

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P13-97-361

А.К.Попов

АНАЛИЗ ДЛИТЕЛЬНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО
ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА МОЩНОСТИ
ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА ИБР-2

1997

Анализ длительного колебательного переходного процесса мощности импульсного реактора ИБР-2

Подобрана нелинейная модель мощностной обратной связи, обеспечившая хорошую в целом аппроксимацию зарегистрированного переходного процесса с колебаниями большой амплитуды. Модель реактора в режиме саморегулирования при такой мощностной обратной связи оказалась неустойчивой, хотя при плавных уменьшениях задающей реактивности ниже определенного уровня такой модели соответствовали устойчивые переходные процессы. Описать зарегистрированный переходный процесс с помощью устойчивой модели реактора при рассмотренной структуре мощностной обратной связи не удалось.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1997

Перевод автора

Popov A.K.

P13-97-361

Analysis of a Long Oscillatory Power Transient at the IBR-2 Reactor

A nonlinear model of power feedback was selected to ensure, on the whole, a good approximation of the calculated power transient to the measured one with a large amplitude. The model of reactor without a regulator appeared to be unstable. However, if the set reactivity decreases slowly below a certain level, transients are stable in said model. The attempt to describe the measured transient in the framework of a stable model was not successful.

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

ВВЕДЕНИЕ

После перегрузки активной зоны реактора ИБР-2 был зарегистрирован ряд переходных процессов мощности, каждый из которых был вызван разовым изменением уровня реактивности посредством перемещения штатного органа управления — промежуточного регулятора (ПР). При этом автоматический регулятор, обеспечивающий поддержание мощности на заданном уровне, был отключен.

Необычный процесс с ярко выраженной колебательностью был зарегистрирован 31 января 1997 г. при исходном уровне средней мощности 1,87 МВт, расходе теплоносителя 80 м³/ч при уменьшении уровня реактивности путем смещения ПР вниз на 3,41 мм (рис.1). Частота импульсов мощности составляла 5 имп./с. С интервалом в 1 с были зарегистрированы перемещение ПР и усредненная по 5 импульсам энергия импульсов мощности.

СВОДКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

МОС — мощностная обратная связь.

ИПХ МОС — импульсная переходная характеристика мощностей обратной связи.

ПР — промежуточный регулятор.

β_u — принятая для импульсных реакторов единица измерения реактивности. Для ИБР-2 $\beta_u = 1,6 \cdot 10^{-4}$ абсолютных единиц реактивности.

w — ИПХ МОС (β_u /МДж), представляющая собой реактивность МОС, обусловленную одним импульсом мощности.

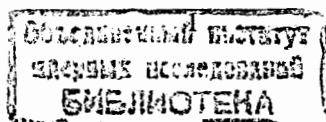
μ_i, λ_i — соответственно относительная доля и постоянная распада запаздывающих нейтронов группы i ($i = 1, \dots, 6$).

$\mu_i = 0,038; 0,28; 0,216; 0,328; 0,103; 0,035;$

$\lambda_i = 0,0129; 0,0311; 0,134; 0,331; 1,26; 3,21$ 1/с.

$T_u = 0,2$ с — период импульсов мощности.

$n, n - 1$ — номера импульсов.



$\rho, \rho_3, \rho_T, \rho_{Tl}$ — реактивность в долях β_u соответственно суммарная, задающая, мощностной обратной связи и ее l -й составляющей ($l = 1, \dots, 4$). Реактивность МОС помечена индексом T , т.к. она обусловлена температурой (разогревом реактора).

$E^0, E; S^0, S; S_i^0, S_i$ — соответственно базовые и текущие значения энергии импульса мощности, суммарной интенсивности источников запаздывающих нейтронов и ее i -й составляющей ($i = 1, \dots, 6$). Базовые значения соответствуют установившемуся режиму до изменения задающей реактивности.

$\Delta e = (E - E^0)/E^0, \Delta s = (S - S^0)/S^0, \Delta s_i = (S_i - S_i^0)/S_i^0$ — соответственно отклонения E, S и S_i от их базовых значений в относительных единицах.

