

УДК 621.039.519

Исследование динамических характеристик БОР-60 с помощью осциллятора реактивности

АФАНАСЬЕВ В. А., БРИТОВ В. Н., ГРЯЗЕВ В. М., ЕФИМОВ В. Н., КЕБАДЗЕ Б. В. (СССР),
КРАУЗЕ Х., ОТТО Х., ШОЛЬЦ Й., ЦИГЕНБАЙН Д. (ГДР)

Осциллятор реактивности — традиционный инструмент для исследования динамических характеристик реактора. Преимущества осцилляторного метода в точности, широте частотного диапазона и помехоустойчивости измерений наиболее полно могут быть использованы на экспериментальных установках. С помощью этого метода исследуют резонансные свойства и стабильность энергетического реактора, изучают динамические связи между параметрами. Для быстрых реакторов наибольший интерес представляет определение составляющих мощностного эффекта реактивности и сопутствующих им характерных времен, которые обеспечивают стабильную работу в номинальных режимах и безопасность в аварийных ситуациях [1].

Конструкция и испытания осциллятора. При разработке осциллятора реактивности для БОР-60 верхний частотный диапазон был определен в 30 Гц, что должно было обеспечить уверенную регистрацию быстрых эффектов и «сшивание» измеренной частотной характеристики реактора на мощности с характеристической физической реактора.

Технические трудности решения поставленной задачи очевидны. В первую очередь они связаны с необходимостью пребывания вращающегося с частотой 1800 об/мин элемента в высокотемпературной натриевой среде; вращающее усилие при этом должно передаваться на значительное расстояние (~8 м). В окончательном варианте осциллятор состоит из активной части (модулятора реактивности), приводимой во вращение через соединительную штангу приводом, вынесенным за пределы реактора.

Основа модулятора реактивности (рис. 1) представляет собой цилиндр диаметром 36 и длиной 100 мм, внутри которого по одну сторону оси расположен поглотитель (B_4C), а по другую — рассеиватель ($Zr_2H_{1,82}$). Вращение модулятора в активной зоне обеспечивается гидростатическими подшипниками, тем самым решается и задача охлаждения модулятора. Принцип действия подшипника показан на рис. 1. Жидкость (в данном случае натрий, охлаждающий активную зону) под давлением подводится

через специальные отверстия к вращающемуся валу. При радиальных смещениях вала в пространстве между ним и противолежащей стенкой возникают зоны повышенного (пониженного) давления, которые стремятся вернуть вал в центральное положение. Модулятор впи-

