

тора первого блока Белоярской АЭС) до 60 Мвт/т U , т. е. при уменьшении единовременной загрузки в 12 раз топливная составляющая расчетных затрат уменьшается в три раза, а оптимум сдвигается вправо. Можно также видеть, что оптимумы значений энергонапряженности достигают насыщения. В реакторе типа реактора Белоярской АЭС величину энергонапряженности нецелесообразно поднимать выше $50-60 \text{ Мвт/т U}$, так как технические трудности достижения таких удельных мощностей весьма велики, а выигрыш в значении топливной составляющей при дальнейшем увеличении энергонапряженности относительно мал.

Практическое удорожание изготовления твэлов при переходе к большим значениям глубины выгорания приведет к некоторому смещению полученных (см. рис. 1) оптимальных значений глубины выгорания влево.



Области устойчивости контура регулирования холодного реактора

Павел Штурский

(Научно-исследовательский институт энергетики, ЧССР, Прага)

Дается анализ областей устойчивости контура регулирования реактора нулевой мощности при изменении настроек регулятора и среднего времени жизни мгновенных нейтронов. Показано, как влияет на область устойчивости аппроксимация кинетики реактора двумя эквивалентными группами запаздывающих нейтронов.

Постановка задачи

Схема контура регулирования реактора для заданной плотности нейтронов показана на

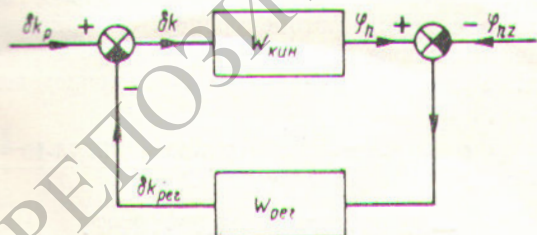


Рис. 1. Схема контура регулирования:

δk_p — возмущение реактивности реактора; δk — реактивность реактора; $W_{кин}$ — передаточная функция реактора в выражениях Лапласа; ϕ_n — относительное отклонение плотности нейтронов от номинального значения; ϕ_{nz} — отклонение плотности нейтронов от заданного значения; $W_{рег}$ — передаточная функция регулятора; $\delta k_{рег}$ — компенсирующая способность регулирующего стержня.

Таким образом, использование зависимости (5) для топливной составляющей расчетных затрат на производство электроэнергии позволяет проследить влияние как стоимости топливной загрузки, так и глубины выгорания ядерного горючего на экономику его использования в реакторе и выбрать наиболее экономичный режим его работы.

Поступила в Редакцию 2/IV 1964 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений в новую технику в народном хозяйстве СССР. М., Госпланиздат, 1960.
2. Основные методические положения технико-экономических расчетов в энергетике. М., Гостехиздат, 1959.
3. Е. И. Гришанин и др. «Атомная энергия», 10, 565 (1961).

УДК 621.039.562

рис. 1. В линейном приближении регулируемая величина ϕ_n в преобразованиях Лапласа при возмущениях ϕ_{nz} и δk_p может быть задана уравнением

$$\bar{\phi}_n = \frac{W_{рег} W_{кин} \bar{\phi}_{nz} + W_{кин} \bar{\delta k}_p}{1 + W_{рег} W_{кин}} \quad (1)$$

Передаточная функция кинетики реактора в линейном приближении для m групп запаздывающих нейтронов определяется выражением

$$W_{кин} = \frac{\bar{\phi}_n}{\bar{\delta k}} = \frac{1}{T_0 p + \sum_{i=1}^m \frac{\mu_i \tau_i p}{\tau_i p + 1}} = \frac{\beta_m p^m + \beta_{m-1} p^{m-1} + \dots + \beta_0}{p(\alpha_m p^m + \alpha_{m-1} p^{m-1} + \dots + \alpha_0)} \quad (2)$$

где T_0 — среднее время жизни мгновенных нейтронов; μ_i — вклад i -й группы запаздывающих нейтронов в коэффициент размножения; τ_i — среднее время жизни радиоактивных ядер i -й группы; p — постоянная преобразования Лапласа.

Предположим, что динамические свойства регулятора соответствуют последовательно

включенным звеньям — интегрирующему с воздействием по производной и аperiodическому первого порядка. Передаточная функция регулятора при этом имеет вид

$$W_{\text{рег}} = \frac{\bar{\delta k}_{\text{рег}}}{\varphi_n - \varphi_{nz}} = \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) \frac{1}{Tp + 1}, \quad (3)$$

где K_p — пропорциональная постоянная регулятора; K_i — интегрирующая постоянная регулятора; T — постоянная времени регулятора. Передаточная функция (3) учитывает динамические свойства регуляторов реакторов в широком диапазоне их конструкции.