$\Delta \tilde{e} = (\tilde{E} - E^0)/E^0$ — отклонение зарегистрированной энергии импульсов мощности \tilde{E} от базового значения E^0 в относительных единицах.

T_l, k_l — постоянная времени (с) и коэффициент передачи ($\beta_u/\text{МВт}$) l -й составляющей реактивности МОС ($l = 1, \dots, 4$).

k_1^0, k_2^0 — независимые составляющие коэффициентов k_1 и k_2 ($\beta_u/\text{МВт}$).

ν_1, ν_2 — показатели нелинейности коэффициентов k_1 и k_2 ($1/\beta_u$).

σ — среднее квадратическое отклонение рассчитанных значений энергии импульсов мощности от зарегистрированных.

N — число зарегистрированных импульсов мощности, используемых в расчетах.

$\omega, \bar{\omega} = \omega T_u$ — круговая частота соответственно в 1/с и в относительных единицах ($\bar{\omega} = 0 + \pi$).

$\Delta e^*(j\bar{\omega}), \rho_3^*(j\bar{\omega}), \rho_T^*(j\bar{\omega}), \Delta s^*(j\bar{\omega})$ — фурье-изображения соответствующих функций времени.

$W_R^*(j\bar{\omega}), W_T^*(j\bar{\omega}), W_S^*(j\bar{\omega}), W_{o.c.}^*(j\bar{\omega})$ — частотные импульсные передаточные функции соответственно реактора, мощностной обратной связи, запаздывающих нейтронов и полной обратной связи (разомкнутой системы).

Индекс * указывает, что фурье-изображения относятся к переменным, представленным в виде последовательностей импульсов, пропорциональных дельта-функциям.

МОДЕЛЬ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ, УЧИТЫВАЮЩАЯ МЕДЛЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

В работах [1,2] описана девятипараметрическая модель МОС. Ее ИПХ представлена тремя экспонентами, причем коэффициенты передачи всех трех

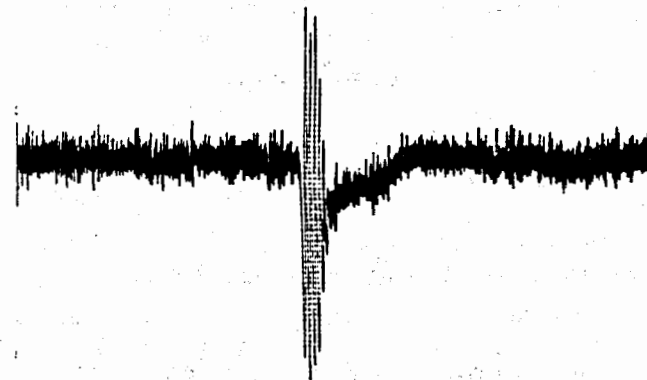


Рис.1. Зарегистрированный переходный процесс энергии импульсов мощности

экспонент в свою очередь приняты линейно зависимыми от суммарной реактивности МОС. При использовании этой модели выяснилось, что наилучшее приближение рассчитанного переходного процесса к зарегистрированному достигается, если постоянная времени самой быстрой составляющей много меньше периода импульсов T_u . Это означает, что при использовании указанной модели достаточно учитывать не три, а две экспоненты, поскольку изменение МОС, обусловленное n -м импульсом мощности, влияет лишь на $(n+1)$ -й и последующие импульсы мощности. Такая модель позволила удовлетворительно описать лишь начальную часть зарегистрированного переходного процесса с шестью периодами ярко выраженных колебаний и не позволила описать последующий подъем мощности (рис.1). В связи с этим ИПХ МОС была представлена суммой четырех экспонент. Помимо двух указанных относительно быстрых экспонент с непостоянными коэффициентами передачи дополнительно были введены две медленные экспоненты.

Для расчета (математического моделирования) переходного процесса, обусловленного заданным изменением реактивности в результате смещения ПР, были использованы уравнения (1)—(10), соответствующие n -му импульсу.

