



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

13-85-840

А.К. Попов

УСТОЙЧИВОСТЬ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА
ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

1985

УСТОЙЧИВОСТЬ РЕАКТОРА

Для импульсного реактора периодического действия, импульсы мощности которого допустимо описывать дельта-функциями, частотная импульсная передаточная функция имеет вид:

$$W_R^*(j\omega) = \frac{e^*(j\omega)}{x_3^*(j\omega)}$$

/1/

1

$$1 \cdot k_{xP} P^0 T \sum_{i=1}^3 \frac{\nu_{i1}}{T_{i1}} \frac{\exp(-T/T_{i1})}{\exp(j\omega T) - \exp(-T/T_{i1})} - \frac{1}{\sigma} \sum_{i=1}^2 \frac{\mu_{i1}}{T_{i1}} \frac{\exp(-T/T_{i1})}{\exp(j\omega T) - \exp(-T/T_{i1})}$$

Она показывает, какова на разных частотах связь между огибающими дискретных входной и выходной величин, когда эти огибающие синусоидальные. Входной величиной является отклонение задающей реактивности x_3^+ /реактивности, обусловленной органами управления/, выходной - отклонение энергии импульсов мощности e^* от их базовых значений. В качестве базовых приняты значения переменных, соответствующие базовому режиму работы реактора - режиму со стабильными импульсами мощности. Отклонение реактивности выражено в импульсных долях запаздывающих нейтронов β_{i1}^* , а отклонение энергии импульсов - в долях энергии, выделенной в импульсе мощности в базовом режиме. Формула /1/ записана для случая аппроксимации шести групп запаздывающих нейтронов двумя эквивалентными, и в ней введены следующие обозначения: ω - частота огибающих входного и выходного сигналов; T - период следования импульсов мощности; $e^*(j\omega)$, $x_3^*(j\omega)$ - Фурье-изображения дискретных функций времени $e^*(t) = \sum_{n=0}^{\infty} e_n \delta(t - nT)$, $x_3^*(t) = \sum_{n=0}^{\infty} x_{3n} \delta(t - nT)$, где δ -

дельта-функция, t - время, $e_n = e(t = nT)$, $x_{3n} = x_3(t = nT)$; k_{xP} , $T_{из} = T_{xP}$ - коэффициент передачи от мощности к реактивности и постоянная времени мощностной обратной связи, описываемой инерционным звеном ²; P^0 - средняя мощность реактора; μ_{i1} , ν_{i1} , T_{i1} /кроме $T_{из}$ / - константы, зависящие от параметров двух эквивалентных

групп запаздывающих нейтронов; $\sigma = \sum_{i=1}^2 \frac{\mu_{i1}}{T_{i1}} \cdot \frac{1}{\exp(T/T_{i1}) - 1}$.

* Это понятие введено в работе 1.

Для исследования устойчивости удобно рассматривать передаточную функцию /1/ в виде

$$W_R^*(j\omega) = \frac{1}{1 + W_{\text{раз}}^*(j\omega)}, \quad /2/$$

т.е. рассматривать реактор как замкнутую импульсную систему с отрицательной обратной связью. В этом случае частотная импульсная передаточная функция разомкнутой системы $W_{\text{раз}}^*(j\omega)$, как следует из /1/ и /2/, имеет вид:

$$W_{\text{раз}}^*(j\omega) = k_{\text{хр}} P^{\circ} T \sum_{i=1}^3 \frac{\nu_i}{T_{\text{и}i}} \cdot \frac{\exp(-T/T_{\text{и}i})}{\exp(j\omega T) - \exp(-T/T_{\text{и}i})} - \frac{1}{\sigma} \sum_{i=1}^2 \frac{\mu_{\text{и}i}}{T_{\text{и}i}} \cdot \frac{\exp(-T/T_{\text{и}i})}{\exp(j\omega) - \exp(-T/T_{\text{и}i})} \quad /3/$$