Такие регуляторы можно осуществить, используя регулируемый стержень, перемещаемый с помощью сервомотора (с переменной скоростью), управляющая обмотка которого питается напряжением, пропорциональным сумме входного сигнала ($\varphi_n - \varphi_{nz}$) и его производной.

Область устойчивости для двух эквивалентных групп запаздывающих нейтронов

Устойчивость контура регулирования реактора определяется характеристическим уравнением системы

$$1 + W_{\text{рег}}(p) W_{\text{кин}}(p) = 0. \quad (4)$$

Учитывая, что постоянные τ_i и μ_i заданы и определяются ядерным горючим, можно, изменяя конструкцию реактора и регулятора, повлиять на постоянные T_0 , K_p , K_i , T . Проведем анализ устойчивости при изменении этих четырех параметров. В плоскости параметров настройки регулятора предел устойчивости будет определяться осью $j\omega$ плоскости комплексной переменной $p = \xi + j\omega$ уравнения (4). Уравнения предела области устойчивости в форме параметрической зависимости от ω ($-\infty, +\infty$) для кинетики реактора с двумя группами запаздывающих нейтронов имеют вид

$$K_p = \omega^2 \frac{a_2 \omega^4 + a_1 \omega^2 + a_0}{c_2 \omega^4 + c_1 \omega^2 + 1}; \quad K_i = \omega^2 \frac{b_2 \omega^4 + b_1 \omega^2 + b_0}{c_2 \omega^4 + c_1 \omega^2 + 1}, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} a_2 &= TT_0(\tau_1 \tau_2)^2; \\ a_1 &= T[\tau_1 \tau_2(\mu_1 \tau_2 + \mu_2 \tau_1) + T_0(\tau_1^2 + \tau_2^2)] - (\tau_1 \tau_2)^2(\mu_1 + \mu_2); \\ a_0 &= T(T_0 + \mu_1 \tau_1 + \mu_2 \tau_2) - \tau_1^2 \mu_1 - \tau_2^2 \mu_2; \\ b_2 &= T(\tau_1 \tau_2)^2(\mu_1 + \mu_2) + T_0(\tau_1 \tau_2)^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_1 &= T(\mu_1 \tau_1^2 + \mu_2 \tau_2^2) + T_0(\tau_1^2 + \tau_2^2) + \\ &\quad + \tau_1^2 \tau_2 \mu_2 + \tau_1 \tau_2^2 \mu_1; \\ b_0 &= T_0 + \mu_1 \tau_1 + \mu_2 \tau_2; \\ c_2 &= (\tau_1 \tau_2)^2; \\ c_1 &= \tau_1^2 + \tau_2^2. \end{aligned}$$

Уравнение асимптоты предельной кривой области устойчивости можно легко получить из уравнений (5). Уравнение асимптоты в плоскости параметров настройки регулятора будет иметь вид

$$K_i = \delta K_p + K_{i \text{ас}}, \quad (6)$$

где

$$\delta = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{dK_i}{dK_p} = \frac{b_2}{a_2} = \frac{T(\tau_1 \tau_2)^2(\mu_1 + \mu_2) + T_0(\tau_1 \tau_2)^2}{TT_0(\tau_1 \tau_2)^2} = \frac{1}{T} + \frac{\mu_1 + \mu_2}{T_0}; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} K_{i \text{ас}} &= \lim_{\omega \rightarrow \infty} \left(K_i - K_p \frac{dK_i}{dK_p} \right) = \frac{b_1 a_2 - a_1 b_2}{a_2 c_2} = \\ &= \frac{\mu_1 + \mu_2}{T} + \frac{(\mu_1 + \mu_2)^2}{T_0} - \frac{T}{T_0} \cdot \frac{(\mu_1 + \mu_2)(\mu_1 \tau_2 + \mu_2 \tau_1)}{\tau_1 \tau_2} - \\ &\quad - T \frac{\mu_2 \tau_1^2 + \mu_1 \tau_2^2}{(\tau_1 \tau_2)^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

На рис. 2, а, б, в приведены области устойчивости для тяжеловодных реакторов с урановым горючим при трех значениях T_0 и различных значениях T . Области устойчивости определены из уравнений (5) для постоянных $\mu_1 = 6,25 \cdot 10^{-3}$; $\tau_1 = 3,63$ сек; $\mu_2 = 1,35 \cdot 10^{-3}$; $\tau_2 = 57,99$ сек.

