объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

Р11-85-776

Е.П.Шабалин

О КОЛЕБАНИЯХ МОЩНОСТИ И ПРЕДЕЛЕ УСТОЙЧИВОСТИ ИМПУЛЬСНЫХ РЕАКТОРОВ

Направлено в журнал "Атомная энергия"

1985

I. Введение

Энергия импульсов мощности в импульсном реакторе очень чувствительна к введенной реактивности вследствие того, что в стадии формирования импульса происходит разгон на мгновенных нейтронах. Например, в реакторе периодического действия типа ИБР относительное изменение энергии импульса $\Delta Q/Q$ при небольшом возмущении реактивности в этом импульсе ρ выражается соотношением /1/

$$\Delta Q/Q = q = \rho/\beta_{и} . \qquad (1)$$

где $\beta_{и}$ - импульсная доля запаздывающих нейтронов; в частности, для ИБР-2 $\beta_{и} = 1{,}6 \cdot 10^{-4}$, т.е. в 40 раз меньше, чем $\beta_{эфф}$ для реактора непрерывного действия с урановым топливом. Поэтому при нормальной работе импульсного реактора периодического действия энергия импульсов испытывает значительные флуктуации из-за колебаний реактивности. При больших значениях энергии импульсов и, соответственно, значительном нагреве ядерного топлива за импульс колебания мощности будут вызывать дополнительные колебания реактивности, если температурный коэффициент реактивности $K_T \neq 0$.

В работе анализируется влияние температурного эффекта реактивности на колебания мощности (точнее, энергии импульсов мощности) в импульсном реакторе, работающем в режиме периодически повторяющихся вспышек.

Анализ проведен без учета тепловыделения между вспышками мощности и колебаний интенсивности запаздывающих нейтронов; эти факторы не оказывают влияния на качественные результаты анализа (см.приложение).

2. "Вынужденные" колебания мощности и пределы устойчивости импульсного реактора

Соотношение типа (I) может быть записано для любого типа импульсного реактора при малых возмущениях реактивности в импульсе ρ :

$$q = K_{и} \cdot \rho . \qquad (1')$$

Пусть внешняя реактивность ρ_n изменяется от импульса к импульсу периодически с периодом t_o, кратным периоду повторения импульсов мощности t_p: $t_o = N \cdot t_p$, причем $\sum_{n=1}^{N} \rho_n = 0$. Пусть также температура ядерного топлива (усреднённая по активной зоне) описывается дифференциальным уравнением I-го порядка

$$\dot{T} = -\alpha T + \dot{Q}, \tag{2}$$

где выделенная энергия $Q(t)$ измеряется в температурных единицах (иными словами, теплоёмкость реактора принята равной единице). Тогда температура перед началом (n + I)-го импульса определится выражением

$$T_{n+1}^{(-)} = T_n^{(+)} \exp(-\alpha t_p) = (T_n^{(-)} + Q_n) \exp(-\alpha t_p), \tag{3}$$

где $T_n^{(+)}$ – температура топлива сразу после n -го импульса, а Q_n – скачок температуры в импульсе (т.е. энергия импульса мощности).

Отклонения величин $T_n^{(-)}$ и $T_{n+1}^{(-)}$ от их среднего значения будут, очевидно, связаны соотношением (здесь и далее индекс "-" опущен):

$$\delta T_{n+1} = (\delta T_n + q_n Q_o) \cdot \varphi, \tag{3'}$$

где q_n определено (I), Q_o есть среднее значение энергии импульсов мощности, и введено обозначение $\varphi = \exp(-\alpha t_p)$.

Выражая в (3') δT_n через q_n, согласно равенству

$$q_n = K_и \cdot \rho = K_и (\rho_n + K_T \delta T_n), \tag{I'}$$

получим уравнение связи между значениями относительных отклонений энергии двух соседних импульсов мощности:

$$q_{n+1} = r q_n + K_и \rho_{n+1} - \varphi \cdot K_и \rho_n, \tag{4}$$

где обозначено (5)

$$r = (1 + K_и K_T Q_o) \cdot \varphi.$$

Вследствие периодичности искомого процесса $q(t)$ (период последовательности $\{q_n\}$ равен периоду последовательности $\{\rho_n\}$, как будет видно из дальнейшего, при I > r > -I) N значений q_n будут определяться системой (N -I) уравнений вида (4) при n = I,2... N -I и дополнительным уравнением

$$q_1 = r q_N + K_и \rho_N - \varphi \cdot K_и \rho_1. \tag{4'}$$

Т.к. $\sum_{n=1}^{N} \rho_n = 0$, то можно понизить на единицу порядок системы уравнений, исключив q_N и ρ_N. Теперь вектор $\vec{q}$ с

