

Измерение эффектов реактивности на реакторах Белоярской АЭС

Б. Г. ДУБОВСКИЙ, А. Я. ЕВСЕЕВ, И. М. КИСИЛЬ, В. В. КОРОЛЕВ, В. Ф. ЛЮБЧЕНКО,
Ю. И. МИТЯЕВ, Э. И. СНИТКО

УДК 621.039.519

Реактивность реактора вычисляется на основе информации о временном характере изменения потока нейтронов. В последние годы разработаны специализированные, обладающие высокой чувствительностью и быстродействием аналоговые вычислительные устройства (реактиметры) [1—8], которые ускоряют процесс определения стационарных значений реактивности и позволяют анализировать ее переходные и мгновенные значения.

Реактиметры можно условно разбить на два типа: работающие по разомкнутому циклу и работающие по замкнутому циклу, т. е. с моделью кинетики реактора в цепи обратной связи следящей системы. На реакторах Белоярской АЭС (БАЭС) применяются реактиметры, относящиеся к устройствам второго типа.

Пространственно независимая одноточечная моноэнергетическая модель кинетики реактора без учета температурного коэффициента реактивности реализуется с помощью множителя, операционного усилителя и RC-цепей для имитации запаздывающих нейтронов.

Моноэнергетическая модель реактора сконструирована с учетом следующих уравнений кинетики реактора:

$$\frac{dn}{dt} \approx \frac{\rho n}{\tau_0} - \sum_{i=1}^6 \frac{dc_i}{dt} + S;$$

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{a_i n}{\tau_0} - \lambda_i c_i,$$

где использованы общепринятые обозначения.

В модель кинетики реактора заложены данные по a_i и λ_i для U^{235} при делении тепловыми нейтронами.

Измеритель мощности реактиметра выполнен в виде многодекадного электрометрического операционного усилителя, позволяющего измерять токи ионизационных камер в диапазоне 10^{-12} — 10^{-4} а. Реактиметр имеет 14 шкал и позволяет измерять положительные реактивности в диапазоне 10^{-5} — $5 \cdot 10^{-1}$ $\beta_{эфф}$ и отрицательные реактивности в диапазоне 10^{-5} — 10 $\beta_{эфф}$.

Динамический диапазон реактиметра соответствует примерно одной декаде мощности реактора; быстродействие составляет ~ 1 сек и определяется в основном инерционностью сглаживания шумов и помех и инерционностью показывающего и записывающего прибора — электронного потенциометра ЭПП-09. Пример записи показаний реактиметра показан на рис. 1.

На рис. 1 хорошо видна достаточно высокая чувствительность прибора, позволяющая фиксировать даже небольшие по величине шумы реактивности. В измерениях на мощности четко наблюдается проявление обратной связи за счет отрицательного температурного и мощностного коэффициентов реактивности (см.

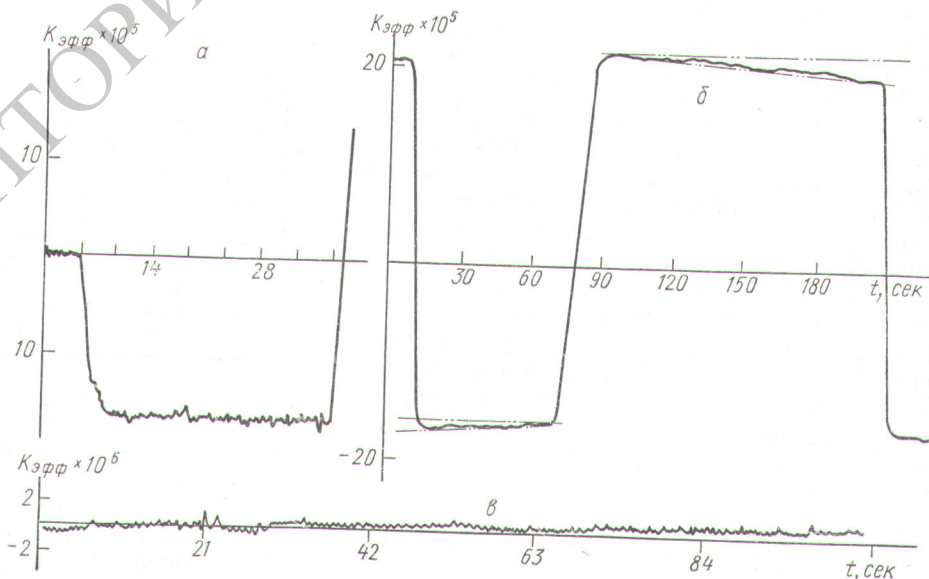
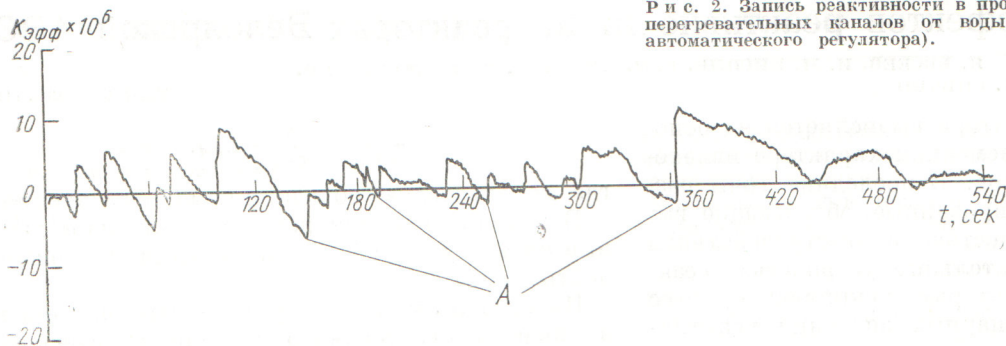