При этом принималось, что между двумя соседними замерами положения ПР, отстоящими друг от друга на 1 с, ПР перемещался по линейному закону, а 1 мм смещения ПР соответствовал изменению реактивности на $0,057 \beta_u$.

$$\rho_n = \rho_{3n} + \rho_{Tn}, \quad (1)$$

$$\Delta e_n = (\Delta s_n + 1) \exp \rho_n - 1, \quad (2)$$

$$\rho_{Tn} = \sum_{l=1}^4 \rho_{Tln}, \quad (3)$$

$$\rho_{T1n} = \left(\rho_{T1n-1} + E^0 \Delta e_{n-1} \frac{k_1}{T_1} \right) \exp \left(-\frac{T_u}{T_1} \right), \quad (4)$$

$$k_1 = k_1^0 (1 + v_1 \rho_{T1n-1}), \quad (4a)$$

$$\rho_{T2n} = \left(\rho_{T2n-1} + E^0 \Delta e_{n-1} \frac{k_2}{T_2} \right) \exp \left(-\frac{T_u}{T_2} \right), \quad (5)$$

$$k_2 = k_2^0 (1 + v_2 \rho_{T2n-1}), \quad (5a)$$

$$\rho_{T3n} = \left(\rho_{T3n-1} + E^0 \Delta e_{n-1} \frac{k_3}{T_3} \right) \exp \left(-\frac{T_u}{T_3} \right), \quad (6)$$

$$\rho_{T4n} = \left(\rho_{T4n-1} + E^0 \Delta e_{n-1} \frac{k_4}{T_4} \right) \exp \left(-\frac{T_u}{T_4} \right), \quad (7)$$

$$k_3/T_3 = -k_4/T_4, \quad (8)$$

$$\Delta s_n = \sum_{i=1}^6 \left(\Delta s_{in-1} + \frac{E^0}{S^0} \mu_i \lambda_i \Delta e_{n-1} \right) \exp (-\lambda_i T_u), \quad (9)$$

$$\frac{E^0}{S^0} = 1 / \sum_{i=1}^6 \mu_i \lambda_i \frac{\exp (-\lambda_i T_u)}{1 + \exp (-\lambda_i T_u)}. \quad (10)$$

Условие (8) выбрано из физических соображений и означает следующее. Любой импульс мощности приводит к изменению реактивности медленной МОС, которая определяется суммой уравнений (6) и (7), но в момент появления импульса эта сумма не изменяется.

В процессе математического моделирования переходных процессов задавались различные значения k_l/T_l , T_l ($l = 1, \dots, 4$) а также v_1 и v_2 . Путем пере-

бора были определены значения параметров МОС, при которых среднеквадратическое отклонение смоделированных по уравнениям (1)–(10) значений Δe от зарегистрированных значений $\Delta \tilde{e}$ минимально:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{\bar{n}=1}^{\bar{N}} (\Delta e_{\bar{n}} - \Delta \tilde{e}_{\bar{n}})^2} = \min. \quad (11)$$

Черта над индексом указывает, что в формуле (11) используются значения энергии не всех импульсов мощности Δe_n , а лишь значения тех импульсов $\Delta e_{\bar{n}}$, которые совпадают по времени с зарегистрированными значениями $\Delta \tilde{e}_{\bar{n}}$.

ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОЩНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ И ТОЧНОСТЬ АППРОКСИМАЦИИ

При расчетах использовалось $\bar{N} = 1000$ зарегистрированных импульсов, т.е. продолжительность переходного процесса составляла 1000 с: В результате были определены следующие значения параметров.

Для быстрой МОС

$$k_1^0 = -8,12; \quad k_2^0 = 6,97 \beta_u / \text{МВт};$$

$$v_1 = -0,008; \quad v_2 = -0,29 \text{ 1}/\beta_u;$$

$$T_1 = 5,6; \quad T_2 = 4,3 \text{ с};$$

$$(k_1^0/T = -1,45; \quad k_2^0/T = 1,62 \beta_u / \text{МДж}). \quad (12)$$

Для медленной МОС

$$k_3 = 15,12; \quad k_4 = -26,46 \beta_u / \text{МВт};$$

$$T_3 = 560; \quad T_4 = 980 \text{ с};$$

$$(k_3/T_3 = 0,027; \quad k_4/T_4 = -0,027 \beta_u / \text{МДж}). \quad (13)$$

На рис.2 и 3 показаны зарегистрированные переходные процессы, а также процессы, соответствующие вычисленным параметрам.

