

# СТАТЬИ

УДК 621.039.50

## УПРАВЛЕНИЕ ГРУППАМИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СУЗ В МАНЕВРЕННОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ВВЭР-1000

Филимонов П.Е., Аверьянова С.П. (РНЦ «Курчатовский ин-т»),  
Филимонова М.П. (МИФИ)

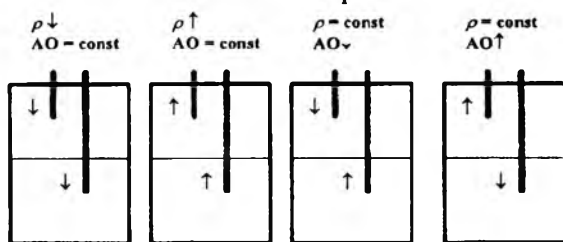
Современные требования к проектным разработкам АЭС с ВВЭР-1000 предусматривают штатные режимы работы реактора в суточном графике нагрузки и регулирования частоты в энергосистеме. Эти маневренные режимы отличаются от базового тем, что реактор работает на фоне непрерывных ксеноновых переходных процессов и соответственно требует непрерывного управления реактивностью и распределением энерговыделения в активной зоне.

Наибольший опыт развития и внедрения маневренности АЭС с PWR (аналог ВВЭР-1000) имеет Франция. Способ управления французских реакторов в маневренном режиме, так называемый алгоритм «мода-Х», основан на использовании нескольких групп рабочих органов СУЗ разной эффективности, которые вводятся в активную зону и перемещаются там в неизменном порядке, установленном по убыванию эффективности групп (менее эффективная группа погружается на большую глубину). Главный принцип «моды-Х» заключается в том, что при введении управляющей группы в разные (по высоте) половины активной зоны появляется возможность воздействия на реактивность и аксиальный офсет (АО) распределения энерговыделения без привлечения борного регулирования, как это схематично показано на рис. 1.

Расчетными исследованиями установлена принципиальная возможность работы ВВЭР-1000 в маневренном режиме с использованием современных алгоритмов управления. Однако для действующих ВВЭР-1000 эта возможность существенно ограничена недостаточным числом рабочих органов СУЗ. Разрабатываемые в настоящее время новые проекты ВВЭР-1000 предусматривают большее число рабочих органов СУЗ, что открывает возможности для применения наиболее современных алгоритмов управления. В связи с этим был разработан способ управления ВВЭР-1000 в маневренном режиме, аналогичный алгоритму «мода-Х», но отличающийся большей универсальностью и ориентацией на автоматическое применение. Предлагаемый способ предусматривает управление положением любого числа управляющих групп рабочих органов СУЗ с помощью двух параметров, для чего на их перемещение в активной зоне накладываются следующие ограничения:

управляющие группы вводятся в активную зону и перемещаются в ней в определенной неизменной последовательности;

дистанция между находящимися в промежуточном положении управляющими группами может изменяться со временем при условии сохранения равенства дистанции для разных групп (здесь и далее дистанция — расстояние по вертикали между концами стержней групп, соседних в их последовательности ввода в активную зону). Опреде-



Р и с. 1. Принцип управления реактивностью ( $\rho$ ) и аксиальным офсетом распределения энерговыделения с помощью управляющих групп

ленная таким образом последовательность управляющих групп далее называется цугом, управление которым обеспечивают два управляющих параметра:

погружение цуга — величина, которая характеризует суммарное количество поглотителя, введенного в активную зону;

дистанция цуга — дистанция управляющих групп в цуге.

Эти параметры цуга однозначно задают положение всех входящих в него управляющих групп.

Пусть управляющие группы цуга перемещаются в неизменной последовательности и пронумерованы в штатном порядке, обратном их вводу в активную зону. Пусть  $H$  — высота активной зоны;  $k$  — число управляющих групп;  $m, n$  — номера управляющих групп, занимающих верхнее и нижнее промежуточное положение в активной зоне соответственно. Следовательно, в управлении реактором участвуют группы  $УГ_1, УГ_2, \dots, УГ_m, \dots, УГ_n, \dots, УГ_k$ . Группы  $УГ_1, \dots, УГ_{m-1}$  находятся вне активной зоны,  $УГ_m, \dots, УГ_n$  занимают промежуточное положение в активной зоне,  $УГ_{n+1}, \dots, УГ_k$  опущены до нижней границы активной зоны. Вес группы  $\alpha_i$  — количество поглотителя в  $УГ_i$ , нормированное на  $УГ_k$ , т.е. отношение количества поглотителя в группах  $УГ_i$  и  $УГ_k$  ( $\alpha_k = 1$ ). Далее принимается, что  $УГ$  упорядочены по убыванию весов ( $\alpha_i \geq \alpha_{i+1}$ ).