(N -I) проекциями определяется уравнением

$$R(\vec{q} - K_и \vec{\rho}) = -K_и \cdot K_T \cdot \varphi \cdot Q_o \cdot \vec{\rho} \tag{6}$$

или

$$\vec{q} = K_и \vec{\rho} + (\varphi - r) \cdot R^{-1} \vec{\rho}, \tag{6'}$$

где матрица

$$R = \begin{vmatrix} r & (-1) & 0 & . & . & . & 0 \\ 0 & r & (-1) & . & . & . & 0 \\ . & . & . & . & . & . & . \\ 0 & 0 & 0 & . & 0 & r & (-1) \\ 1 & 1 & . & . & . & 1 & (r+1) \end{vmatrix}. \tag{7}$$

В отсутствие температурного эффекта реактивности ($K_T Q_o = 0$) получается очевидное соотношение $\vec{q} = K_и \cdot \vec{\rho}$; при $K_T Q_o \neq 0$ колебания мощности будут определяться вектором $\vec{\rho}$ и значением безразмерных параметров φ и r (или φ и $r_T = K_и K_T Q_o$).

Для попеременной пульсации реактивности (N = 2) из (6) имеем

$$q_1 = \rho_1 / \left(1 + \frac{\varphi r_T}{\varphi + 1}\right) = \rho_1 \frac{\varphi + 1}{r + 1}, \tag{8}$$

откуда видно, что при отрицательном температурном эффекте реактивности ($r_T < 0$) колебания мощности выше, чем в отсутствие эффекта реактивности. Непосредственным решением уравнения (6) легко убедиться в том, что усиление колебаний мощности наблюдается и при колебаниях реактивности с периодом N = 3 (такой период характерен для шумов реактивности в действующем импульсном реакторе ИБР-2 /2/) и с периодом N = 4 (см. рис. I).

При r = - I и N = 2,4 усиление колебаний бесконечно велико; это есть следствие того, что при r < - I импульсный реактор теряет устойчивость. Действительно, отношение вариации соседних импульсов мощности при исчезающе малом возмущении реактивности, согласно (4), есть

$$q_{n+1} / q_n = r. \tag{9}$$

Очевидным условием ограниченности процесса $q(t)$ при любом малом возмущении будет условие

$$|r| = \varphi |1 + K_и \cdot K_T \cdot Q_o| \leq 1. \tag{I0}$$

То же условие (I0) можно получить с помощью формализма теории линейных импульсных систем. Действительно, уравнение (4) суть так называемое "разностное" уравнение импульсной системы с обратной связью; для

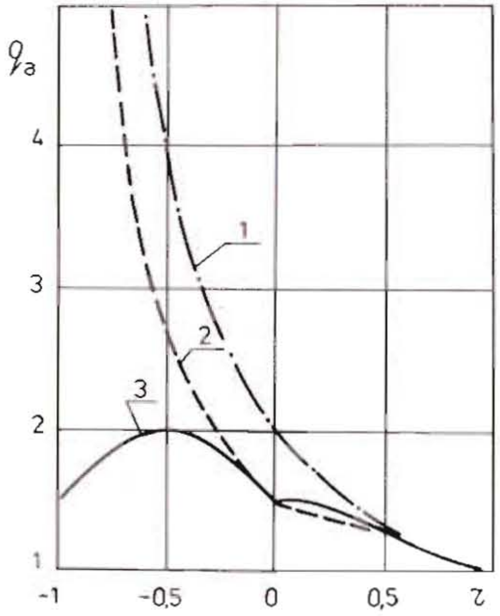

Рис. I. Зависимость амплитуды вынужденных колебаний энергии импульсов мощности (q_a) от параметра r (см.ф-лу (5), $\varphi = I$) для трех видов периодических колебаний внешней реактивности: попеременной пульсации реактивности (кривая I), колебаний с периодической последовательностью $\{\rho, -\rho, 0\}$ (кривая 2) и колебаний с периодической последовательностью $\{\rho, -\rho, 0, 0\}$ (кривая 3). За единицу принята амплитуда колебаний при r =I.

устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы корни характеристического уравнения однородной части разностного уравнения были по модулю меньше или равны I (см. /3/, с. 98, теорема I). Для системы, описываемой соотношением (4), характеристическое уравнение есть $\lambda - r = 0$, поэтому система устойчива, если $|r| \leqslant 1$.

Таким образом, в отличие от реактора стационарного действия, импульсный реактор периодического действия (и.р.п.д) может стать неустойчивым и при отрицательном значении температурного эффекта реактивности, если параметр $r < -I$. В этом случае любое возмущение реактивности приведет к "раскачке" импульсов - возникнут колебания возрастающей амплитуды с периодом $N = 2$.

Для реакторов типа ИБР алгебраическое значение параметра r уменьшается с ростом мощности реактора; предельное значение мощности, за которой реактор теряет устойчивость, согласно (I0), есть

$$P = \frac{(\varphi+1)\beta_и \cdot C}{\varphi \cdot t_p |K_T|}, \text{ или } P = \frac{(\varphi+1)\cdot \beta_и}{\varphi \cdot |K_p| \cdot \alpha t_p}, \qquad (II)$$

где $K_p = K_T/\alpha C$ - мощностной коэффициент реактивности, а C - теплоёмкость реактора.

Для частых импульсов φ стремится к I, и $P \approx \dfrac{2\beta_и}{|K_p|\cdot\alpha t_p}$.

Например, для реактора ИБР-2 этот предел равен I0 МВт (номинальное значение мощности реактора - 4 МВт).

Для импульсных реакторов с самогашением импульса параметр r не зависит (или слабо зависит) от мощности реактора. Так, в реакторах с безынерционным гашением ИГР /4/, БИГР /5/, VIPER /6/ энергия импульса определяется соотношением

$$Q = 2\rho_m/|K_\Delta|, \qquad (I2)$$

где ρ_m - надкритичность на мгновенных нейтронах в импульсе, K_Δ - динамический коэффициент реактивности, откуда

$$K_и = \frac{q}{\rho} = \frac{1}{\rho_m} = 2/|K_\Delta|Q, \text{ и } r = \varphi(1 + K_и K_T Q) = \varphi\left(1 + \frac{2K_T}{|K_\Delta|}\right).$$

Если такой реактор будет использоваться в режиме периодических вспышек, то его устойчивость будет обеспечена при условии $K_T = K_\Delta$ (например, ИГР). В реакторе на быстрых нейтронах обычно $|K_T| > |K_\Delta|$, и его устойчивость будет зависеть от φ (прежде всего, от частоты импульсов) и никак не будет связана с мощностью реактора.

Для импульсных реакторов на быстрых нейтронах с большой инерционностью гашения парамэтр r приближенно может быть выражен так:

$$r \approx -6\varphi \cdot Q/Q_\infty,$$

где Q_∞ - энергия импульса, которая была бы при отсутствии инерции гашения (см. ф-лу (I2)). Обычно в действующих реакторах $Q/Q_\infty \sim 5 \div 15$ /7/, поэтому такой реактор может работать в периодическом режиме лишь при очень малых значениях параметра $\varphi \sim 0{,}0I$.

Интересно, что и.р.п.д. может быть устойчив при положительном значении температурного коэффициента реактивности K_T, таком, что соблюдается соотношение (I0). При этом колебания мощности ниже, чем в случае отрицательного температурного эффекта (см. соотношение (8)).

3. "Свободные" колебания мощности при $r < -I$

3.I. Устойчивость режима свободных колебаний и их период.

В действительности "раскачка" импульсов при значениях параметра $r < -I$ будет ограничена вследствие нелинейности и ограниченности функции $q(\rho)$ - энергия импульсов мощности не может быть отрицательной. В реакторе установится режим автоколебаний, а точнее, "свободных" колебаний (термин "автоколебания" применяется к процессам