Постоянные эквивалентных групп запаздывающих нейтронов получены на основе оптимальной аппроксимации кривой разгона реактора. Аппроксимация была проведена для шести групп запаздывающих нейтронов и первых трех групп фотонейтронов. На рисунках нанесены также и асимптоты предельных кривых. Уравнение асимптоты для приведенных постоянных имеет вид

$$\begin{aligned} K_i &= \left(\frac{1}{T} + \frac{7,6 \cdot 10^{-3}}{T_0} \right) K_p + \frac{7,6 \cdot 10^{-3}}{T} + \frac{57,76 \cdot 10^{-6}}{T_0} - \\ &\quad - 13,27 \cdot 10^{-6} \frac{T}{T_0} - 4,75 \cdot 10^{-4} T. \end{aligned} \quad (9)$$

Увеличение T_0 уменьшает области устойчивости. К этому также приводит и увеличение T . При $T = 0$ контур регулирования холодного реактора устойчив для всех положительных значений K_p и K_i , а также для относительно большой области отрицательных значений K_p .

С увеличением T уменьшается величина критического усиления чисто интегрирующего регулятора $K_{i \text{ крит}}$ (для $K_p = 0$):

$$K_{i \text{ крит}} = (\omega_{\text{крит}})^2 \frac{b^2 (\omega_{\text{крит}})^4 + b_1 (\omega_{\text{крит}})^2 + b_0}{c_2 (\omega_{\text{крит}})^4 + c_1 (\omega_{\text{крит}})^2 + 1}, \quad (10)$$

где

$$\omega_{\text{крит}} = \sqrt{\frac{-a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_0a_2}}{2a_2}}.$$

Начиная с определенного и достаточно большого значения T область устойчивости уменьшается настолько, что уже не попадает в диапазон отрицательных значений K_p . В этом случае интегрирующий регулятор уже не в состоянии обеспечить устойчивый процесс регулирования.

На практике стремятся к тому, чтобы величина T имела как можно меньшее значение — порядка десятых долей секунды.

Среди областей устойчивости контура регулирования реактора (см. рис. 2) для практического выбора параметров настройки регуляторов может использоваться только область положительных значений K_p и K_i . В асимптотическом приближении эту область можно ограничить тремя прямыми: осью K_p в положитель-

ном направлении, осью K_i в интервале от 0 до $K_{i \text{ ас}}$ и асимптотой. Наибольшая ошибка асимптотического приближения области устойчивости будет для $K_{i \text{ крит}}$ чисто интегрирующего регулятора. В табл. 1 для сравнения приведены величины $K_{i \text{ крит}}$ чисто интегрирующего регулятора, вычисленные на основе асимптотического приближения области устойчивости (8) и точного выражения (10) для разных значений T_0 и T .

Области устойчивости определялись для кинетики реактора, аппроксимированной двумя эквивалентными группами запаздывающих нейтронов. Определение областей устойчивости для большего числа групп запаздывающих нейтронов сложно.

Поскольку, как мы видели, асимптотическое приближение достаточно точно определяет область устойчивости в практически применяемом диапазоне настроек регулятора K_p , K_i и T , найдем области устойчивости для m групп запаздывающих нейтронов в асимптотическом приближении.

Области устойчивости для m групп запаздывающих нейтронов в асимптотическом приближении

Изложенным ранее способом постоянные δ и $K_{i \text{ ас}}$ уравнения асимптоты предела области устойчивости для реактора с m группами запаздывающих нейтронов можно определить в виде

$$\delta = \frac{1}{T} + \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i}{T_0}; \quad (11)$$

$$K_{i \text{ ас}} = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i}{T} + \frac{(\sum_{i=1}^m \mu_i)^2}{T_0} - \frac{T}{T_0} \sum_{i=1}^m \mu_i \sum_{i=1}^m \frac{\mu_i}{\tau_i} - T \sum_{i=1}^m \frac{\mu_i}{\tau_i^2}. \quad (12)$$

Подставляя значения параметров шести групп запаздывающих нейтронов и трех групп фотонейтронов, получим асимптотическое приближение области устойчивости тяжеловодного реактора:

$$K_i = \left(\frac{1}{T} + \frac{7,6 \cdot 10^{-3}}{T_0} \right) K_p + \frac{7,6 \cdot 10^{-3}}{T} + \frac{57,76 \cdot 10^{-6}}{T_0} - 26,11 \cdot 10^{-6} \frac{T}{T_0} - 6,59 \cdot 10^{-3} T. \quad (13)$$