Рис. 1. Изменение реактивности первого реактора БАЭС при перемещении стержней автоматического регулятора на мощности 0,05% (а) и 10% (б) номинальной (в — эффект, обусловленный шумами реактивности).



Р и с. 2. Запись реактивности в процессе освобождения пароперегревательных каналов от воды (А — момент отработки автоматического регулятора).

рис. 1, б). Обусловленная этими эффектами скорость изменения реактивности составляет $\sim 1,5 \cdot 10^{-7} K_{эфф} / сек.$

Градуировка реактиметра осуществлялась путем сравнения результатов измерения одних и тех же эффектов реактивности разными методами. Разброс полученных показаний не превышал $\pm 5\%$ измеряемой величины на всех шкалах реактиметра.

На рис. 2 приведена запись реактивности в процессе освобождения пароперегревательных каналов от воды, из которой ясно видно, что реактиметр фиксирует изменение реактивности в зоне нечувствительности автоматических регуляторов.

Исследование эффектов реактивности на реакторах БАЭС

При пуске реакторов БАЭС большое внимание уделялось изучению эффектов реактивности. На критических сборках при полных нагрузках в различных точках активной зоны измеряли реактивности топливных каналов, каналов СУЗ, воды в них, измеряли компенсирующую способность и градуировочные характеристики стержней СУЗ, эффекты попадания воды в кладку реактора и др. Эти измерения выполнялись для уточнения критических масс, определения реакции реактора на возмущения решетки и возможности отработки их стержнями СУЗ, для оценки запаса реактивности и изменения его в зависимости от количества воды в топливных каналах, для получения соотношения эффективностей различных поглотителей, а также для построения распределений нейтронов по активной зоне реактора (по эффективности идентичных участков поглощающих стержней) и корректировки расчетных данных.

Результаты некоторых измерений приведены в табл. 1 и 2.

Эффекты реактивности при загрузке одного испарительного канала с 2%-ным (ИК-2) и 1,5%-ным (ИК-1,5) обращением урана в реакторе первого блока ($10^{-5} K_{эфф}$)

Таблица 1

Расстояние от центра реактора, см	10	30	70	150	190	230	270	310	350
ИК-2 с водой	13,0	16,0	17,0	12,5	12,5	14,0	9,00	3,0	3,0
ИК-1,5 с водой	-7,5	-7,5	-1,2	-3,5	-2,5	-2,0	-1,0	-3,0	0

Эффекты реактивности различных топливных каналов второго блока [9] в центральной и периферийной ячейках активной зоны ($10^{-5} K_{эфф}$)

Таблица 2

Измеряемый эффект	В центре (ячейка 18—17)	На периферии (ячейка 19—34)
Постановка ИК-2 без воды	2,6	-0,9
Залив воды в ИК-2	3,2	1,5
Постановка ИК-2 с водой	5,9	0,7
Постановка ИК-3 без воды	31,8	8,3
Залив воды в ИК-3	13,0	4,7
Постановка ИК-3 с водой	44,8	13,0
Постановка пароперегревательного канала без воды	29,0	7,5
Залив воды в пароперегревательный канал	8,8	2,2
Постановка пароперегревательного канала с водой	37,7	9,8

Результаты измерения эффектов реактивности топливных каналов использовались при осуществлении перегрузок реакторов БАЭС.

