

УДК 621.039.514

О статистической погрешности вычисления баланса реактивности

КЕБАДЗЕ Б. В., ЕФИМОВ В. Н., АДАМОВСКИЙ Л. А.

Вычисление баланса реактивности (ВБР) — один из наиболее эффективных способов контроля состояния активной зоны энергетического реактора. Принцип его состоит в решении уравнения баланса относительно реактивности, вызванной аномальными явлениями в активной зоне [1]:

$$\rho_a = \rho_R - \rho(\Pi_i).$$

Здесь ρ_R — реактивность, определяемая решением уравнения кинетики, а $\rho(\Pi_i)$ связана с изменением параметров реактора: его мощности, расхода и входной температуры теплоносителя, давления в реакторе, положения стержней управления. При формулировании требований к чувствительности системы ВБР исходят обычно из величины изменения реактивности, соответствующей аномалии, которую надо обнаружить. Однако и в нормальных режимах наблюдаются случайные флюктуации реактивности, на фоне которых также необходимо обнаружить полезный сигнал об аномалии. Кроме того, сигналы датчиков содержат дополнительные шумовые составляющие, не связанные непосредственно с флюктуациями измеряемого параметра. Цель настоящей работы — оценить ограничение чувствительности системы ВБР вследствие шумов. Расчетная методика демонстрируется на примере быстрого натриевого реактора BOR-60. Рассмотрим упрощенную структурную схему ВБР (рис. 1), где внешними по отношению к активной зоне возмущениями являются изменение расхода G и входная температура T теплоносителя; их вклад вычитается из колебаний нейтронной мощности N . Рассмотрение ведется в рамках «точечной» кинетики, причем ввиду малости отклонений от стационарного режима уравнения системы линеаризованы и динамические связи представлены в виде импульсных переходных функций (ИПФ). Здесь $h_R^{-1}(\theta) = \delta(\theta)$ —

$$-\sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i \lambda_i}{\beta} \exp(-\lambda_i \theta) - \text{инверсная ИПФ физическо-}$$

го реактора при времени жизни мгновенных нейтронов $l^* \rightarrow 0$; $h_{o.c.}$, h_{GN} , h_{TN} — ИПФ обратной связи по нейтронной мощности и связях по каналам $G-N$, $T-N$, определяемые экспериментально. Отклонения параметров регистрировались ионизационными камерами (ИК), магнитными расходомерами (МР), термопарой на входе в активную зону. Экспериментальные оценки корреляционных функций (КФ) флюктуаций сигналов этих датчиков приведены на рис. 2; погрешность их определения составляла $\sim 3\%$. Основным источником флюктуаций на выходе системы ВБР являются шумы ИК, которые могут быть вызваны общими для всего реактора шумами реактивности, локальными возмущениями нейтронного потока либо собственными шумами детектора. Измерения взаимной корреляции сигналов двух ИК показали, что используемая в экспериментах камера регистрирует практически только общереакторные шумы. Этот компонент наиболее важен с точки зрения статистической погрешности ВБР. Некоторая доля шумов нейтронной мощности обусловлена флюктуациями внешних параметров — расхода и входной температуры теплоносителя. Эта доля может быть скомпенсирована в системе ВБР.

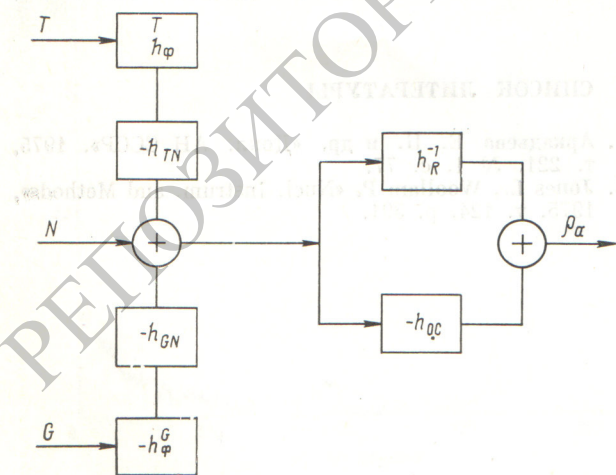


Рис. 1. Структурная схема системы вычисления баланса реактивности

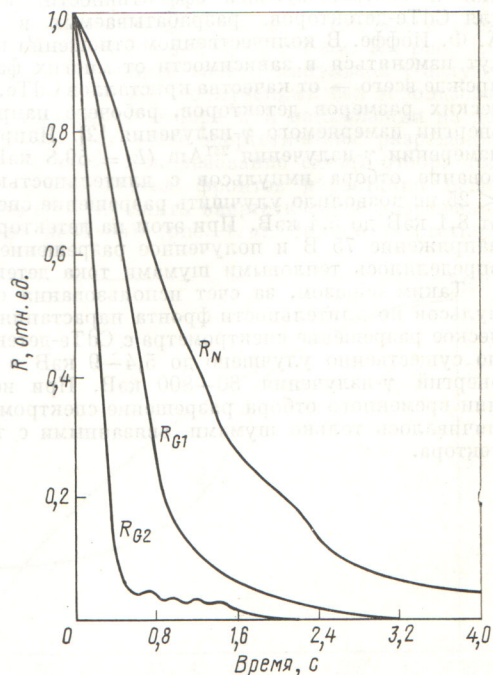


Рис. 2. Нормированные КФ шумов параметров реактора:

R_N — шум ИК, $\sigma_N = 0,07\%$; R_{G1} — шумы расхода, $\sigma_{G1} = 0,086\%$; R_{G2} — турбулентные шумы расходомера, $\sigma_{G2} = 0,17\%$ (σ — относительное стандартное отклонение)

Однако методом взаимной корреляции сигналов двух последовательно включенных МР наряду с составляющей КФ, обусловленной колебаниями расхода (R_{G1}), была выявлена составляющая, связанная с локальными возмущениями турбулентного потока в области датчика (R_{G2}). Ввиду большой удаленности МР от активной зоны последний компонент не коррелирован с изменением нейтронной мощности и представляет собой помеху в цели компенсации реактивности вследствие изменения расхода. Подобно этому термопара на входе помимо флюктуаций осредненной входной температуры может регистрировать локальные пульсации, также не коррелированные с мощностью.