Таблица 1
Значения $K_{i \text{ ас}}$ и $K_{i \text{ крит}}$, вычисленные по уравнениям (8) и (10) соответственно

Характеристика	T, сек			
	0,2	0,6	1	5
$T_0 = 10^{-3}$ сек				
$K_{i \text{ ас}}$	0,04342	0,01736	0,01157	-0,001714
$K_{i \text{ крит}}$	0,04267	0,01640	0,01042	0,000676
Ошибка, %	1,74	5,9	11,1	—
$T_0 = 10^{-3}$ сек				
$K_{i \text{ ас}}$	0,09301	0,06218	0,0516	-0,009445
$K_{i \text{ крит}}$	0,09285	0,06185	0,05110	0,001805
Ошибка, %	0,17	0,53	1,0	—
$T_0 = 10^{-4}$ сек				
$K_{i \text{ ас}}$	0,58896	0,51036	0,452025	-0,086755
$K_{i \text{ крит}}$	0,58888	0,51002	0,45159	0,002634
Ошибка, %	0,015	0,066	0,1	—

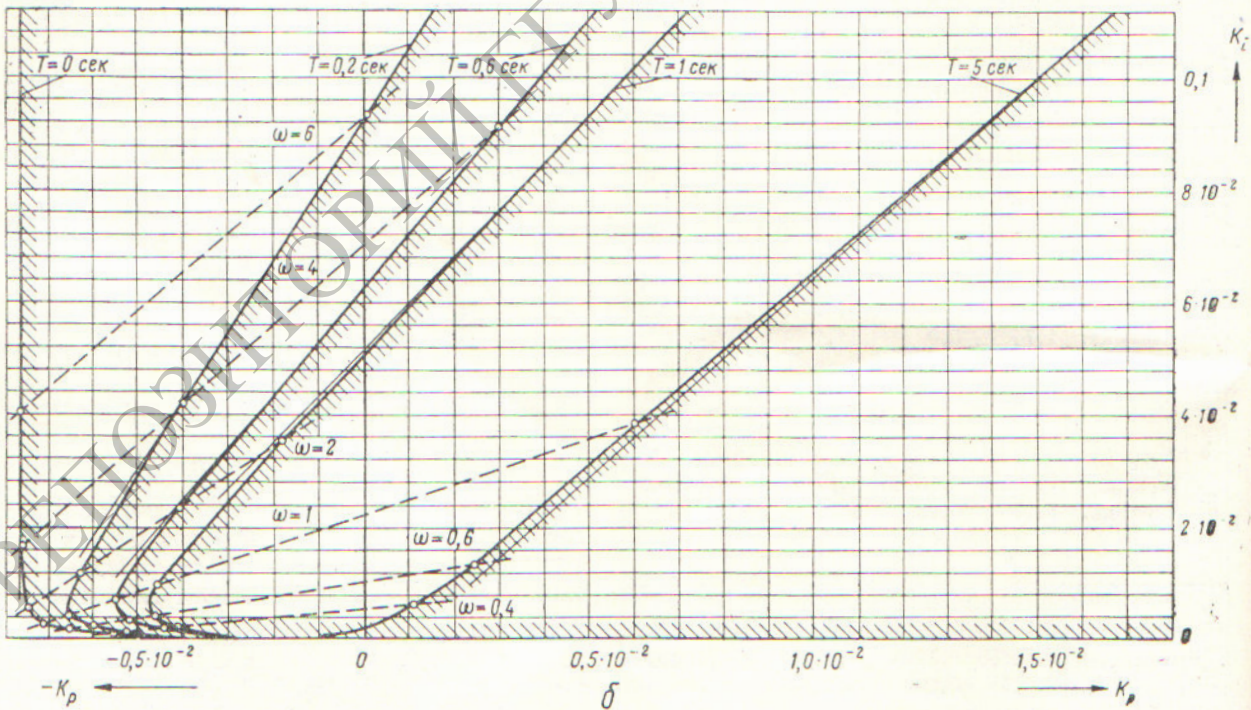
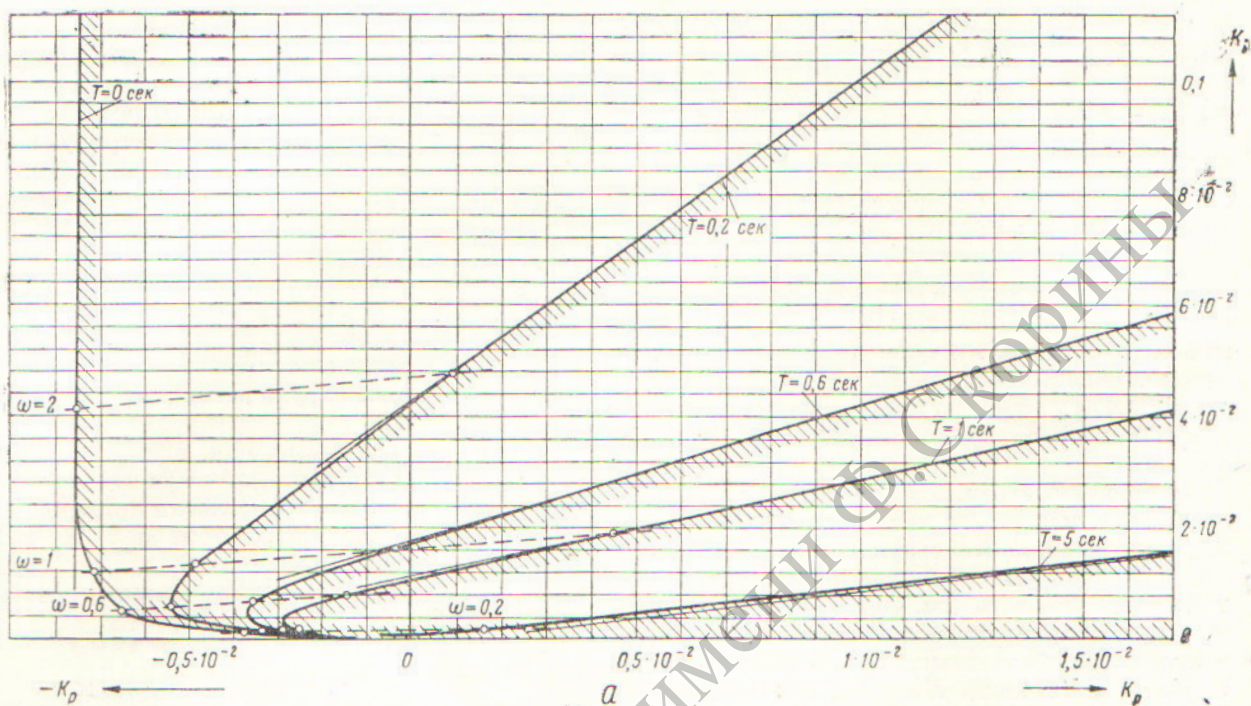