Мнимая составляющая ее обращается в нуль лишь при частоте, равной 0 и π/T . Согласно аналогу критерия устойчивости Найквиста для импульсных систем /3/, реактор будет устойчив при условии

$$W_{\text{раз}}^*(j\pi/T) > -1. \quad /4/$$

Из выражений /3/ и /4/ следует, что реактор будет устойчив при средней мощности, меньшей некоторого граничного значения

$$P^{\circ} < P_{\text{гр}}^{\circ}, \quad /5/$$

где

$$P_{\text{гр}}^{\circ} = \frac{\frac{1}{\sigma} \sum_{i=1}^2 \frac{\mu_{\text{и}i}}{T_{\text{и}i}} \cdot \frac{1}{\exp(T/T_{\text{и}i}) + 1} + 1}{k_{\text{хр}} T \sum_{i=1}^3 \frac{\nu_i}{T_{\text{и}i}} \cdot \frac{1}{\exp(T/T_{\text{и}i}) + 1}} \quad /6/$$

При $P^{\circ} = P_{\text{гр}}^{\circ}$ реактор будет находиться на границе устойчивости. Такой режим характеризуется незатухающими колебаниями мощности, синусоидальная огибающая которых имеет частоту, в два раза меньше частоты следования импульсов мощности.

Если можно пренебречь влиянием обратной связи по источникам запаздывающих нейтронов по сравнению с обратной связью по мощности, то

$$P_{\text{гр}}^{\circ} = \frac{T_{\text{хр}} [\exp(T/T_{\text{хр}}) + 1]}{k_{\text{хр}} T} \quad /7/$$

Если к тому же $T \ll T_{\text{хр}}$, то формула для граничного значения средней мощности предельно упрощается:

$$P_{\text{гр}}^{\circ} = \frac{2}{k_{\text{хр}}} \cdot \frac{T_{\text{хр}}}{T} \quad /8/$$

Таким образом, понижение периода следования импульсов мощности T , а также понижение коэффициента передачи $k_{\text{хр}}$ и повышение постоянной времени $T_{\text{хр}}$ мощностной обратной связи ведет к повышению граничного значения средней мощности реактора.

В таблице для импульсного реактора с параметрами ИБР-2 приведены граничные значения средней мощности, рассчитанные по формуле /6/ и по упрощенной формуле /8/. Расчеты проведены для различных частот следования импульсов мощности $f_{\text{и}}$. Значения параметров мощностной обратной связи приняты равными ²: $k_{\text{хр}} = 0,01 \beta_{\text{и}}/\text{кВт}$, $T_{\text{хр}} = 10$ с. Мощность, выделяемая в интервалах между импульсами /мощность фона/, принята равной ⁶ от средней мощности / $k_{\Phi} = 0,06$ /. Для иллюстрации влияния k_{Φ} и $T_{\text{хр}}$ проведены также расчеты для $k_{\Phi} = 0$ и для $T_{\text{хр}} = 5$ с. Значения параметров двух эквивалентных групп запаздывающих нейтронов приняты следующими ⁴: $\mu_1 = 0,364$; $\mu_2 = 0,636$; $T_1 = 35,5$ с и $T_2 = 2,72$ с. При $k_{\Phi} = 0$ значения параметров $\mu_{\text{и}1}$, $\mu_{\text{и}2}$, $T_{\text{и}1}$, $T_{\text{и}2}$ совпадают с μ_1 , μ_2 , T_1 , T_2 , а при $k_{\Phi} = 0,06$ они соответственно равны 0,381; 0,619; 36,3 с; 2,83 с.

Таблица

Граничные значения средней мощности $P_{\text{гр}}^{\circ}$, вычисленные по формуле /6/, в скобках - по упрощенной формуле /8/

$T, \text{с}$	2	1	0,2	0,1	0,02
$f_{\text{и}} = 1/T, \text{имп/с}$	0,5	1	5	10	50
$k_{\text{хр}}, \beta_{\text{и}}/\text{кВт}$	0,01				
$P_{\text{гр}}^{\circ}, \text{МВт}$					
при $k_{\Phi} = 0,06, T_{\text{хр}} = 10 \text{ с}$	1,39 /1/	2,46 /2/	10,97 /10/	21,61 /20/	106,72 /100/
при $k_{\Phi} = 0, T_{\text{хр}} = 10 \text{ с}$	1,34 /1/	2,35 /2/	10,35 /10/	20,34 /20/	100,34 /100/
при $k_{\Phi} = 0,06, T_{\text{хр}} = 5 \text{ с}$	0,78 /0,5/	1,3 /1/	5,54 /5/	10,86 /10/	53,41 /50/

Временной анализ колебаний мощности при периодических возмущениях реактивности с периодом, кратным периоду импульсов мощности, приведен в работах /5,6/.