Оценим источники погрешности раздельно. Для этого выделим сначала в КФ сигнала ИК составляющую R_N^p , которая не связана с пульсациями расхода и температуры:

$$R_N^p = R_N - R_N^{G1} - R_N^{T1}.$$

При расчете КФ используются известные соотношения между КФ входных и выходных сигналов в системе с заданной ИПФ [2]. Так,

$$R_N^{G1}(\tau) = h_{GN}(\alpha) * h_{GN}(\beta) * R_{G1}(\tau + \alpha - \beta),$$

где * означает операцию свертки. Аналогично может быть учтен вклад температуры. Компоненту шума с КФ R_N^p соответствует КФ реактивности на входе системы ВБР, определяемая как

$$R_N^p(\tau) = h_t(\alpha) * h_t(\beta) * R_N^r(\tau + \alpha - \beta),$$

где $h_t = h_R^{-1} - h_{o.c.}$

Оценим теперь статистическую погрешность, связанную с наличием турбулентной составляющей сигнала МР с КФ R_{G2} , не коррелированной с пульсациями расхода. Характерные времена затухания функций R_{G1} и R_{G2} (T и t) сильно различаются, что позволяет вести эффективную фильтрацию. При выборе фильтра целесообразно исходить из минимума средней квадратической погрешности ВБР, обусловленной, с одной стороны, проникновением на выход системы турбулентного шума, а с другой — неточной (из-за фильтра) компенсацией колебаний расхода. Вклад первого фактора в КФ реактивности оценивается последовательным пропусканием шума с КФ R_{G2} через операторы h_{Φ}^G , h_{GN} , h_t . КФ остаточного (из-за неточной компенсации) сигнала расхода оценивается как

$$\Delta R_{G1}(\tau) = R_{G1}(\tau) + h_{\Phi}(\alpha) * h_{\Phi}(\beta) * R_{G1}(\tau + \alpha - \beta) - h_{\Phi}(\theta) * R_{G1}(\tau - \theta) - h_{\Phi}(\theta) * R_{G1}(-\tau - \theta).$$

Последующим пропусканием шума с КФ ΔR_{G1} через операторы h_{GN} , h_t можно получить оценку составляющей $R_R^{\Delta G}$ КФ реактивности. Предварительно выбирается фильтр из условия минимального отклонения сигнала на выходе фильтра от истинных пульсаций расхода в предположении, что турбулентная составляющая характеризуется «белым» шумом. Тогда, по Н. Вине-ру [2]:

$$h_{\Phi} = \frac{1}{k + \sqrt{1+k^2}} \frac{1}{kT} \exp(-\sqrt{1+k^2} \theta/kT),$$

где k — отношение спектров турбулентного и расходного шумов на нулевой частоте. Затем параметры фильтра уточняются так, чтобы можно было получить минимальное значение $R_R^G = R_R^{\Delta G} + R_R^{G2}$. Погрешность баланса реактивности вследствие пульсаций входной температуры, не коррелированных с пульсациями расхода, может быть учтена аналогичным образом. Вследствие некоррелированности рассмотренных составляющих полная КФ флюктуаций на выходе системы ВБР равна сумме R_R^N , R_R^G , R_R^T . Вид этой КФ определяется в основном КФ флюктуаций нейтронного потока.

В процессе работы реактора уровень шумов и его динамические характеристики изменяются. Оценки, проводившиеся в течение нескольких лет работы реактора, показали, что стандартные отклонения реактивности в системе ВБР, обусловленные не зависящими от внешних параметров флюктуациями нейтронного потока с КФ R_G^p , находятся в пределах $(2,5 \div 5,5) \cdot 10^{-6} \Delta k/k$. Стандарт реактивности от шумов расходомера составляет $(0,9 \div 1,2) \cdot 10^{-6} \Delta k/k$ и от шумов термопары на входе $< 10^{-7} \Delta k/k$. Отметим, что снижение расхода через средненапряженный топливный пакет БОР-60 на 30% дает изменение реактивности на $\sim 6 \cdot 10^{-6} \Delta k/k$. Приведенные данные показывают, что реакторные шумы ограничивают чувствительность системы ВБР и их необходимо учитывать при формулировании требований к системе. Расчет корреляционных функций флюктуаций на выходе системы ВБР позволяет оценить статистическую погрешность и проводить в дальнейшем оптимизацию системы с учетом временных характеристик аномальной реактивности.

Поступило в Редакцию 31/V 1976 г.
В окончательной редакции 1/II 1977 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fukutomi S., Monta K. «J. Nucl. Sci. and Technol.», 1970, v. 7, № 1, p. 54.
2. Бендат Дж. Основы теории случайных шумов и ее применения. М., «Наука», 1965.