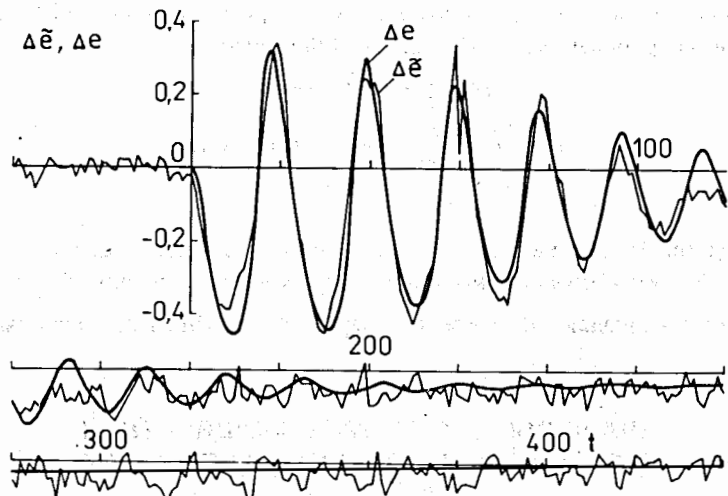


Рис.2. Измеренные $\Delta \tilde{e}$ и вычисленные Δe относительные отклонения энергии импульсов мощности. t — время (с)

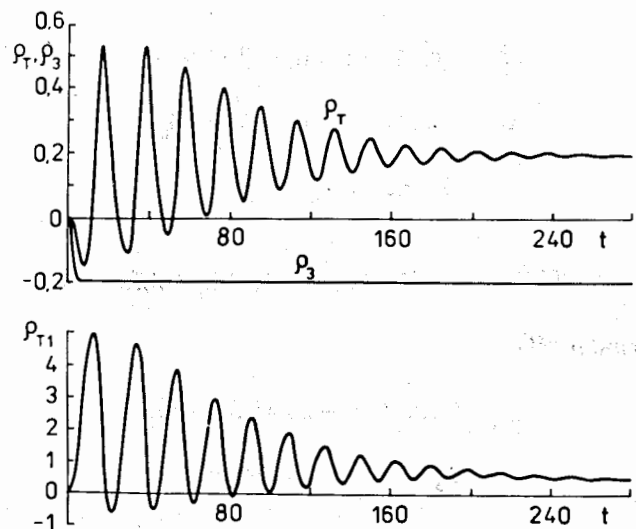


Рис.3. Задающая реактивность ρ_3 и рассчитанные реактивности ρ_T и ρ_{T1} мощностной обратной связи. t — время (с)

Следует отметить, что коэффициент передачи k_1 (с отрицательной постоянной составляющей k_1^0), который обуславливает составляющую реактивности ρ_{T1} (4), принят зависящим от этой же составляющей (4а). Коэффициент же k_2 принят зависящим от суммарной реактивности ρ_T (5), (5а), (3). Именно такая модель обеспечила наименьшее $\sigma = 0,0354$ (11).

Такое отличие в уравнениях (4а) и (5а) можно объяснить, если предположить, что отрицательная составляющая быстрой МОС (4) обусловлена в основном расширением тепловыделяющих элементов, вызванных их разогревом. Положительная же составляющая быстрой МОС (5) обусловлена многими факторами, формирующими полную (суммарную) реактивность МОС.

Были опробованы и другие зависимости коэффициентов k_1 и k_2 от реактивности, но они дали худшие результаты с большими значениями σ^2 . Так при использовании в уравнении (4а) вместо ρ_{T1} суммарной реактивности ρ_T , т.е. той же реактивности, что и в (5а), наилучшая аппроксимация характеризовалась значением $\sigma = 0,0411$. При использовании же в уравнении (5а) ρ_{T1} вместо ρ_T и сохранении без изменений уравнения (4а), т.е. при зависимости и k_1 , и k_2 от ρ_{T1} , получилось значение $\sigma = 0,0484$.