ПРЕДЕЛЬНАЯ ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ РЕАКТОРА

Известно, что чем меньше период T , тем ближе свойства импульсной системы к свойствам соответствующей непрерывной системы. В пределе при $T \rightarrow 0$ приходим к следующей предельной передаточной функции, соответствующей импульсному реактору при двух эквивалентных группах запаздывающих нейтронов

$$W_R(p) = \frac{y(p)}{x_3(p)} = [W_R^*(p) = \frac{e^*(p)}{x_3^*(p)}]_{T \rightarrow 0} = k_R \frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}{p(T_R p + 1)} \quad /9/$$

где

$$k_R = \frac{1}{\mu_1 T_1 + \mu_2 T_2}, \quad T_R = \frac{T_1 T_2}{\mu_1 T_1 + \mu_2 T_2}.$$

В формуле /9/ p -переменная преобразования Лапласа, $y(p)$ и $x_3(p)$ - изображения по Лапласу непрерывных функций времени $y(t)$ и $x_3(t)$, представляющих из себя соответственно отклонение мощности реактора в долях базовой мощности и отклонение задающей реактивности, выраженной в долях β .

Передаточную функцию /9/ можно также получить, если вместо исходных переменных рассматривать переменные, усредненные за период T , т.е. с самого начала вместо импульсного реактора рассматривать эквивалентный ему непрерывный реактор.

Следует отметить, что импульсный реактор теряет устойчивость, если его средняя мощность превышает граничное значение /6/. Переход же к усредненным переменным отодвигает эту границу в бесконечность, т.е. эквивалентный реактор получается устойчивым при любой средней мощности, что, как видно из выражения /8/, справедливо лишь при $T \rightarrow 0$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью аналога критерия устойчивости Найквиста для импульсных систем показано, что импульсный реактор устойчив, если его средняя мощность меньше граничного значения. Граничное значение обратно пропорционально коэффициенту передачи мощностной обратной связи. Большому значению постоянной времени мощностной обратной связи, а также большей частоте импульсов мощности соответствует большее граничное значение средней мощности. При достижении граничного значения средней мощности в реакторе будут

наблюдаться незатухающие колебания мощности, синусоидальная огибающая которых будет иметь частоту, в два раза меньшую частоты импульсов мощности. Упрощенное описание импульсного реактора как непрерывного путем усреднения переменных по периоду следования импульсов приводит к ошибочному результату, отодвигая границу устойчивости в бесконечность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко И.И., Ставиский Ю.Я. АЭ, 1959, т.7, вып.5, с.417.
2. Попов А.К. ОИЯИ, Р13-84-338, Дубна, 1984.
3. Теория автоматического управления, ч.1 /под ред. А.В.Нетушила/, "Высшая школа", М., 1968.
4. Попов А.К. ОИЯИ, Р5-84-282, Дубна, 1984.
5. Шабалин Е.П. ОИЯИ, Р11-85-52.
6. Шабалин Е.П. ОИЯИ, Р11-85-309.

Попов А.К.

13-85-840

Устойчивость импульсного реактора периодического действия

Для выявления области устойчивости импульсного реактора использован аналог критерия Найквиста для импульсных систем. Показано, что реактор устойчив, если его средняя мощность меньше граничного значения, которое тем больше, чем больше частота импульсов мощности и постоянная времени отрицательной мощностью обратной связи и чем меньше коэффициент передачи этой обратной связи. Замена импульсной модели реактора упрощенной непрерывной приводит к ошибочному результату при определении области устойчивости.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой.

Popov A.K.

13-85-840

Stability of A Periodically Pulsed Reactor

To reveal the pulsed reactor stability area the Nyquist criteria for pulsed system is used. It is shown that the reactor is stable if its mean power is less than the boundary value. The boundary value increases with increasing the power pulse frequency and time constant of negative power feedback and with decreasing the transfer coefficient of feedback. Unlike a pulsed reactor model, a mean-value reactor model gives a wrong results, when determining the stability region.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985