/N_0 раз, превышает значение, которое получается из выражения (1). Например, если рассмотренный выше аварийный режим, обусловленный высвобождением реактивности по линейному закону, не ограничивать условием $N_3 = \text{const}$, то при $\dot{N}_3 > 0$ необходимая эффективность поглощающих стержней будет несколько больше, чем в случае, когда $N_3 = \text{const}$. При этом максимальная реактивность, высвобождаемая в момент введения стержней РР, будет тем больше, чем больше скорость увеличения заданного уровня мощности.

Для определения эффективности поглощающих стержней, необходимой для компенсации избыточной реактивности в рассматриваемой аварийной ситуации, можно приближенно аппроксимировать исходные зависимости $N/N_0 = \varphi(\rho, t)$ функцией вида

$$N/N_0 = \exp(k\rho^m t^n). \quad (2)$$

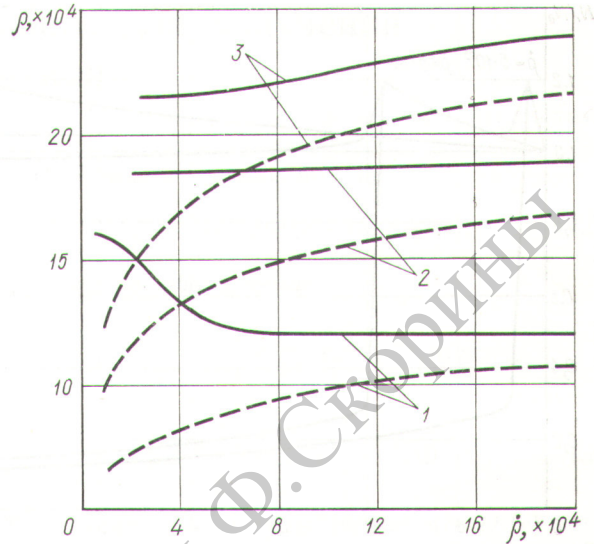
Значения коэффициентов k , m и n определяются составом и структурой активной зоны как функции β , l^* и $\sum_{i=1}^6 \beta_i t_i$.

Эффективность стержней РР определяется как произведение $\dot{\rho}t$, где t — время от начала аварийного процесса до момента введения стержней, которое может быть найдено из соотношения

$$e^{k\rho^m t^n} \frac{N_{30} + \dot{N}_3 t}{N_{30}} = \Delta_{\text{РР}}. \quad (3)$$

Здесь $\Delta_{\text{РР}}$ — уставка на введение стержней РР.

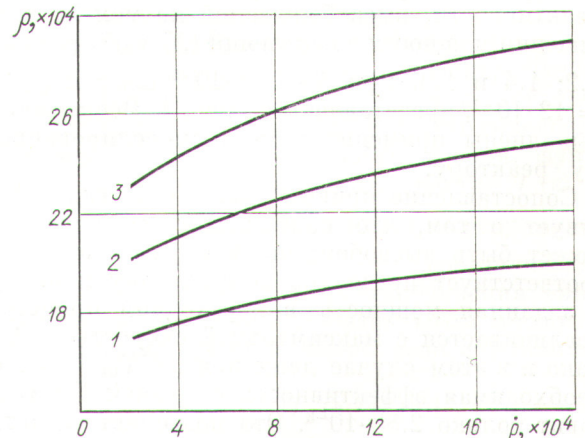
Расчеты по описанной методике были выполнены применительно к смоделированному реактору. При этом скорость увеличения мощности в расчетах принята равной 0,5% в 1 сек. На рис. 3 сплошными линиями представлены результаты вычислений для трех значений $\Delta_{\text{РР}}$ и $\dot{N}_3 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$. Для сопоставления на этом же рисунке штриховыми линиями показаны зависимости $\rho = f(\dot{\rho}, N/N_0)$ при $N_3 = \text{const}$.



Р и с. 3. Зависимость реактивности ρ , высвобожденной при $\dot{N}_3 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$ и $\rho_0 = 0$ на момент введения РР, от величины $\dot{\rho}$ и уставки на срабатывание:

