

Динамика автоматического пуска ядерного реактора

Б. Г. ВОЛИК, Н. А. ДОЛГИНОВА, М. М. СОЛОВЬЕВ

УДК 621.039.514.2

Для управления мощностью реакторов широко используется система автоматического регулирования [1]. Отличительная особенность системы — релейная связь между двумя управляющими органами: стержнями автоматического регулирования (АР) и компенсирующими стержнями (КС).

Использование подобной системы регулирования в режиме пуска реактора (под пуском понимается перевод реактора из подкритического состояния на некоторый заданный уровень мощности) вызывает нежелательные динамические эффекты, в том числе резкое изменение обратной величины периода, которое необходимо учитывать при проектировании приводов управляющих стержней и защиты реактора. Схема системы автоматического пуска реактора по обратной величине периода показана на рис. 1.

Динамика такой нелинейной системы исследовалась на аналоговой вычислительной машине методом моделирования по участкам с изменяющимися масштабами переменных [2]. Этот метод дает наиболее точные результаты при моделировании процессов пуска с большим диапазоном изменения мощности (8—10 декад).

Система регулирования пуска реактора описывается следующими уравнениями.

1. Уравнения кинетики:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dn}{d\tau} &= \frac{\Delta k}{l} n - \frac{\beta}{l} k_{эфф} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i + s; \\ \frac{dc_i}{d\tau} &= \frac{\beta_i}{l} k_{эфф} n - \lambda_i c_i, \quad i = 1, \dots, 6, \end{aligned} \right\} (1)$$

где $n(\tau)$ — плотность нейтронов; $c_i(\tau)$, λ_i — концентрации и постоянные распада излучателей запаздывающих нейтронов группы i ; β_i — доля запаздывающих нейтронов группы i ; $\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$ — полная доля

запаздывающих нейтронов; l — среднее время жизни мгновенных нейтронов; $k_{эфф}$ — эффективный коэффициент размножения нейтронов; $\Delta k = k_{эфф} - 1$; s — интенсивность посторонних источников нейтронов.

2. Уравнения приводов управляющих стержней:

$$T_{дв} \frac{d^2 x_{AP}}{d\tau^2} + \frac{dx_{AP}}{d\tau} = K_1 \Delta \frac{1}{T}; \quad (2)$$

$$V_{КС} = K_2 U_0(x_{AP}), \quad (3)$$

где x_{AP} — положение стержней АР; $\Delta \frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}$ — согласование между заданным и истинным значениями обратной величины периода; $V_{КС}$ — скорость перемещения компенсирующих стержней; K_1, K_2 — коэффициенты пропорциональности; $U_0(x_{AP})$ — характеристика реле включения привода стержней КС в функции положения стержней АР (см. рис. 1). Зависимость реактивности, вносимой стержнями, от их положения принималась линейной с коэффициентами K_{AP} и $K_{КС}$.

3. Уравнения периодомера:

$$T_{п} \frac{d\tilde{n}}{d\tau} + \tilde{n} = K_{п} \frac{dn}{d\tau}; \quad (4)$$

$$\frac{1}{T} = \frac{\tilde{n}}{n}, \quad (5)$$

где \tilde{n} — измеренная производная плотности нейтронов; $T_{п}, K_{п}$ — постоянная времени и коэффициент усиления периодомера.

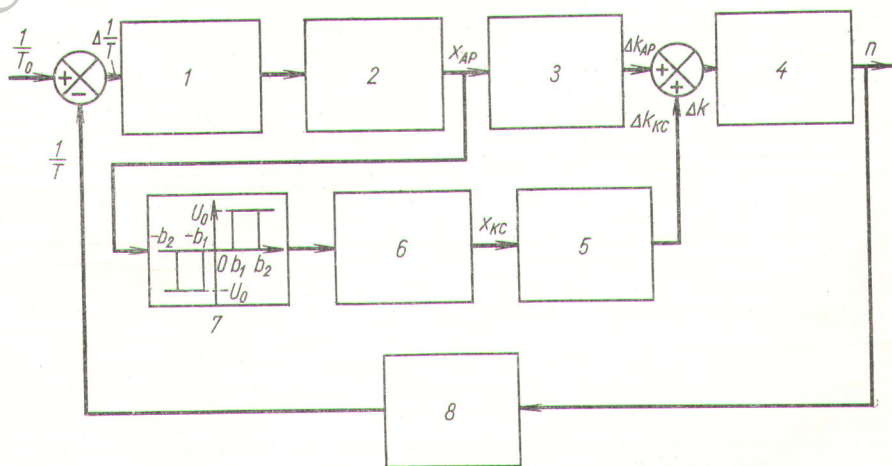


Рис. 1. Блок-схема системы автоматического пуска реактора по обратной величине периода.

1 — блок коррекции; 2 — привод АР; 3 — стержни АР; 4 — реактор; 5 — стержни КС; 6 — привод КС; 7 — реле КС; 8 — блок формирования обратного периода.

В процессе разгона реактора (рис. 2) можно выделить три характерных участка: выход реактора на заданное значение обратной величины периода $1/T_0$; поддержание заданного значения обратной величины периода $1/T = 1/T_0$; окончание пуска — выход на $1/T = 0$.