Положение группы  $h_i$  — расстояние от нижнего конца поглощающих элементов  $i$ -й группы до нижней границы активной зоны ( $h_i \geq h_{i+1}$ ).

Погружение группы  $l_i = (H - h_i) \alpha_i$  — глубина погружения группы в активную зону, умноженная на вес группы, т.е. величина, пропорциональная суммарному количеству введенного в активную зону поглотителя данной группы (при  $l_i = H$  положение  $УГ_i$  по количеству находящегося в активной зоне поглотителя эквивалентно полному вводу самой «легкой» группы  $УГ_k$ ).

Дистанция групп  $d_i = h_i - h_{i+1}$  для групп  $i$  и  $i + 1$ , находящихся в промежуточном положении (в цуге  $d_i = d_j$  при  $i \neq j$ ).

Дистанция цуга  $d$  — дистанция групп в цуге.

Погружение цуга  $L = \sum_{i=1}^k l_i$  — величина, пропорциональная суммарному количеству поглотителя, введенного в активную зону.

Положение цуга  $z$  — величина, при заданной дистанции  $d$  однозначно определяющая положение всех управляющих групп по следующим формулам:

$$h_k = 0,5 (H + |z - H| - |z|);$$

$$h_{k-1} = 0,5 (H + |z - d - H| - |z - d|);$$

$$h_1 = 0,5 \left( H + |z - (k-1)d - H| - |z - (k-1)d| \right).$$

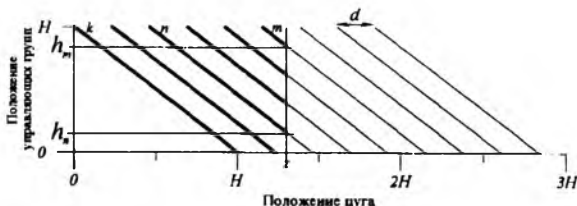
На рис. 2 показана зависимость положений групп  $h_i$  от положения цуга  $z$  при заданной дистанции цуга  $d$ . Положение и дистанция цуга однозначно определяют погружение  $L = F(z, d)$ , где  $F(z, d) = 0,5 \sum_{j=1}^k \alpha_j [H + |z - (k-j)d| - |z - (k-j)d - H|]$ .

При заданных значениях глубины погружения  $L$  и дистанции  $d$  можно однозначно определить положение цуга и, следовательно, положение всех управляющих групп.

Поскольку  $F$  — кусочно-линейная функция, линейность которой нарушается в точках, соответствующих положениям управляющих групп на верхней и нижней гра-

нищах активной зоны, для точного определения положения групп необходимо предварительно найти номера групп, находящихся в промежуточном положении.

Положения цуга, отвечающие положениям управляющих групп на верхней границе активной зоны:



Р и с. 2. Зависимость положений управляющих групп в активной зоне от положения цуга

$$\begin{aligned} z_k &= 0; \\ z_{k-1} &= d; \\ &\vdots \\ z_1 &= (k-1)d. \end{aligned}$$

Номер  $m$  крайней верхней группы, находящейся в промежуточном положении, находится из условия  $F(z_m, d) < L < F(z_{m-1}, d)$ .

Положения цуга, отвечающие положениям управляющей группы на нижней границе активной зоны:

$$\begin{aligned} z_k &= H; \\ d z_{k-1} &= H + d; \\ &\vdots \\ z_1 &= H + (k-1)d. \end{aligned}$$

Номер  $n$  крайней нижней группы, находящейся в промежуточном положении, находится из условия  $F(z_{n+1}, d) < L < F(z_n, d)$ .

После того как для заданных  $L$  и  $d$  определены номера управляющих групп, находящихся в промежуточном положении ( $m, m+1, \dots, n$ ), можно точно определить положения всех групп.