Кроме того, было оценено влияние показателей нелинейности ν_1 и ν_2 в коэффициентах k_1 и k_2 на переходный процесс мощности. Так при $\nu_1 = 0$ (а не $-0,008$) получилось значение $\sigma = 0,0845$ (а не $0,0354$). При изменении ν_2 на 10% — $\nu_2 = -0,29$ (вместо $-0,26$) — и сохранении значений прочих параметров (12), (13) получилось $\sigma = 0,0633$.

ИМПУЛЬСНАЯ ПЕРЕХОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

ИПХ МОС, выраженная в β_u /МДж, представляет из себя реактивность МОС в β_u , обусловленную единичным импульсом мощности с энергией 1 МДж. Она описывается формулой

$$w_n = \sum_{l=1}^4 \frac{k_l}{T_l} \exp\left(-\frac{nT_u}{T_l}\right), \quad (14)$$

в которой коэффициент передачи быстрой составляющей МОС k_2 зависит от суммарной реактивности МОС ρ_T (5а), а коэффициент k_1 — от одной из ее составляющих ρ_{T1} (4а).

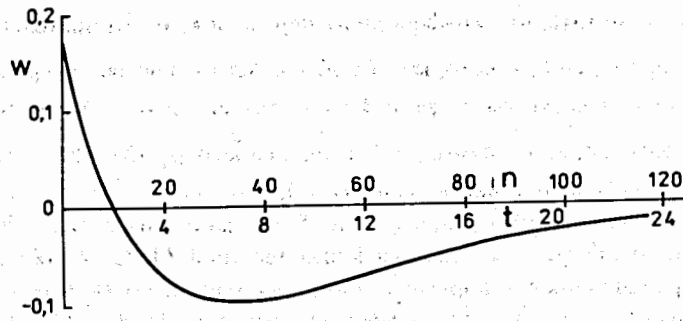


Рис.4. Импульсная переходная характеристика мощной обратной связи w (огibaющая) в β_u /МДж. n — номер импульса, t — время (с)

При малых отклонениях переменных от их базовых значений, соответствующих исходному установившемуся режиму, ρ_{T1} и ρ_T , входящие в формулы (4а) и (5а), малы и справедливы соотношения

$$1 + v_1 \rho_{T1} \approx 1,$$

$$1 + v_2 \rho_T \approx 1. \quad (15)$$

В этом случае ИПХ МОС (14) принимает вид

$$w_n = \sum_{l=1}^2 \frac{k_l^0}{T_l} \exp\left(-\frac{nT_u}{T_l}\right) + \sum_{l=3}^4 \frac{k_l}{T_l} \exp\left(-\frac{nT_u}{T_l}\right), \quad (14a)$$

где первая сумма обусловлена быстрой МОС, а вторая — медленной (рис.4).

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ МОДЕЛИ РЕАКТОРА

При малых отклонениях реактивности и мощности, при которых возможна линеаризация уравнений (2), (4), (5) и соблюдаются условия (15), частотная импульсная передаточная функция реактора принимает следующий вид [2]:

$$W_R^*(j\omega) = \frac{\Delta e^*(j\omega)}{\rho_3^*(j\omega)} = \frac{1}{1 - W_S^*(j\omega) - E^0 W_T^*(j\omega)} = \frac{1}{1 + W_{o.c.}^*(j\omega)}, \quad (16)$$

где

$$W_T^*(j\omega) = \frac{\rho_T^*(j\omega)}{E^0 \Delta e^*(j\omega)} = \sum_{l=1}^2 \frac{k_l^0}{T_l} \frac{\exp(-T_u/T_l)}{\exp(j\omega) - \exp(-T_u/T_l)} + \sum_{l=3}^4 \frac{k_l}{T_l} \frac{\exp(-T_u/T_l)}{\exp(j\omega) - \exp(T_u/T_l)}, \quad (17)$$

$$W_S^*(j\omega) = \frac{\Delta s^*(j\omega)}{\Delta e^*(j\omega)} = \frac{E^0}{S^0} \sum_{i=1}^6 \mu_i \lambda_i \frac{\exp(-\lambda_i T_u)}{\exp(j\omega) - \exp(-\lambda_i T_u)}, \quad (18)$$