Заслуживают внимания первый и второй участки пуска, на которых имеют место резкие отклонения обратной величины периода $1/T$ от заданного значения $1/T_0$. На первом участке отклонения $1/T$ возникают при подходе к критическому состоянию, а на втором участке — при релейном включении привода КС. Объясняется это тем, что при включении КС вносится избыточная реактивность, которую стержни АР не в состоянии быстро скомпенсировать из-за конечного быстродействия привода стержней АР и наличия гистерезиса в характеристике реле управления КС (см. рис. 1).

Из выражений (1), (4) при малом T_{II} следует, что

$$\frac{1}{T} = \frac{\tilde{n}}{n} \approx \frac{1}{l} \Delta k - \frac{\beta}{l} k_{эфф} + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \frac{c_i}{n} + \frac{s}{n}. \quad (6)$$

При анализе процессов изменения $1/T$ все члены уравнения (6), не содержащие Δk , можно принять постоянными.

Из выражения (6) следует, что при этом величина $1/T$ изменяется так же, как и величина

Δk , и существенно зависит от среднего времени жизни нейтронов, т. е. от типа реактора. Так, при одинаковых изменениях реактивности Δk отклонения $1/T$ в реакторе на промежуточных нейтронах ($l = 10^{-5}$ сек) на два порядка выше, чем в реакторе на тепловых нейтронах ($l = 10^{-3}$ сек).

Указанная особенность динамики системы автоматического пуска должна быть учтена при выборе значений уставок системы регулирования обратной величины периода $1/T_0$ и системы защиты по периоду ($1/T_{защ}$).

В тех редких случаях, когда время пуска реактора не имеет существенного значения, следует выбирать уставку $1/T_0$ значительно меньше, чем $1/T_{защ}$. Это позволит избежать ложных срабатываний защиты по периоду. В большинстве же случаев эксплуатации реакторов стремятся сократить время пуска. В связи с этим рассмотрим различные способы снижения величины выбросов $1/T$, которые дают возможность приблизить значение уставки $1/T_0$ к $1/T_{защ}$ и тем самым сократить время пуска.

Меры по снижению отклонений $1/T$ можно разделить на две группы: 1) меры по сокращению длительности отклонений $1/T$; 2) меры, приводящие к изменению формы отклонений $1/T$. К первой группе относятся меры по увеличению коэффициента усиления привода АР, а также по увеличению коэффициента возврата

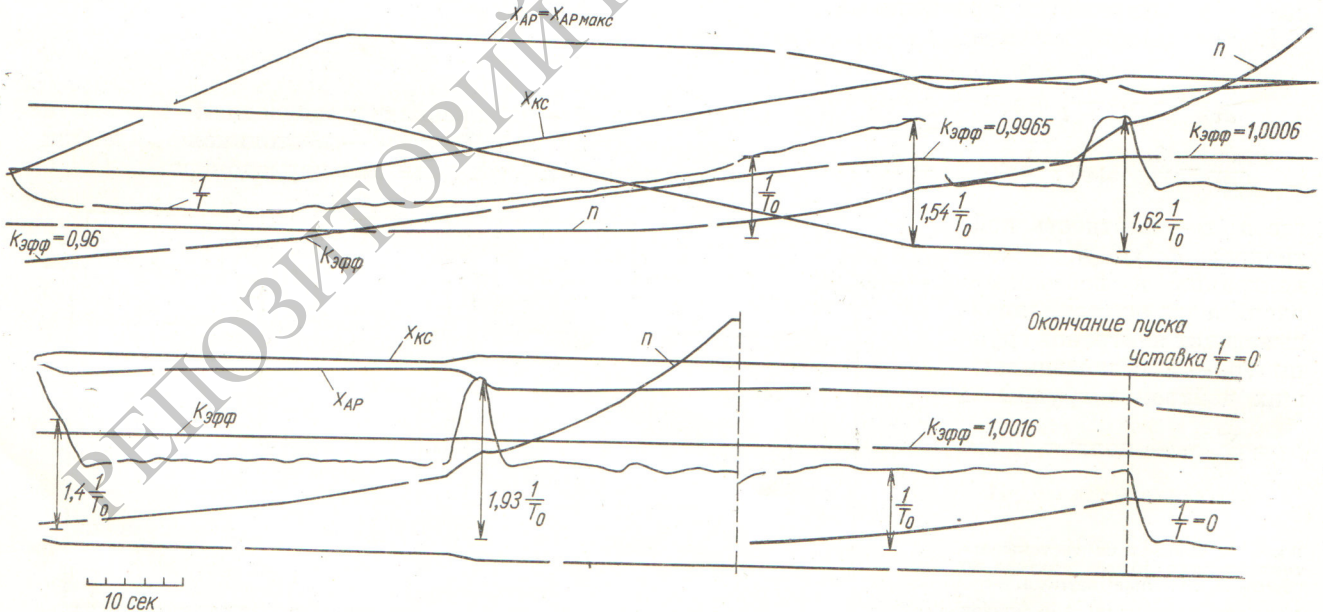


Рис. 2. Оциллограмма процесса пуска реактора (показаны три декады нарастания мощности): $x_{АР макс}$ — положение стержня АР на верхнем упоре; $x_{КС}$ — положение стержней КС.