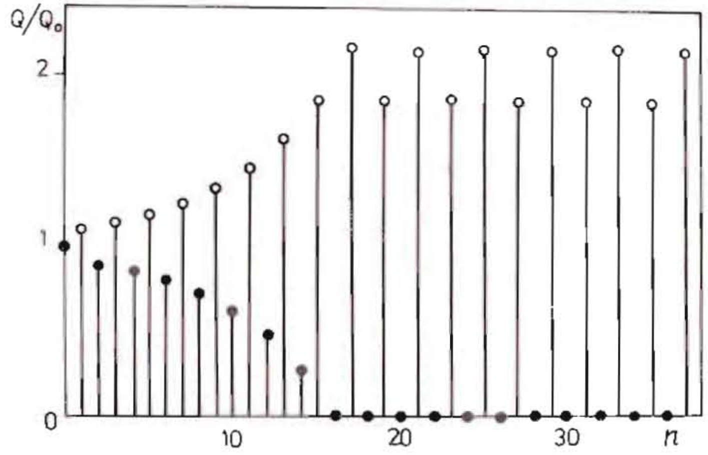

Рис. 2. Хронологическая последовательность значений энергии импульсов мощности (относительно начального значения) в импульсном периодически пульсирующем реакторе с безынерционным самогашением импульса при введении внешней реактивности $\rho = 0{,}1\,\rho_m$ перед первым импульсом ($n = 1$); реактор характеризуется параметрами: $\varphi = 0{,}9$, $r = -1{,}09$; черные кружки соответствуют чётным импульсам, белые – нечётным.

в непрерывных системах, см. /8/). В качестве примера развития процесса свободных колебаний на рис. 2 изображена хронологическая последовательность относительной энергии импульсов мощности реактора самогасящего действия с гашением без инерции, работающего в режиме периодических вспышек, после скачка реактивности $\rho = 0{,}1\,\rho_m$ в исходном состоянии с постоянной энергией импульсов. Развивающийся процесс "раскачки" импульсов прерывается после того, как энергия одного из импульсов достигнет "нулевого" значения. Спустя некоторое время устанавливаются периодические свободные колебания с периодом $N = 4$. Амплитуда свободных колебаний велика, поэтому при $r < -1$ нет смысла анализировать вынужденные колебания мощности под влиянием малых колебаний реактивности; колебания энергии импульсов мощности в таком режиме будут всегда только свободными. Задача заключается в нахождении периода и амплитуды свободных колебаний.

Аналогично выводу п. 2 можно получить систему уравнений, удовлетворяющую периодическому решению:

$$x_{n+1} = \varphi x_n + \varphi \cdot r_T \cdot q(x_n)\,, \qquad (13)$$

где $n = 1, 2, \ldots N$, $x_n = K_u \cdot K_T \cdot \delta T_n$

(в отличие от п. 2 удобнее здесь решать задачу относительно температурного эффекта реактивности, а не энергии импульсов мощности). Порядок N системы (13) заранее неизвестен; среди множества решений $x_n^{(N)}$ следует отобрать те, которые устойчивы. Очевидно, тривиальное решение системы (13) $x_n \equiv 0$ неустойчиво, т.к. вблизи $x = 0$ функция $q(x)$ линейна, и тогда справедливы выводы п. 2 (см также /3/, теорема 7.4).

Устойчивость решения системы (13) при $N = M$ физически означает, что режим свободных колебаний с периодом M спустя некоторое время после малого возмущения реактивности восстанавливается. Условие устойчивости периодического режима можно получить методом линеаризации процесса (см. /8/, с. 177). Пусть $x_n^{(M)}$ – решение системы (13) при $N = M$; при исчезающе малом возмущении реактивности получим другую систему уравнений:

$$x_{n+1}^{(M)} + \varepsilon_{n+1} = \varphi\left(x_n^{(M)} + \varepsilon_n\right) + \varphi \cdot r_T \cdot q\left(x_n^{(M)} + \varepsilon_n\right), \qquad (13')$$

где ε_n – возмущение величины $x_n^{(M)}$.

Представляя нелинейность $q(x)$ двумя первыми членами разложения по малому параметру ε_n и используя (13), получим вместо (13')

$$\varepsilon_{n+1} = \varphi \cdot \varepsilon_n + \varphi \cdot r_T \cdot \varepsilon_n \cdot q'_x\left(x_n^{(M)}\right). \qquad (14)$$

Процесс $\varepsilon(t)$ будет сходиться к нулю, если

$$\left|\frac{\varepsilon_{n+M}}{\varepsilon_n}\right| = \left|\prod_{k=1}^{M} \varphi\left(1 + r_T \cdot q'_x\left(x_k^{(M)}\right)\right)\right| \leqslant 1\,. \qquad (15)$$

Условие (15) есть условие устойчивости режима свободных колебаний с периодом M.

3.2. Анализ "свободных" колебаний в реакторе типа ИБР.

