

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

98-275

P13-98-275

А.К.Попов

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ  
ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА ИБР-2  
ПРИ ВКЛЮЧЕННОМ АВТОМАТИЧЕСКОМ  
РЕГУЛЯТОРЕ

1998

В работе [1] проведен анализ переходного процесса мощности с ярко выраженными колебаниями. Этот процесс зарегистрирован 31 января 1997 г. при отключенном автоматическом регуляторе АР. Были подобраны параметры мощностной обратной связи, при которых рассчитанный переходный процесс наилучшим образом приближался к зарегистрированному. Оказалось, что соответствующая этому случаю модель реактора с отключенным АР (при средней мощности 1,87 МВт и расходе теплоносителя 80 м<sup>3</sup>/ч) оказалась неустойчивой.

Ниже эта модель реактора исследуется в режиме с включенным автоматическим регулятором.

### РАСЧЕТНАЯ ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА

Для исследования устойчивости реактора в режиме автоматического поддержания мощности необходимо знать передаточную функцию АР. Поскольку экспериментального определения ее не проводилось, она была получена расчетным путем.

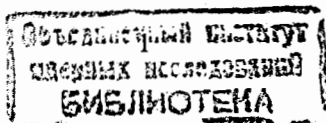
Перемещение стержня АР осуществляется шаговым двигателем. Его скорость зависит от относительного отклонения  $\Delta p_n$  амплитуды текущего импульса мощности  $P_n$  от его желаемого (базового) значения  $P^0$

$$\Delta p_n = \frac{P_n - P^0}{P^0}, \quad (1)$$

которое практически равно относительному отклонению  $\Delta e_n$  энергии текущего импульса мощности  $E_n$  от ее желаемого (базового) значения  $E^0$

$$\Delta e_n = \frac{E_n - E^0}{E^0} = \frac{\Delta E_n}{E^0} \approx \Delta p_n. \quad (2)$$

Учитывая разброс относительных амплитуд импульсов мощности, осуществляют их сглаживание специальным блоком сглаживания в соответствии с формулой



$$\Delta \tilde{p}_n = \Delta \tilde{p}_{n-1} + \frac{\Delta p_n - \Delta \tilde{p}_{n-1}}{k}, \quad (3)$$

где  $\Delta \tilde{p}_{n-1}$ ,  $\Delta \tilde{p}_n$  — сглаженные относительные отклонения амплитуд  $(n-1)$ -го и  $n$ -го импульсов,  $k$  — коэффициент сглаживания.

Смысл коэффициента  $k$  хорошо просматривается, если формулу (3) записать в ином виде:

$$\Delta \tilde{p}_n - \Delta \tilde{p}_{n-1} = (\Delta p_n - \Delta \tilde{p}_n) / k. \quad (3a)$$

Видно, что разность сглаженных соседних значений блока сглаживания в  $k$  раз меньше разности между текущим значением входной величины и ее сглаженным значением, соответствующим предыдущему импульсу.

Предусмотрена возможность устанавливать четыре фиксированных значения  $k$ : 4, 8, 16, 32.

Отклонение  $\Delta \tilde{p}$  передается на блок управления шаговым двигателем АР. Предусмотрен выбор фиксированных значений коэффициентов пропорциональности между  $\Delta \tilde{p}$  и частотой управляющих импульсов шагового двигателя (иначе говоря, скоростью шагового двигателя). Это обеспечивается тем, что выбирается одно из четырех значений  $\Delta$  (0,05; 0,10; 0,15; 0,20), каждому из которых соответствует одна и та же скорость шагового двигателя АР  $v^0 = 5,5$  шагов в секунду.

При расчете передаточной функции АР было принято, что один шаг перемещения АР соответствует изменению реактивности ИБР-2 на  $m_p = 0,0136 \beta_n$ , где  $\beta_n$  — импульсная доля запаздывающих нейтронов (для ИБР-2  $\beta_n = 1,6 \cdot 10^{-4}$  абсолютных единиц реактивности). Таким образом, коэффициент передачи шагового двигателя совместно со стержнем АР равен  $(v^0 / \Delta) \cdot m_p = 0,0748 / \Delta \beta_n / c$ .