С помощью реактиметра оценивали эффект реактивности при заполнении водой зазоров графитовой кладки первого реактора. Для это-

го использовали специальные топливные каналы, заключенные в тонкостенные чехлы, которые заполняли водой. Эффекты реактивности измеряли на различном расстоянии от центра реактора, а затем распространяли на всю активную зону. В результате выяснилось, что суммарный эффект реактивности от заполнения водой зазоров в ячейках всех ИК-1,5 равен нулю, а в ячейках всех ИК-2 равен $0,94\% K_{эфф}$.

Запас реактивности в реакторах БАЭС определяли по сумме эффективностей компенсирующих стержней, измеренных с помощью реактиметра при поочередном их извлечении. В этих измерениях компенсирующие стержни располагали в активной зоне равномерно с шагом 60—70 см. Соответствующее этому распределение нейтронов далее называется «равномерным».

Дополнительные эксперименты показали, что при равномерном распределении нейтронов средний по реактору коэффициент интерференции исследуемого компенсирующего стержня со всеми остальными ($K_{инт}$) близок к единице. Близок к единице также и коэффициент $K_{ут}$, учитывающий влияние изменения утечки нейтронов из реактора на суммарную эффективность стержней. Наибольшее влияние оказывало относительное увеличение потока нейтронов в ячейке извлекаемого стержня. Непосредственные измерения распределения нейтронов по ячейке стержня показали, что этот эффект приводит к завышению измеренного запаса реактивности по сравнению с истинным на 6%. Таким образом, погрешность определения запаса реактивности по сумме эффективностей составила $\pm 10\%$.

Эффект реактивности при внесении возмущения в реактор может быть измерен по изменению ее запаса или по кинетике изменения потока нейтронов в реакторе. Если возмущение не изменяет существенно диффузионных характеристик активной зоны или утечку нейтронов из нее, то полученные обоими способами реактивности должны совпадать, в противном случае возможны существенные различия.

Пусть ρ_1 — реактивность, измеренная по изменению запаса реактивности, ρ_2 — реактивность, измеренная по периоду изменения мощности реактора или реактиметром, ρ_3 — реактивность, связанная с изменением диффузионных характеристик зоны и утечки нейтронов.

Приведем некоторые примеры измерения эффектов реактивности на реакторах БАЭС.

В критической сборке из 212 топливных каналов реактора первого блока без воды (один

ИК-2 на два ИК-1,5) эффективность ИК-2 в одной и той же ячейке различалась в ~ 3 раза при различном положении компенсирующих стержней, что объясняется в основном большой чувствительностью $K_{эфф}$ к изменению утечки нейтронов из небольшого в радиальном направлении реактора и интерференцией стержней.

При проектной загрузке и равномерном распределении нейтронов сумма эффективностей компенсирующих стержней $\sum \rho_i = 5,3 \pm 0,5\%$

$K_{эфф}$, а при сильно деформированном распределении — независимо от того, какая часть распределения (центральная или периферийная) выпучена, — $\sum \rho_i = 3,5 \pm 0,4\% K_{эфф}$.

При сильных деформациях радиального поля нейтронов происходит значительное изменение утечки нейтронов и $K_{инт}$ существенно отличается от единицы. В этом случае запас реактивности не равен сумме эффективностей компенсирующих стержней, что подтверждается приведенными выше данными.

При выдуве воды из топливных блоков реактора первого блока эффект реактивности составил $\rho_2 = -0,65\% K_{эфф}$, в то время как запас реактивности изменился всего на $+(0,1-0,2)\% K_{эфф}$, что соответствует расчетной величине. Дело в том, что при выдуве воды количество введенных в реактор компенсирующих стержней уменьшилось на 12% (с 54 до 48), а эффективность их возросла на 16%; распределение нейтронов в обоих случаях было близким к равномерному и считалось, что $K_{инт}$ не изменяется. Отрицательная величина эффекта реактивности обусловлена возрастанием эффективности компенсирующих стержней за счет увеличения длины диффузии в обезвоженной системе.