характеристики реле включения КС путем сближения точек включения (b_2) и выключения (b_1) привода КС. Как это следует из выражения (6) и рис. 2, амплитуда отклонения $1/T$ при релейном включении двигателя КС определяется крутизной переднего фронта нарастающего отклонения. Поэтому меры первой группы слабо влияют на амплитуду отклонений $1/T$, хотя и сокращают их длительность. Помимо этого, увеличение коэффициента усиления приближает систему регулирования пуска к границе возникновения автоколебаний, а увеличение коэффициента возврата реле КС $m = \frac{ob_1}{ob_2}$ снижает эффективность использования стержней АР, превращая их в предельном случае ($m \rightarrow 1$) в простое переключающее устройство компенсирующих стержней.

Изменение формы кривой $1/T$ (τ) достигается включением фильтров в цепь измерения обратного периода, а также применением корректирующих звеньев в прямой цепи системы регулирования. Фильтр вида $W_\phi = \frac{1}{T_\phi s + 1}$ в цепи измерения обратного периода сглаживает отклонения $1/T$ и снижает их амплитуду (особенно при совместном применении мер как первой, так и второй группы). Однако при этом возникают два существенных ограничения. Во-

Влияние различных способов улучшения параметров автоматического пуска на отклонения обратной величины периода

Коэффициент усиления привода АР	Постоянная фильтра T_ϕ , сек	Коэффициент возврата реле m	Корректирующее звено W_K	Максимальное значение отклонения $1/T$, сек ⁻¹
K'	1	0	—	$\frac{1}{15,5}$
	1	0,8	—	$\frac{1}{15,6}$
	10	0	—	Возникают автоколебания
	10	0,8	—	То же
$2K'$	1	0	—	$\frac{1}{18,6}$
	1	0,8	—	$\frac{1}{19,5}$
	10	0	—	$\frac{1}{19,5}$
	10	0,8	—	$\frac{1}{21,2}$
	6	0	$\frac{1+10s}{1+s}$	$\frac{1}{25}$

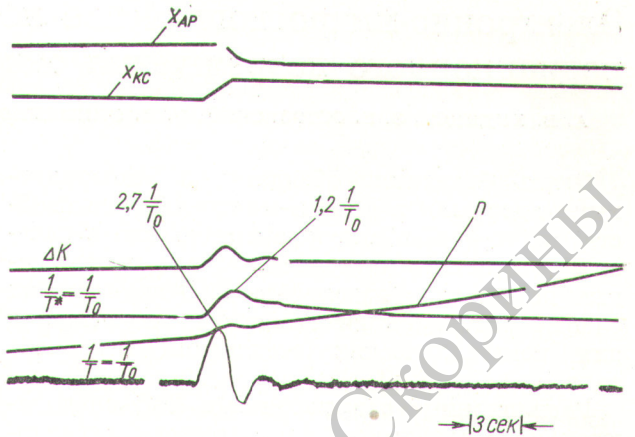


Рис. 3. Оциллограмма переходного процесса в системе с фильтром в цепи измерения $1/T$ и корректирующим звеном в прямой цепи при включении привода КС ($1/T^*$ — значение обратного периода после фильтра).

первых, при включении фильтра увеличивает время формирования аварийного сигнала в случае действительной аварии в реакторе. Во-вторых, значение постоянной времени фильтра T_ϕ ограничено сверху, так как включение апериодического звена W_ϕ приближает систему регулирования пуска к границе возникновения автоколебаний. Весьма эффективным оказалось применение корректирующих звеньев с дифференцирующими свойствами в прямой цепи контура регулирования обратного периода. Так, коррекция вида $W_K = K_K \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1}$, $T_1 > T_2$, при наличии фильтра и одновременном увеличении коэффициента усиления привода АР позволяет обеспечить необходимую степень устойчивости и существенно снижает отклонения обратной величины периода (рис. 3).

Для сравнительной оценки влияния различных способов улучшения динамики пуска в таблице приведены результаты исследований для системы с параметрами: $l = 10^{-5}$ сек; $\lambda_1 = 0,288$ сек⁻¹; $\lambda_2 = 0,0263$ сек⁻¹; $\beta_1 = 0,00612$; $\beta_2 = 0,00213$; $s = 10^2$ нейтр/см²·сек; $T_{дв} = 0,2$ сек; $T_0 = 30$ сек; $T_{п} = 1$ сек; $K' = K_1 K_{АР} = 1,4 \cdot 10^{-2}$ ед; $K'' = K_2 K_{КС} = 1,52 \cdot 10^{-3}$ ед/сек; $K_{п} = 10$.

Поступила в Редакцию 16/XII 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Ш у л ь ц. Регулирование энергетических ядерных реакторов. М., Изд-во иностр. лит., 1957.
2. Б. Я. К о г а н. Электронные моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования. М., Физматгиз, 1963.