$$W_{o.c.}^*(j\omega) = -W_S^*(j\omega) - E^0 W_T^*(j\omega). \quad (19)$$

Знаменатель $W_R^*(j\omega)$ (16) представлен в виде суммы $1 + W_{o.c.}^*(j\omega)$, где $W_{o.c.}^*(j\omega)$ является одновременно передаточной функцией разомкнутой системы. Следовательно, для устойчивости реактора необходимо, чтобы на комплексной плоскости годограф $W_{o.c.}^*(j\omega)$ при изменении ω от 0 до π не охватывал точку с координатами $-1, j0$. Для выбранных значений параметров МОС (12), (13) это условие не выполняется (рис.5), т.е. модель реактора неустойчива. В то же время при этих значениях параметров достигнуто хорошее приближение рассчитанного переходного процесса к зарегистрированному. Переходные же процессы, рассчитанные при типовых возмущениях, т.е. при задающей реактивности в виде одиночного импульса различной амплитуды или скачка различного уровня, оказались расходящимися и подтвердили, что рассмотренная модель реактора неустойчива.

На рис.6 показана граница устойчивости в области параметров k_1^0 и k_2^0 . Область параметров ниже (левее) границы устойчивости соответствует устойчивому реактору. Из рис.6 видно, что точка, соответствующая выбранным k_1^0 и k_2^0 (12), находится в области неустойчивости.

Зарегистрированный переходный процесс был обусловлен не скачкообразным, а плавным изменением задающей реактивности. Новый уровень ρ_3 устанавливался в течение 30 импульсов мощности, т.е. через 6 с после начала движения ПР. Учитывая это, была рассчитана серия переходных процессов при изменении ρ_3 от 0 до $-\rho_3^0$ не скачком, а по линейному закону (рис. 7а):

$$\rho_{3n} = -\rho_3^0 n / N_3 \text{ при } n \leq N_3, \\ \rho_{3n} = -\rho_3^0 \text{ при } n > N_3, \quad (20)$$

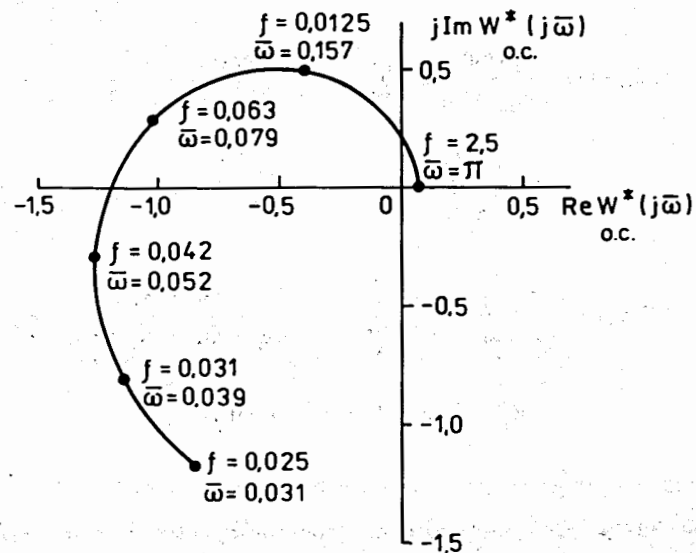


Рис.5. Амплитудно-фазочастотная характеристика разомкнутой системы. f — частота в Гц, $\bar{\omega}$ — круговая частота в относительных единицах

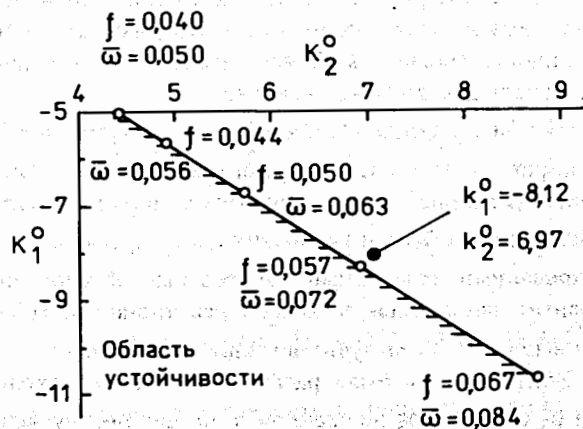


Рис.6. Граница устойчивости в плоскости параметров k_1^0 и k_2^0 быстрой мощностной обратной связи. f , $\bar{\omega}$ — частоты возможных колебаний в Гц и в относительных единицах