Из того, что  $L = \sum_{i=1}^k l_i$  или  $L = 0 \sum_{i=1}^{m-1} \alpha_i + \sum_{i=m}^n \alpha_i (H - h_i) + H \sum_{i=n+1}^k \alpha_i$ , следует

$$\sum_{i=m}^n \alpha_i h_i = H \sum_{i=m}^n \alpha_i - L. \text{ Окончательное решение:}$$

$$\begin{aligned} h_1 &= H; \\ &\vdots \\ h_{m-1} &= H \\ h_m &= \frac{H \sum_{i=m}^k \alpha_i + d \sum_{i=m}^n (i-m) \alpha_i - L}{\sum_{i=m}^n \alpha_i}; \\ h_{m+1} &= h_m - d; \\ h_{m+2} &= h_m - 2d; \\ &\vdots \\ h_n &= h_m - (n-m)d; \\ h_{n+1} &= 0; \\ &\vdots \\ h_k &= 0. \end{aligned}$$

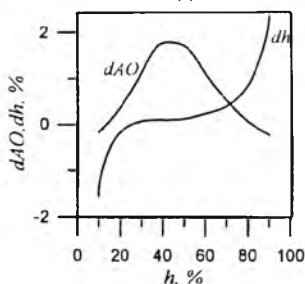
Таким образом, можно свести управление положением произвольного числа управляющих групп к заданию двух параметров цуга: погружению  $L$  и дистанции  $d$ .

Управление способом цуга устанавливает однозначное соответствие между управляющими и управляемыми параметрами: погружение цуга отвечает за управление реактивностью (мощностью), дистанция цуга — офсетом.

Следует отметить, что предположение о поддержании баланса реактивности при сохранении общего количества поглотителя в активной зоне не является достаточно точным. Поскольку дифференциальная эффективность управляющей группы зависит от ее положения в активной зоне, перемещение двух находящихся в различных положениях управляющих групп не обеспечивает полной компенсации реактивности при сохранении общей длины поглощающих элементов в активной зоне.

Для выяснения возможности раздельного управления реактивностью и офсетом были проведены расчеты для серийного ВВЭР-1000 с использованием цуга, состоящего из штатных групп УГ10 и УГ9. Расчеты проводили по программе ИР для реактора 5-го блока Запорожской АЭС в условиях, соответствующих 30 эф.сут в 9-й кампании. Рассчитывали исходное критическое состояние реактора при некотором среднем положении ( $h$ ) управляющих групп цуга, затем конечное с дистанцией цуга, увеличенной относительно исходной на 10%  $H$ , определяли смещение среднего положения групп  $dh$  и изменения офсета  $dAO$ .

По результатам расчетов, представленным на рис. 3, можно заключить, что однозначное воздействие на офсет обеспечивается в широком диапазоне положений групп



Р и с. 3. Характеристики управления цугом, состоящим из двух управляющих групп

и в том числе тогда, когда группы находятся в одной половине активной зоны. Это объясняется тем, что смещение среднего положения управляющих групп, корректирующее реактивность, дополнительно воздействует на офсет, увеличивая эффективность управления. Аналогичные результаты получены при использовании для управления офсетом четырех управляющих групп. При этом качественно характер воздействия не изменился, но его эффективность возросла примерно в 3 раза. Следовательно, если положение цуга «симметрично», т.е. находящиеся в промежуточном положении управляющие группы расположены в разных половинах активной зоны в положениях, близких к симметричным относительно середины высоты активной зоны, то управлять мощностью можно независимо от управления офсетом, как показано на рис. 1. В этом случае изменение погружения цуга вызывает возмущение реактивности при сохранении офсета, изменение дистанции цуга воздействует на офсет без возмущения реактивности. При несимметричном положении цуга существует взаимная зависимость управляющих воздействий: изменение одного из параметров цуга вызывает одновременное возмущение реактивности и офсета. Зависимость увеличивается по мере отклонения цуга от симметричного положения. В общем случае управление реактивностью осуществляется с помощью изменения погружения цуга с коррекцией офсета за счет дистанции цуга, управление офсетом — с помощью изменения дистанции цуга с коррекцией реактивности за счет погружения цуга.

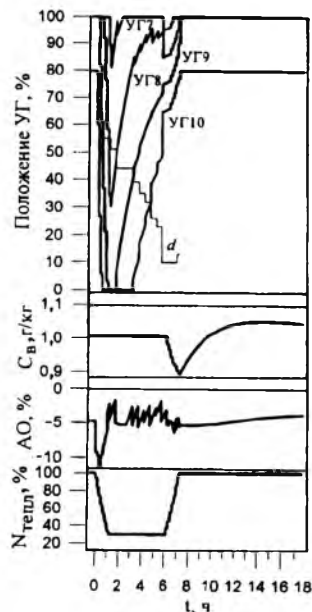
Таким образом, предлагаемый способ управления цугом обеспечивает возможность однозначного управления офсетом и реактивностью в широком диапазоне положений групп рабочих органов СУЗ при использовании минимального числа управляющих параметров.