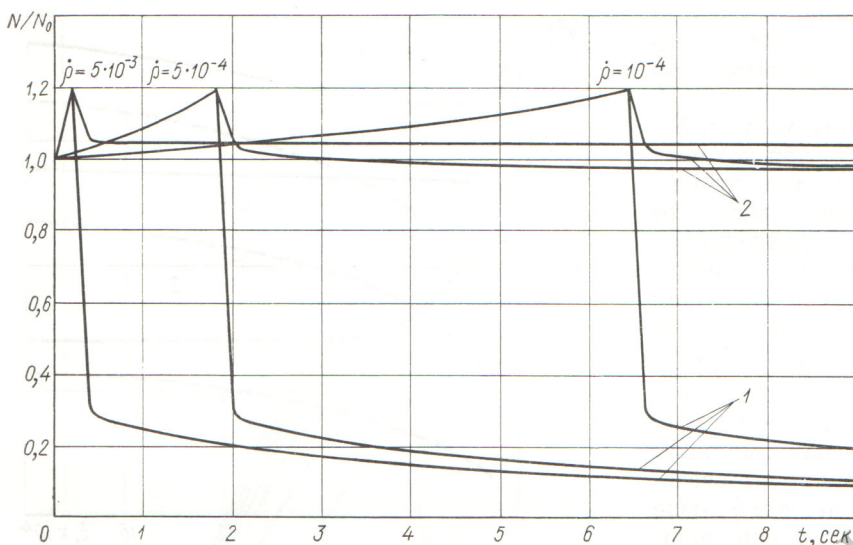
1 — $\Delta_{\text{РР}} = 0,2$; 2 — $\Delta_{\text{РР}} = 0,4$; 3 — $\Delta_{\text{РР}} = 0,6$.

Рассмотренную аварийную ситуацию можно ужесточить, если предположить, что в момент появления разбаланса между N и N_3 реактивность не была равна нулю ($\rho_0 \neq 0$), а соответствовала некоторому значению, обуславливающему разгон реактора с предельно допустимым периодом. В этом случае необходимая эффективность стержней РР может быть определена



Р и с. 4. Зависимость реактивности ρ , высвобожденной при $\dot{N}_3 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$ и $\rho_0 = 12 \cdot 10^{-4}$ на момент введения РР, от величины $\dot{\rho}$ и уставки на срабатывание:

1 — $\Delta_{\text{РР}} = 0,2$; 2 — $\Delta_{\text{РР}} = 0,4$; 3 — $\Delta_{\text{РР}} = 0,6$.



Р и с. 5. Переходные процессы при сбросе поглощающих стержней эффективностью $20 \cdot 10^{-3}$ и $1,1 \cdot 10^{-3}$ (кривые 1 и 2 соответственно).

из равенства

$$\rho_{PP} = \rho_0 + \dot{\rho}t. \quad (4)$$

Время t от начала рассогласования заданной и фактической мощностей, так же как и в предыдущем случае, может быть найдено из соотношения (3), однако значения коэффициентов k , m и n выражения (2) в этом случае должны быть изменены в соответствии с величиной начальной реактивности ρ_0 . Кроме того, значения N_0 и N_{30} при этом берутся не в начале переходного процесса, а в момент превышения N_3 .

Результаты расчетов предельных значений реактивности, высвобождаемой на момент увеличения мощности до значений $(N/N_0)^*$, равных 1,2; 1,4 и 1,6, при $N_3 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$ и $\rho_0 = 12 \cdot 10^{-4}$, представлены на рис. 4. Все расчеты выполнены применительно к смоделированному реактору.

Сопоставление кривых рис. 3 и 4 свидетельствует о том, что наибольшая реактивность может быть высвобождена в случае, когда ρ_0 соответствует предельно допустимому периоду и заданная мощность в переходном процессе увеличивается с максимальной скоростью. Однако и в этом случае даже при $(N/N_0)^* = 1,6$ необходимая эффективность стержней РР составит только $2,88 \cdot 10^{-3}$. Это позволяет сделать вывод о том, что для ликвидации рассматриваемых аварийных ситуаций, обусловленных высвобождением реактивности, могут эффективно использоваться относительно «легкие» поглощающие стержни.

Для иллюстрации преимуществ предложенного способа защиты реактора при возмущениях по реактивности на электронной модели было выполнено две серии расчетов. В обоих случаях из исходного состояния $\rho_0 = 0$ высвобождалась реактивность со скоростями, равными 10^{-4} , $5 \cdot 10^{-4}$ и $5 \cdot 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$. Однако в первом варианте при превышении заданного уровня мощности на 20% сбрасывались «тяжелые» стержни АЗ, суммарный «вес» которых составлял $20 \cdot 10^{-3}$, а во втором — «легкие» поглощающие стержни, эффективность которых составляла $1,1 \cdot 10^{-3}$, она определялась из уравнения (1).

Как видно из рис. 5, в рассмотренных аварийных режимах использование «легких» поглощающих стержней вместо традиционной системы выключения позволяет обеспечить надежную защиту реактора от аварийного превышения заданной мощности при минимальных термических напряжениях. Кроме того, в этом случае срабатывание РР практически не нарушает заданного режима работы энергетической установки.

Поступила в Редакцию 14/VII 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидорова И. И. Аналоговое моделирование в ядерной технике. М., Атомиздат, 1969.
2. Keerin G. et al. Phys. Rev., 107, 1044 (1957).