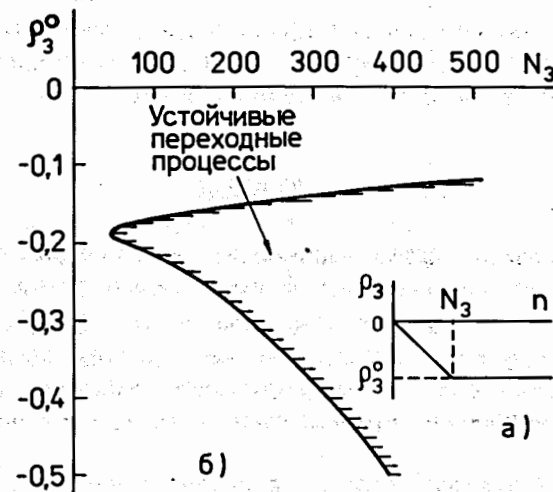


Рис.7. Граница устойчивых переходных процессов (б) при задающей реактивности (а)

где $n = 0, \dots, N_3, \dots, N$. Расчеты были проведены при различных значениях ρ_3^0 и N_3 .

На рис.7б показана граница устойчивых переходных процессов в области параметров N_3, ρ_3^0 . Если изменение ρ_3 (рис.7а) характеризуется значениями N_3 и ρ_3^0 , принадлежащими области правее изображенной на рис.7б границы, то соответствующие им переходные процессы Δe устойчивы.

Таким образом, если задающая реактивность понижается ниже определенного уровня, и переход на этот уровень происходит не слишком быстро, то нелинейной модели реактора, являющейся в целом неустойчивой, соответствуют тем не менее устойчивые переходные процессы.

Попытки смоделировать зарегистрированный переходный процесс с помощью устойчивых моделей реактора при сохранении принятой структуры мощностной обратной связи оказались неудачными: колебания в процессах, рассчитанных для этих моделей, очень быстро затухали.

Неустойчивость рассмотренной модели реактора не дает тем не менее оснований утверждать, что сам реактор неустойчив. На это указывает одно различие между достаточно близкими в целом переходными процессами (рассчитанным и зарегистрированным). В рассчитанном процессе колебания плавно затухают. В зарегистрированном же процессе на шестом периоде колебаний наблюдается их срыв (рис. 2). Это указывает на то, что рассмотрен-

ная модель реактора не учитывает какую-то существенную нелинейность. В связи с этим можно предположить, что реактор в рассмотренном режиме устойчив, хотя запас устойчивости, вероятно, невелик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ зарегистрированного продолжительного переходного процесса мощности с колебаниями большой амплитуды при средней мощности реактора 1,87 МВт и расходе теплоносителя 80 м³/ч. Импульсная переходная характеристика мощностной обратной связи представлена двумя быстрыми экспонентами с коэффициентами передачи, зависящими от реактивности мощностной обратной связи, и двумя медленными экспонентами.

В результате получено хорошее в целом приближение рассчитанного переходного процесса к зарегистрированному.

2. Анализ устойчивости реактора в режиме саморегулирования, т.е. без автоматического регулятора, показал, что хотя плавным понижениям уровней задающей реактивности соответствуют устойчивые переходные процессы, в целом использованная модель соответствует неустойчивому реактору.

3. Рассчитанный переходный процесс не отразил срыв колебаний, имевший место в зарегистрированном процессе, в связи с чем из неустойчивости рассмотренной модели реактора нельзя делать вывод о неустойчивости самого реактора. Различие между переходными процессами указывает лишь на необходимость дальнейшего уточнения модели.

4. Замеры вынужденных колебаний мощности с периодом колебаний 32 с, осуществляемые на ИБР-2 для выявления изменений параметров реактора, целесообразно дополнить регистрацией более продолжительных переходных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов А.К. — Сообщение ОИЯИ, P13-95-464, Дубна, 1995.
2. Попов А.К. — Сообщение ОИЯИ, P13-96-297, Дубна, 1996.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 ноября 1997 года.