Рис. 2. Области устойчивости (заштрихованы) контура регулирования тяжеловодного реактора:

а — для $T_0 = 10^{-3}$ сек; б — для $T_0 = 10^{-3}$ сек; в — для $T_0 = 10^{-4}$ сек.

Для передаточной функции реактора, аппроксимированной двумя эквивалентными группами запаздывающих нейтронов, получили ранее рассмотренное уравнение (9). Из сопоставления выражений (9) и (13) следует, что угловой коэффициент в обоих случаях одинаков, но отрезки K_i на оси K_i различны и только для $T = 0$ обе асимптоты одинаковы.

На рис. 3 приведены асимптотические приближения области устойчивости тяжеловодного реактора с временем жизни нейтронов $T_0 = 10^{-3}$ для кинетики реактора, аппроксимированной двумя эквивалентными группами запаздывающих нейтронов, и кинетики с учетом всех девяти групп запаздывающих нейтронов при разных значениях постоянной времени регулятора.

Рис. 3. Области устойчивости в асимптотическом приближении:

— — — — — девять групп запаздывающих нейтронов;
 - - - - - две эквивалентные группы запаздывающих нейтронов.

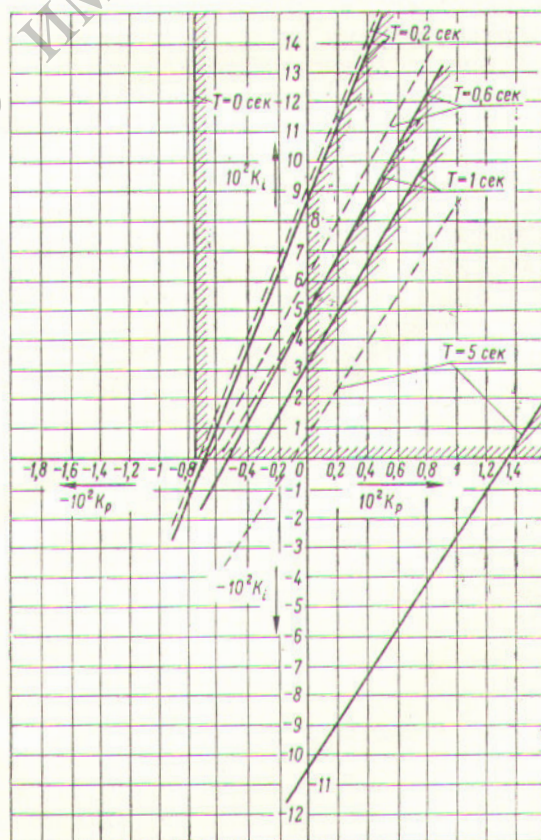


Таблица 2

Значения δ и $K_{iас}$ для двух и девяти групп запаздывающих нейтронов

Характеристика		T, сек			
		0,2	0,6	1	5
$T_0 = 10^{-2}$ сек	$\delta_{9гр} = \delta_{2эkv. гр}$	5,76	2,43	1,76	0,96
	$(K_{iас})_{9гр}$	$419 \cdot 10^{-4}$	$129 \cdot 10^{-4}$	$41,8 \cdot 10^{-4}$	$-387 \cdot 10^{-4}$
	$(K_{iас})_{2эkv. гр}$	$434 \cdot 10^{-4}$	$174 \cdot 10^{-4}$	$116 \cdot 10^{-4}$	$-17,1 \cdot 10^{-4}$
$T_0 = 10^{-3}$ сек	$\delta_{9гр} = \delta_{2эkv. гр}$	12,6	9,3	8,6	7,8
	$(K_{iас})_{9гр}$	$89,2 \cdot 10^{-3}$	$50,7 \cdot 10^{-3}$	$32,7 \cdot 10^{-3}$	$-104 \cdot 10^{-3}$
	$(K_{iас})_{2эkv. гр}$	$93,0 \cdot 10^{-3}$	$62,1 \cdot 10^{-3}$	$51,6 \cdot 10^{-3}$	$9,44 \cdot 10^{-3}$
$T_0 = 10^{-4}$ сек	$\delta_{9гр} = \delta_{2эkv. гр}$	81,0	77,6	77,0	76,0
	$(K_{iас})_{9гр}$	$56,2 \cdot 10^{-2}$	$43,0 \cdot 10^{-2}$	$31,7 \cdot 10^{-2}$	$-75,9 \cdot 10^{-2}$
	$(K_{iас})_{2эkv. гр}$	$58,9 \cdot 10^{-2}$	$51,0 \cdot 10^{-2}$	$45,2 \cdot 10^{-2}$	$-8,67 \cdot 10^{-2}$

В табл. 2 сопоставляются угловые коэффициенты δ и отрезки $K_{iас}$ на оси K_i для разных значений T и T_0 с учетом кинетики реактора с девятью группами нейтронов и двумя эквивалентными группами.

Из рис. 3 и табл. 2 видно, что ошибка аппроксимации увеличивается с ростом T . Для того чтобы аппроксимированная кинетика сохранила в асимптотическом приближении область устойчивости, необходимо сохранить равенство между параметрами эквивалентных групп нейтронов [см. уравнения (11) и (12)]:

$$\sum \mu_{ia} = \sum_1^m \mu_i; \quad \sum \frac{\mu_{ia}}{\tau_{ia}} = \sum_1^m \frac{\mu_i}{\tau_i}; \quad \sum \frac{\mu_{ia}}{\tau_{ia}^2} = \sum_1^m \frac{\mu_i}{\tau_i^2}$$

(индекс a обозначает параметры эквивалентных групп нейтронов).

Заключение

Область устойчивости контура регулирования холодного реактора в плоскости $K_p - K_i$ уменьшается с увеличением постоянных времени T_0 и T . При этом влияние T значительно больше. Совершенно очевидно, что всякое конструктивное решение, направленное к снижению T , обосновано.

Пропорциональная составляющая регулятора обуславливает повышение устойчивости, и поэтому ее введение целесообразно. В практически используемом диапазоне значений постоянных регулятора область устойчивости можно заменить асимптотическим приближением, которое легко определяется с использованием формул, выведенных в настоящей статье, даже для случая кинетики реактора с m группами запаздывающих нейтронов.

Поступила в Редакцию 4/VII 1963 г.