Функция $q(x)$ для ИБРа может быть представлена в виде $q = \exp(x) - 1$ /9/. Тогда периодический режим свободных колебаний описывается системой

$$X_{n+1}^{(M)} = \varphi \cdot X_n^{(M)} + \varphi \cdot r_T \left(\exp X_n^{(M)} - 1 \right), \qquad \text{(I6)}$$

$$n = 1, 2, \dots M,$$

а условие устойчивости этого режима есть

$$\left| \prod_{K=1}^{M} \varphi \cdot \left(1 + r_T \cdot \exp X_K^{(M)} \right) \right| \leqslant 1 . \qquad \text{(I7)}$$

Согласованное решение уравнений (I6) и неравенства (I7) определяет период M и амплитуду колебаний мощности $q_a = 1/2 \cdot \left[\max q(X_n^{(M)}) - \min q(X_n^{(M)}) \right]$.

Анализ показывает, что для $\varphi \sim$ I (частые импульсы мощности) свободные колебания при $-1{,}5 < r < -1$ имеют период, равный двум, и амплитуду, определяемую приближенным уравнением

$$\ln \left[(1 + q_a)/(1 - q_a) \right] \approx -2 q_a \cdot \varphi \cdot r_T / (\varphi + 1) ,$$

которое является точным при φ = I. Зависимость периода свободных колебаний от параметра r имеет сложный характер, показанный на рис. 3.

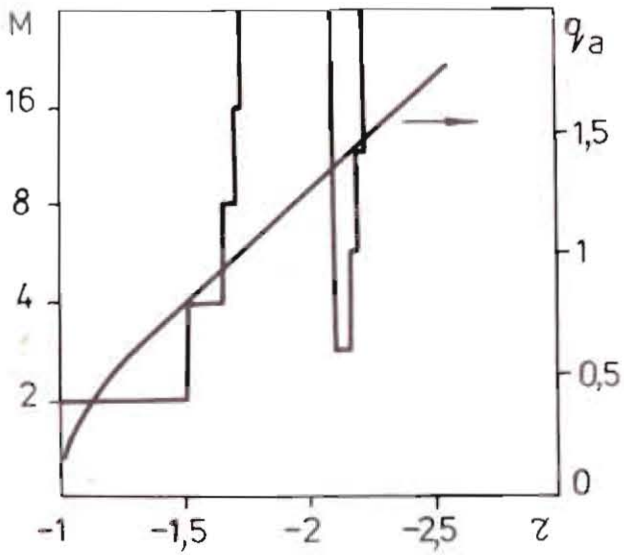

Рис. 3. Период (M) и амплитуда (q_a) "свободных" колебаний мощности в импульсном реакторе периодического действия типа ИБР в зависимости от значения параметра r (при $\varphi \approx$ I).

Интересно отметить, что в свободных колебаниях всегда $\sum_{n=1}^{M} q_n > 0$, т.е. мощность реактора увеличивается при их возникновении; этот скачок мощности сильно зависит от φ (и слабо – от r); так, при φ = 0,9 и r = -2,2 он составляет 0,05 Q_o, а при φ = 0,5 – уже 0,5 Q_o.

3.3. Свободные колебания в импульсном периодическом реакторе с безынерционным гашением импульса.

Зависимость относительного изменения энергии импульса от реактивности приближенно представим в виде

$$q(x) = \begin{cases} X, & \text{если } X \geqslant -\text{I}; \\ -\text{I}, & \text{если } X < -\text{I}. \end{cases} \qquad \text{(I8)}$$

Нетрудно получить условие устойчивости периодического режима в случае закона (I8) для $q(x)$:

$$\left| \varphi^{L} \cdot r^{M-L} \right| \leqslant 1 , \qquad \text{(I9)}$$

где L равно числу импульсов в периоде, для которых q = - I; L принимает одно из значений 0,I,... M-2. При M = 2 L имеет только нулевое значение; тогда условие (I9) не выполняется при $r < -$ I. Значит, режим знакопеременной амплитуды в импульсном реакторе самогасящего действия не возможен. При M = 3 L = I; тогда условие устойчивости:

$$\varphi r^2 \leqslant 1 . \qquad \text{(20)}$$

Из системы уравнений (I3) для импульса с q = - I получим

$$X_1 = r^2 (r - \varphi)/(\varphi r^2 - 1) \leqslant 1 . \qquad \text{(20')}$$

Условия (20) и (20') противоречивы, следовательно, режим с M = 3 тоже невозможен. Минимальное значение периода есть 4, а амплитуда больше I (см. рис. 2).