Как следует из формулы (3), блок сглаживания формирует сигнал на своем выходе по линейному закону. Поэтому его передаточную функцию легче всего вычислить, если положить, что для первого импульса относительная амплитуда равна  $\Delta p_1$ , а для всех прочих импульсов она равна нулю. Тогда согласно формуле (3)

$$\Delta \tilde{p}_1 = \frac{\Delta p_1}{k}, \Delta \tilde{p}_2 = \frac{\Delta p_1}{k} \left(1 - \frac{1}{k}\right), \Delta \tilde{p}_3 = \frac{\Delta p_1}{k} \left(1 - \frac{1}{k}\right)^2, \dots, \Delta \tilde{p}_n = \frac{\Delta p_1}{k} \left(1 - \frac{1}{k}\right)^{n-1},$$

т.е. последовательность  $\Delta \tilde{p}_1, \Delta \tilde{p}_2, \dots, \Delta \tilde{p}_n$  представляет собой убывающую геометрическую прогрессию со знаменателем

$$q = \left(1 - \frac{1}{k}\right) < 1. \quad (4)$$

Таким образом, входной и выходной сигналы блока сглаживания как функции времени пропорциональны дельта-функциям. Такие функции принято помечать звездочками.

$$\Delta p^*(t) = \Delta p_1 \delta(t), \quad (5)$$

$$\Delta \tilde{p}^*(t) = \frac{\Delta p_1}{k} \sum_{n=1}^{\infty} q^{n-1} \delta(t - (n-1)T_n), \quad (6)$$

где  $T_n = 0,2$  с — период следования импульсов мощности.

Фурье-изображения сигналов (5) и (6) равны

$$\Delta p^*(j\bar{\omega}) = \Delta p_1, \quad (7)$$

$$\Delta \tilde{p}^*(j\bar{\omega}) = \frac{\Delta p_1}{k} \sum_{n=1}^{\infty} q^{n-1} \exp(-j\bar{\omega}(n-1)), \quad (8)$$

где  $\bar{\omega} = \omega T_n$  — круговая частота в относительных единицах ( $\bar{\omega} = 0 \div \pi$ ),  $\omega$  — круговая частота в  $c^{-1}$ .

Если положить

$$q = \exp(\alpha), \quad (9)$$

где

$$\alpha = \ln \left(1 - \frac{1}{k}\right), \quad (10)$$

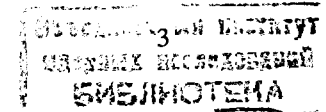
то уравнение (8) примет вид суммы убывающей геометрической прогрессии

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{p}^*(j\bar{\omega}) &= \frac{\Delta p_1}{k} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\{(\alpha - j\bar{\omega})(n-1)\} = \frac{\Delta p_1}{k} \frac{1}{1 - \exp(\alpha - j\bar{\omega})} = \\ &= \frac{\Delta p_1}{k} \frac{\exp(j\bar{\omega})}{\exp(j\bar{\omega}) - \exp(\alpha)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Передаточная функция блока сглаживания получается из уравнений (11) и (7):

$$W_1^*(j\bar{\omega}) = \frac{\Delta \tilde{p}^*(j\bar{\omega})}{\Delta p^*(j\bar{\omega})} = \frac{1}{k} \frac{\exp(j\bar{\omega})}{\exp(j\bar{\omega}) - \exp(\alpha)}. \quad (12)$$

Скорость шагового двигателя, и следовательно, скорость изменения реактивности АР пропорциональны значениям  $\Delta \tilde{p}$  (3). Поэтому передаточная функция шагового двигателя совместно со стержнем АР имеет вид:



$$W_2^*(j\bar{\omega}) = \frac{\rho_{AP}^*(j\bar{\omega})}{\Delta \bar{p}^*(j\bar{\omega})} = \frac{0,0748}{\Delta} T_n \frac{\exp(j\bar{\omega})}{\exp(j\bar{\omega}) - 1}, \quad (13)$$

где  $\rho_{AP}^*(j\bar{\omega})$  — фурье-изображение реактивности АР.

Передаточная функция автоматического регулятора определяется как произведение передаточных функций (12) и (13).

$$W_{AP}^*(j\bar{\omega}) = \frac{\rho_{AP}^*(j\bar{\omega})}{\Delta \bar{p}^*(j\bar{\omega})} = k_{AP} \frac{\exp(j\bar{\omega})}{\exp(j\bar{\omega}) - \exp(\alpha)} \cdot \frac{\exp(j\bar{\omega})}{\exp(j\bar{\omega}) - 1} \approx \frac{\rho_{AP}^*(j\bar{\omega})}{\Delta e^*(j\bar{\omega})}, \quad (14)$$

где

$$k_{AP} = \frac{0,0748 \cdot T_n}{k \cdot \Delta} \quad (15)$$

— коэффициент передачи АР.