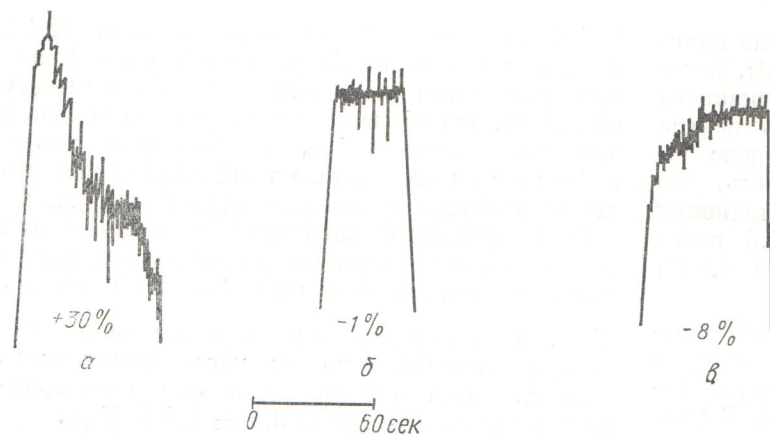
В реакторе второго блока при наличии в пароперегревательных каналах поглощающих стерженьков залив воды в топливные каналы практически не изменяет запаса реактивности, в то время как эффекты реактивности составили:

при заливе воды во все испарительные каналы $+1,3\% K_{эфф}$;

при заливе воды в пароперегревательные каналы с поглощающими стерженьками $+0,45\% K_{эфф}$;

при заливе воды в пароперегревательные каналы без поглощающих стерженьков $+0,6\% K_{эфф}$.

Средняя по реактору первого блока эффективность ИК-1,5 равна $-(1,5-2,0) 10^{-3}\% K_{эфф}$. При постановке же ИК-1,5 в ячейку око-



Р и с. 3. Влияние пространственного перераспределения нейтронов на первоначальные показания реактиметра в зависимости от расстояния r между датчиком реактиметра и перемещаемым стержнем:

а — $r = 1,1$ м; б — $r = 2,9$ м; в — $r = 4,9$ м.

ло погруженного компенсирующего стержня эффект равен $+12 \cdot 10^{-3} \% K_{\text{эфф}}$, что объясняется уменьшением поглощения нейтронов в стержне за счет экранировки каналом ИК-1,5.

Пространственный и мощностной эффекты при измерениях с помощью реактиметра. Одноточечное представление кинетики реактора выполняется тем хуже, чем больше размеры реактора и чем ближе к поверхности реактора расположен детектор реактиметра.

Пространственное распределение нейтронов в реакторе при введении возмущения реактивности описывается суперпозицией основной и высших гармоник, которые складываются так, что в зоне возмущения знак деформации потока нейтронов следует за знаком возмущения реактивности, а в диаметрально противоположной зоне знаки деформации и возмущения противоположны.

Для реактиметра с одноточечной моделью кинетики реактора пространственное изменение плотности нейтронов будет восприниматься как мгновенное искажение начальных условий. В результате возможна ошибка в определении мгновенных значений реактивности: если датчик реактиметра расположен вблизи зоны возмущения, то в начальный период показания реактиметра будут завышены; если датчик располагать с противоположной стороны реактора по отношению к возмущению, то показания будут занижены (рис. 3).

Для ликвидации этих ошибок необходима выдержка во времени (после возмущения), в течение которой произойдет как перераспределение нейтронов и затухание высших гармоник, так и перезарядка РС-цепочек в имитаторе кинетики реактора.

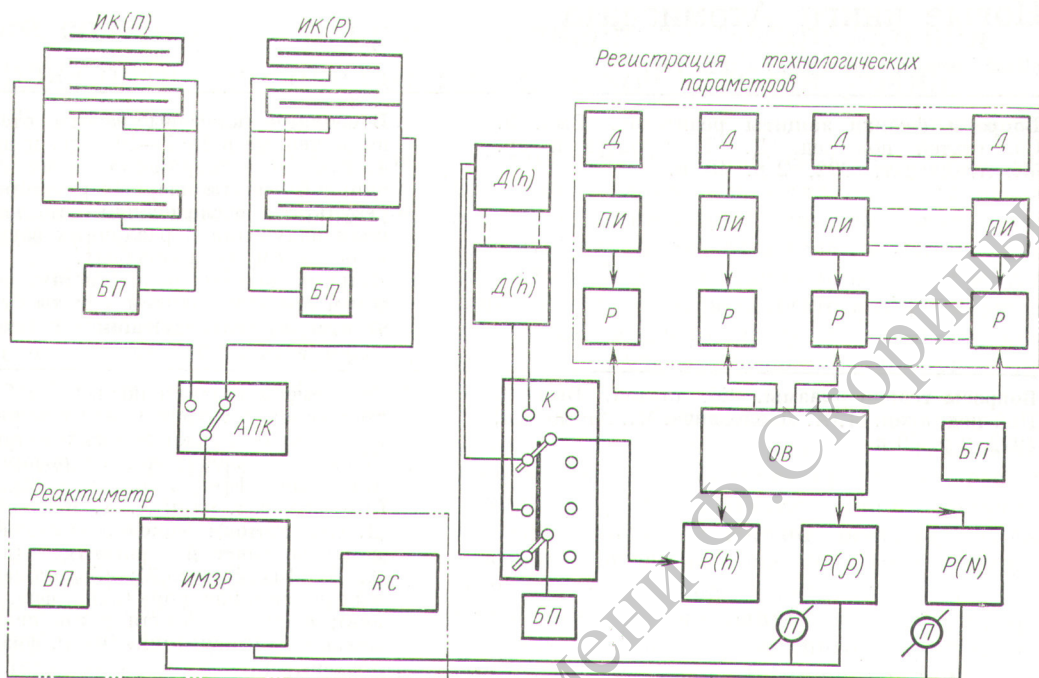
Поэтому при измерениях с помощью реактиметра необходимо создавать условия для одноточечного представления реактора, например, путем параллельного подключения к реактиметру нескольких датчиков, расположенных вокруг активной зоны, или путем расположения датчика на далеком расстоянии от активной зоны.