4. Выводы

4.I. При отрицательном температурном коэффициенте реактивности колебания мощности в импульсном реакторе периодического действия растут с увеличением мощности, если колебания внешней реактивности происходят с частотами, в несколько раз меньшими частоты пульсации мощности, по крайней мере в 2-4 раза.

4.2. В отличие от реактора стационарного действия область устойчивости линейного приближения импульсного реактора при отрицательном температурном коэффициенте реактивности ограничена; интервал устойчивости линейного приближения определяется неравенством (10).

4.3. Из-за нелинейного характера связи энергии импульсов мощности с введенной реактивностью колебания мощности в области свободных колебаний ограничены; период и амплитуда свободных колебаний сложным образом зависят от параметров реактора и для области, близкой к пределу устойчивости линейного приближения, могут быть определены аналитически.

Автор весьма признателен проф. Я.В.Шевелеву и к-ту физ.-мат.наук А.К.Попову за полезные дискуссии по изложенной здесь теме.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ВЛИЯНИЕ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ НА ПРЕДЕЛЫ УСТОЙЧИВОСТИ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА

В линейном приближении относительное отклонение энергии n-го импульса мощности (в отсутствие возмущения) можно записать так:

$$q_n = \sum_{i=1}^{6} \delta S_i / S + K_и \cdot K_т \delta T_n = \sum_{i=1}^{6} q_{i,n} + q_{T,n} ,$$

где S и S_i – средняя интенсивность источника запаздывающих нейтронов перед импульсом мощности, полная и i-й группы соответственно.

Концентрация источников запаздывающих нейтронов подчиняется уравнению того же типа (2), что и температура активной зоны, поэтому аналогично выводу п. 2 можно получить следующую систему разностных уравнений для определения процесса $q(t)$:

$$\begin{cases} q_{i,n+1} = q_{i,n} \cdot \varphi_i + q_n \cdot \varphi_i \cdot r_i , \quad i = 1, 2, \ldots 6, & (21) \\ q_{T,n+1} = q_{T,n} \cdot \varphi + q_n \cdot \varphi \cdot r_T , \\ q_n = \sum_{i=1}^{6} q_{i,n} + q_{T,n} , \end{cases}$$

где обозначено:

$$\varphi_i = exp(-\lambda_i t_p) , \quad r_i = \lambda_i \beta_i \Big/ \sum_{i=1}^{6} \left(\lambda_i \beta_i \cdot \varphi_i / (1 - \varphi_i) \right) ;$$

λ_i, β_i – постоянная распада и эффективная доля запаздывающих нейтронов i-й группы. Если уравнение (21) записать в векторной форме $\vec{q}_{n+1} = A \vec{q}_n$, то матрица A $[7 \times 7]$ есть

$$A = \begin{vmatrix} (\varphi_1 + \varphi_1 \cdot r_1) & \varphi_1 \cdot r_1 & \varphi_1 \cdot r_1 & \ldots & \varphi_1 \cdot r_1 \\ \varphi_2 \cdot r_2 & (\varphi_2 + \varphi_2 \cdot r_2) & \varphi_2 \cdot r_2 & \ldots & \varphi_2 \cdot r_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \varphi \cdot r_T & \varphi \cdot r_T & \varphi \cdot r_T & \ldots & r \end{vmatrix} .$$

Согласно /3/ (см. с. 101, теоремы 3 и 4) устойчивость системы определяется собственными числами матрицы А – они должны быть меньше или равны 1.

В случае одной группы запаздывающих нейтронов матрица A есть

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 1 - \varphi_1 \\ \varphi \cdot r_T & r \end{vmatrix} ,$$

характеристическое уравнение

$$(1 - \lambda)(r - \lambda) = \varphi \cdot r_T \, (1 - \varphi_1) ,$$

а корни его:

$$\lambda_{1,2} = \frac{r+1}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(r-1)^2 + 4 \varphi \cdot r_T (1 - \varphi_1)} . \qquad (22)$$

В большинстве случаев подкоренное выражение можно разложить относительно малого второго члена, и тогда для $r < 1$

$$\lambda_{1,2} = \begin{cases} 1 + \varphi \cdot r_T \cdot (1 - \varphi_1) / (1 - r) , \\ r - \varphi \cdot r_T \, (1 - \varphi_1) / (1 - r) . \end{cases} \qquad (22')$$

Путем анализа соотношения (22') нетрудно убедиться, что при отрицательном температурном эффекте реактивности учёт запаздывающих нейтронов расширяет диапазон устойчивой работы импульсного реактора –

λ становится больше I при некотором значении $|r_o| > I$, в то время как по формуле (I0), дающей условие устойчивости в приближении неизменности источника запаздывающих нейтронов, $|r_o| < I$. Напротив, при положительном температурном коэффициенте ($r_T > 0$) область устойчивости сходится к нулю – при любом наборе параметров φ, r_T и φ_1 один из корней характеристического уравнения $|\lambda| > I$.