Приближенное равенство в выражении (14) объясняется практическим равенством  $\Delta p$  и  $\Delta e$  (2).

### УСТОЙЧИВОСТЬ РЕАКТОРА В РЕЖИМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОДДЕРЖАНИЯ МОЩНОСТИ

Структурная схема реактора ИБР-2 совместно с автоматическим регулятором показана на рис.1. Там помечена передаточная функция реактора  $W_R^*(j\bar{\omega})$  и составляющие ее передаточные функции запаздывающих нейтронов  $W_S^*(j\bar{\omega})$  и мощностной обратной связи  $W_T^*(j\bar{\omega})$ .

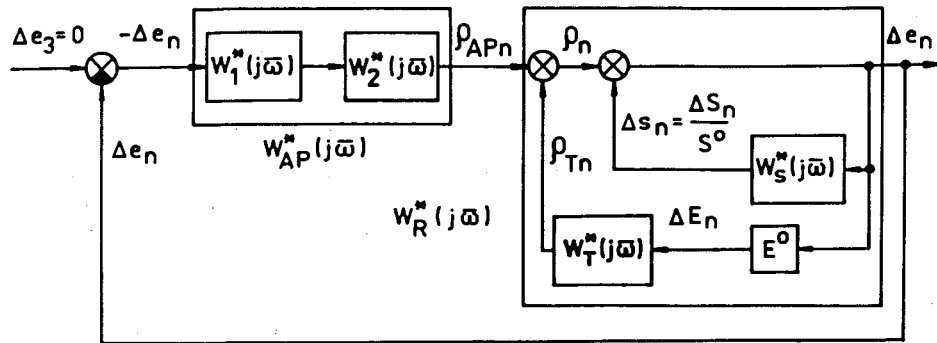


Рис.1. Структурная схема замкнутой системы автоматического поддержания мощности реактора

$$W_S^*(j\bar{\omega}) = \frac{\Delta s^*(j\bar{\omega})}{\Delta e^*(j\bar{\omega})} =$$

$$= \sum_{i=1}^6 \mu_i \lambda_i \frac{\exp(-\lambda_i T_n)}{\exp(j\bar{\omega}) - \exp(-\lambda_i T_n)} / \sum_{i=1}^6 \mu_i \lambda_i \frac{\exp(-\lambda_i T_n)}{1 - \exp(-\lambda_i T_n)}, \quad (16)$$

где  $\Delta s^*(j\bar{\omega})$  — фурье-изображение относительного отклонения  $\Delta s = (S - S^0)/S^0$  суммарной интенсивности запаздывающих нейтронов  $S$  от ее базового значения  $S^0$ ;  $\mu_i, \lambda_i$  — соответственно относительная доля и постоянная распада запаздывающих нейтронов группы  $i$  ( $\mu_i = 0,038; 0,28; 0,216; 0,328; 0,103; 0,035$ ;  $\lambda_i = 0,0129; 0,0311; 0,134; 0,331; 1,26; 3,21 \text{ с}^{-1}$ ).

$$W_T^*(j\bar{\omega}) = \frac{\rho_T^*(j\bar{\omega})}{\Delta E^*(j\bar{\omega})} = \sum_{l=1}^4 \frac{k_l}{T_l} \frac{\exp(-T_n/T_l)}{\exp(j\bar{\omega}) - \exp(-T_n/T_l)}, \quad (17)$$

где  $\rho_T^*(j\bar{\omega})$  — фурье-изображение реактивности мощностной обратной связи (в качестве единицы измерения реактивности принята  $\beta_n$ ). Значения коэффициентов передачи  $k_l$  и постоянных времени  $T_l$  мощностной обратной связи в соответствии с [1] были приняты следующими:  $k_l = -8,12; 6,97; 15,12; -26,46$   $\beta_n/\text{МВт}$ ,  $T_l = 5,6; 4,3; 560; 980 \text{ с}$ .

$$W_R^*(j\bar{\omega}) = \frac{\Delta e^*(j\bar{\omega})}{\rho_{AP}^*(j\bar{\omega})} = \frac{1}{1 - W_S^*(j\bar{\omega}) - E^0 W_T^*(j\bar{\omega})}. \quad (18)$$