Способ управления цугом реализован в виде модуля автоматического задания положений управляющих групп в программе ИР. На рис. 4 представлены результаты расчетного моделирования с помощью программы «Имитатор реактора» типичного маневра мощностью ВВЭР-1000 при использовании управления цугом. Применяли управляющие группы из штатной последовательности, веса которых были заданы в

соотношении 1:1,3:1,7:2. В ходе управления решали задачу минимизации возмущения офсета при минимальном борном регулировании. Анализ показывает, что способ управления цугом позволяет эффективно управлять высотным распределением энерговыделения в ходе маневра мощности.

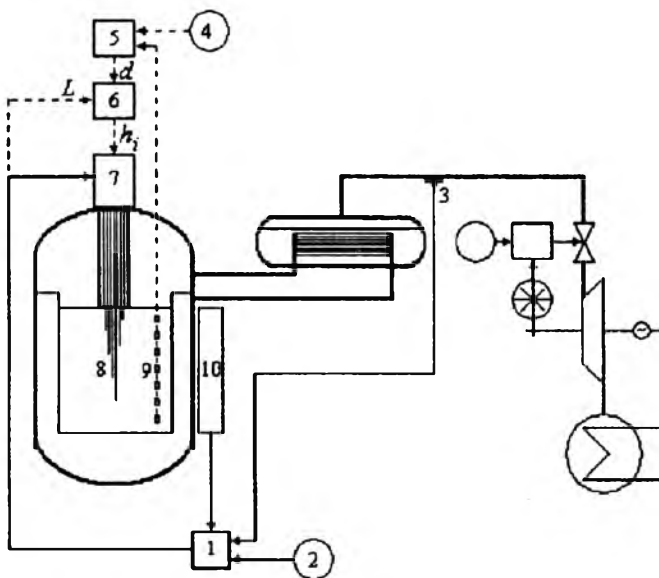
Предложенный способ может быть использован непосредственно для управления реактором. Для этого система СУЗ должна быть дополнена специально разработанным устройством — автоматическим задатчиком положения групп (АЗПГ). На вход задатчика подаются сигналы, соответствующие погружению цуга ( $L$ ) и дистанции групп ( $d$ ), на выходе формируются сигналы, соответствующие положению каждой группы ( $h_i$ ). Выходные сигналы подаются на привод рабочих органов СУЗ, и они перемещаются в необходимые положения. В режиме ручного управления оператор, исходя из необходимости изменения мощности реактора и высотного распределения энерговыделения, вводит в АЗПГ новые значения параметров  $L$  и  $d$ . Принцип автоматического регулирования — поддержания постоянных заданных значений мощности и офсета представлен на рис. 5.

По используемой в настоящее время схеме сигнал АРМ — автоматического регулятора мощности 1 поступает на привод 7, как это показано на рисунке сплошной линией. Пунктирными линиями показана предлагаемая схема совместного регулирования мощности и офсета, в которой



Р и с. 4. Характеристики маневра мощностью 100—30—100%  $N_{\text{ном}}$

вводится автоматический регулятор офсета (АРО) 5. По согласованию заданного 2 и измеренного параметра, по которому регулируется мощность реактора (давление пара 3 или нейтронная мощность 10), в АРМ формируется сигнал на движение управляющих групп, который в данном случае интерпретируется как сигнал на изменение параметра  $L$ , новое значение которого направляется на вход АЗПГ 6. По согласованию заданного 4 и измеренного с помощью датчиков внутриреакторного контроля 9 офсета в АРО формируется сигнал на изменение параметра  $d$ , новое значение которого направляется на вход АЗПГ. По входным сигналам  $L$  и  $d$  АЗПГ вырабатывает и подает на привод рабочих органов СУЗ выходные сигналы, соответствующие новым положениям управляющих групп. Привод переводит рабочие органы СУЗ 8 в новые положения. Совокупность регуляторов АРМ, АРО и задатчика АЗПГ можно рассматривать как единый автоматический регулятор офсета и мощности.



Р и с. 5. Регулирование мощности и аксиального офсета энерговыделения