Важно отметить, что поправка к критериальному параметру устойчивости r, связанная с запаздывающими нейтронами, незначительна; вблизи $r = -I$ она не превышает 0,I для всех разумных значений φ и φ_1. Для частых импульсов (когда промежуток времени между импульсами много меньше тепловой постоянной реактора и постоянной спада запаздывающих нейтронов) поправка равна $\sim \lambda_1 t_p$.

Литература

I. Бондаренко И.И., Стависский Ю.Я. Импульсный режим работы быстрого реактора. Атомная энергия, 1959, т. 7(5), с. 417-422.

2. Ломидзе В.Л., Пепелышев Ю.Н., Рогов А.Д., Шабалин Е.П. Сообщение ОИЯИ, Р13-12195, Дубна, 1979.

3. Иванов В.А., Ющенко А.С. Теория дискретных систем автоматического регулирования. М., Изд. "Наука", 1983, 336 с.

4. Курчатов И.В., Фейнберг С.М., Доллежаль Н.А. и др. Импульсный графитовый реактор ИГР. Атомная энергия, 1964, т. I7(6), с.463-47I.

5. Харитон Ю.Б., Воинов А.М., Колесов В.Ф. и др. Апериодические исследовательские импульсные реакторы. – В сб.: "Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики", "Наука", 1984, с. 103-119.

6. Weale J.W., Goodfellow H., McTaggart M.H. e.a. A New Fast Pulsed Reactor VIPER. – In: Fast Reactor Physics. Vol. 2, Vienna, IAEA, 1968, p. 533-549.

7. Колесов В.Ф. Параметрические уравнения динамики быстрого импульсного реактора. Атомная энергия, 1966, т. 20(3), с. 265-268.

8. Цыпкин Я.З., Попков Ю.С. Теория нелинейных импульсных систем. М., изд. "Наука", 1973, 416 с.

9. Шабалин Е.П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М., Атомиздат, 1976, 246 с.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 октября 1985 года.

Шабалин Е.П.

Р11-85-776

О колебаниях мощности и пределе устойчивости импульсных реакторов

В статье выводятся соотношения между периодическими колебаниями реактивности и энергий импульсов мощности в импульсном ядерном реакторе периодического действия с учетом температурного эффекта реактивности. Показано, что отрицательный температурный эффект реактивности увеличивает колебания мощности, вызванные малыми колебаниями внешней реактивности с частотами в диапазоне 1/2÷1/4 от частоты следования импульсов мощности. При некотором значении средней мощности реактора, таком, что безразмерный параметр обратной связи $r = -1$, усиление колебаний мощности при малых колебаний реактивности бесконечно велико, т.е. реактор переходит в область колебательной неустойчивости. Проведен анализ "свободных" колебаний мощности в этой области. Определена граница устойчивости для реактора ИБР-2 – 10 МВт; для реактора с механизмом самогашения импульса предельное значение /в смысле устойчивости/ средней мощности значительно /на два порядка/ ниже.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод автора

Shabalin E.P.

P11-85-776

On the Reactor Power Oscillations and the Stability of Pulsed Reactors

The reactivity-power relations in the case of outer reactivity periodic oscillations in a repetitively pulsed reactor are derived with reactor-power feedback taken into consideration. The results show amplification of oscillations by the negative feedback, if the oscillation frequency is 0,2-0,5 of the reactor power pulses frequency. When the nondimensional parameter of a feedback is equal (-1), the amplification goes to infinity, i.e. a reactor becomes unstable (in linear approximation). The analysis of "free" oscillations of a reactor power when the reactor is linearly unstable is given also. The power limit of nonstability for the IBR-2 reactor is estimated to be equal to 10 MW; that limit for pulsed reactors with selfquenching of power pulses is much lower (about two-order of magnitude).

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985