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

Были вычислены амплитудно-фазочастотные характеристики разомкнутой системы  $W_p^*(j\bar{\omega}) = W_{AP}^*(j\bar{\omega}) W_R^*(j\bar{\omega})$  для всех возможных комбинаций параметров АР  $k$  и  $\Delta$ . Поскольку рассмотренному в [1] колебательному переходному процессу мощности ИБР-2 без АР соответствует неустойчивая модель реактора, то реактор с включенным АР будет устойчив, если амплитудно-фазочастотная характеристика разомкнутой системы с ростом частоты  $\bar{\omega}$  один раз охватит точку с координатами  $-1, j0$  в направлении против часовой стрелки. Это условие выполняется при  $k=4$  и всех значениях  $\Delta$  от 0,05 до 0,20 (рис.2), а также при  $k=8$  и  $\Delta = 0,05; 0,10$  и 0,15. При  $k=8$  и  $\Delta = 0,20$  реактор совместно с АР уже неустойчив. При  $k$ , равных 16 и 32, реактор совместно с АР неустойчив при всех значениях  $\Delta$  от 0,05 до 0,20.

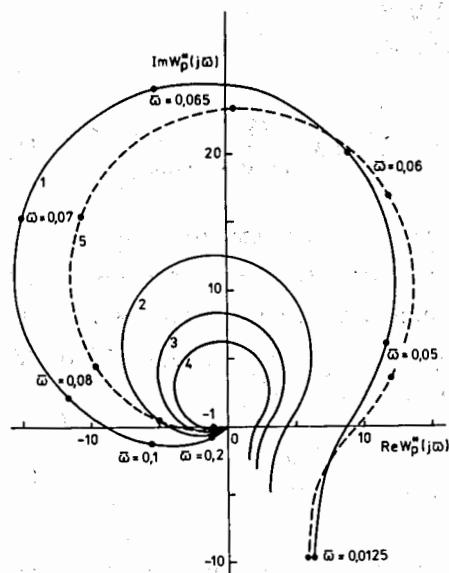


Рис.2. Амплитудно-фазочастотные характеристики разомкнутой системы «автоматический регулятор — реактор». 1 —  $k=4$ ,  $\Delta=0,05$ ; 2 —  $k=4$ ,  $\Delta=0,10$ ; 3 —  $k=4$ ,  $\Delta=0,15$ ; 4 —  $k=4$ ,  $\Delta=0,20$ ; 5 —  $k=8$ ,  $\Delta=0,05$ .

Увеличение инерционности блока сглаживания. Увеличение параметра скорости АР (он может принимать значения 0,05; 0,10; 0,15; 0,20), т.е. уменьшение скорости АР также приводит к понижению запаса устойчивости.

При средней мощности 1,87 МВт и расходе теплоносителя 80 м<sup>3</sup>/ч реактор совместно с АР устойчив лишь при малых значениях коэффициента сглаживания (4 и 8). При девяти комбинациях параметров АР из предусмотренных шестнадцати реактор неустойчив.

В настоящее время на ИБР-2 установлены значения параметров АР  $k=4$  и  $\Delta=0,20$ . Как видно из рис.2, для увеличения запаса устойчивости целесообразно установить меньшие значения  $\Delta$ , т.е. повысить скорость АР при тех же рассогласованиях мощности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Расчетным путем получена передаточная функция автоматического регулятора.

2. Проведен анализ рассчитанных амплитудно-фазочастотных характеристик разомкнутой системы, состоящей из автоматического регулятора и реактора. Показано, что запас устойчивости реактора ИБР-2 с включенным АР понижается с увеличением коэффициента сглаживания (он может принимать значения 4, 8, 16, 32), т.е. с увеличением инерционности блока сглаживания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Попов А.К. — Сообщение ОИЯИ Р13-97-361, Дубна, 1997.

Рукопись поступила в издательский отдел  
30 сентября 1998 года.

Попов А.К.

P13-98-275

Анализ устойчивости импульсного реактора ИБР-2  
при включенном автоматическом регуляторе

Вычислена передаточная функция автоматического регулятора (АР) с учетом блока сглаживания входного сигнала. Проанализировано влияние параметров автоматического регулятора на устойчивость реактора. Показано, что увеличение инерционности блока сглаживания АР и уменьшение скорости перемещения стержня АР приводят к уменьшению запаса устойчивости, и даже к неустойчивости реактора.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1998

Popov A.K.

P13-98-275

Analysis of the Stability of the IBR-2 Pulsed Reactor  
with the Automatic Controller

The transfer function of the automatic controller, including the smooth block, was calculated. The influence of the parameters of the automatic controller on the reactor stability was analysed. It is shown that the increase of inertia of the smooth block and the decrease of the control rod speed lead to decrease of the reactor stability reserve and even to the instability of the reactor.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1998