При измерениях в энергетическом режиме реактиметр будет измерять суммарное изменение реактивности, вызванное как измеряемым эффектом (например, передвижением стержня), так и мощностным, температурным или другими эффектами реактивности. Выделение измеряемого эффекта возможно путем дополнительных измерений, например вычитанием эффекта реактивности, связанного с перемещением компенсирующих стержней, и полученного по градуировочной кривой или путем предварительных измерений изучаемого эффекта на нулевой мощности.

Возможна также схема, позволяющая автоматически вычислять реактивность, вносимую стержнями, и разделять быстрые и медленные эффекты реактивности [7].

Комплект приборов контроля реактора

Опыт пуска реакторов БАЭС показал, что для контроля их работы полезно использовать комплект приборов контроля, позволяющий выполнять измерения и синхронизированную запись изменений реактивности, мощности и положения стержней автоматического регулирования. Запись этих параметров наряду с записью температуры и расхода теплоносителя, температуры твэлов и других технологических параметров (рис. 4) может быть использована



Р и с. 4. Блок-схема комплекта приборов контроля реактора:

ИК (П) — пусковая ионизационная камера; ИК (Р) — рабочая ионизационная камера; БП — блок питания; АПК — автоматический переключатель камер; ИМЗР — измеритель мгновенных значений реактивности; КС — блок КС-цепей моноэнергетической модели кинетики реактора; Д (h) — датчик положения стержня автоматического регулятора; К — переключатель; Д — датчик технологических параметров; ПИ — преобразователь информации в вид, удобный для регистрации; Р — регистратор; ОВ — генератор меток времени; P (h) — регистратор положения стержня автоматического регулирования; P (ρ) — регистратор реактивности; P (N) — регистратор мощности; П — параллельные приборы на пульте оператора.

для изучения переходных режимов и динамических характеристик реактора, для контроля ядерной безопасности и оперативного контроля за технологическим процессом и работой органов регулирования, а также для анализа аварийных ситуаций.

Реактиметр является основной частью комплекта приборов контроля реактора. С помощью реактиметра регистрируются изменения реактивности, лежащие вне зоны чувствительности автоматического регулятора. Реактиметр также может применяться для измерения температурных и мощностных эффектов реактивности.

Комплект полезен на тех реакторах, которые не оснащены информационно-вычислительными средствами, способными выполнять непрерывные измерения или вычисления и запись указанных параметров. Комплект использовался при энергопуске второго блока БАЭС и

включен в состав штатной аппаратуры реакторов Билибинской и Шевченковской АЭС.

Поступила в Редакцию 19/VI 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Stubbs. IRE Trans. NS-4, No. 1, 14 (1957).
2. C. Sastre. Nucl. Sci. Engng, 8, No. 5, 37 (1960).
3. P. Bonnaure. L'onde Electrique, No. 377—8 (1958).
4. P. Shea. IRE, Intern. Convent, Rec., 9, No. 4, 53 (1962).
5. E. Suzuki, T. Tsunoda. J. Nucl. Sci. Techn., 1, No. 6, 210 (1964).
6. R. Shomo, S. Hamilton, R. Leamer. Trans. ANS, 9, No. 1 (1966).
7. И. И. Сидорова. Аналоговое моделирование в ядерной энергетике. М., Атомиздат, 1969.
8. Б. Г. Дубовский и др. Измерение реактивности на реакторе Белоярской АЭС. (Доклад, представленный на Симпозиум по физике и технике реакторов на тепловых нейтронах. Лондон, 27—29 июня 1967 г.)
9. И. С. Акимов и др. «Атомная энергия», 28, 324 (1970).