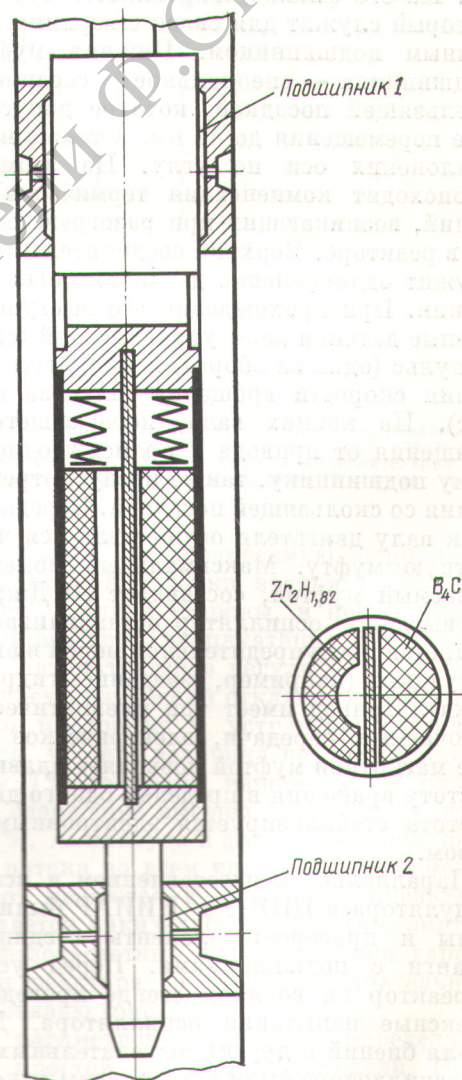


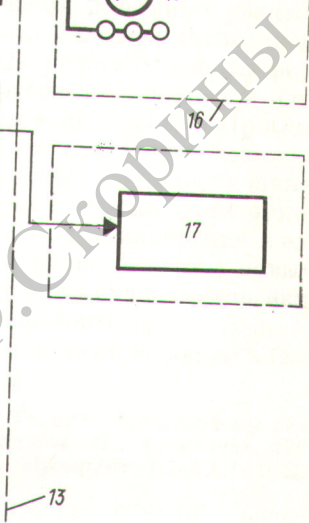
Рис. 1. Схема модулятора реактивности

сывается в размеры рабочей кассеты БОР-60. Для подвода натрия используется хвостовик кассеты, непосредственно к подшипникам натрий поступает через специальные зазоры в углах шестигранника. В результате испытаний на водяном стенде ЦИЯИ (ГДР) определены оптимальные размеры и распределение давления в элементах гидropодшипника, разработаны меры по устранению биений штанги и проведена имитация аварийных режимов вращения при соприкосновении ротора и статора гидropодшипника. Штанга центрируется двумя промежуточными и основным подшипниками; последний несет как осевую, так и радиальную нагрузку. На его фланце закрепляется съемный вал, который служит для связи с верхним промежуточным подшипником. Нижняя муфта этого подшипника — специальное соединение со скользящей посадкой, которое допускает осевые перемещения до 40 мм, а также небольшие отклонения оси по углу. На этом участке происходит компенсация термических расширений, возникающих при разогреве осциллятора в реакторе. Верхний соединительный фланец служит одновременно датчиком сигналов положения. При прохождении его выступов индуктивные датчики дают управляющий (стартовый) импульс (один за оборот) и импульсы для измерения скорости вращения (пять за один оборот). На концах вала, передающего момент вращения от привода к промежуточному верхнему подшипнику, также предусмотрены соединения со скользящей посадкой. Передача момента к валу двигателя осуществляется через магнитную муфту. Максимальный момент, передаваемый муфтой, составляет 30 Дж; при его превышении осциллятор останавливается, что является предупредительной мерой в аварийных ситуациях (например, «заедание» гидropодшипника). Привод имеет три пневматически переключаемые передачи, электрическое управление магнитной муфтой позволяет плавно менять частоту вращения в пределах одного диапазона, частота стабилизируется электронным регулятором.

Параллельно с изготовлением и испытанием модулятора в ЦИЯИ в НИИАР были изготовлены и проверены элементы соединительной штанги с подшипниками. Перед установкой в реактор на водяном стенде проведены комплексные испытания осциллятора. Для контроля биений и других нежелательных явлений на осцилляторе были установлены акустические датчики, сигнал от которых выводился на пульт управления осциллятором. При испы-

таниях была достигнута частота вращения 20 Гц (1200 об/мин), при ее превышении, а также в диапазоне частот 11—12 Гц наблюдалось увеличение вибраций, возрастал и уровень акустических шумов. Следует отметить, однако, что эти явления в значительной мере можно отнести за счет недостаточной жесткости элементов крепления на стенде, которые могли способствовать возникновению вибраций. Тем не менее было решено ограничить диапазон частот реакторных измерений до 20 Гц.

Система измерений и обработки результатов. Структурная схема реакторного эксперимента представлена на рис. 2. Управление приводом, включая установку частоты, производится дистанционно. Колебания нейтронного потока регистрируются ионизационной камерой, расположенной в 2,5 м от активной зоны, что составляет более пяти диаметров зоны. Сигнал камеры после компенсации постоянной составляющей и усиления поступает на блок связи с ЭВМ [2]. Синхронизация измерений осуществляется стартовым импульсом, период следования которого определяет цикл измерения. С помощью пересчетной схемы, запускаемой от датчика положения (один раз за оборот), можно устанавливать длительность цикла в 1, 2 и 4 периода вращения осциллятора. В течение цикла с некоторым тактовым интервалом, длительность которого 1,6—204,8 мс (устанавливается в соответствии с частотой осцилляции), происходит преобразование аналогового сигнала ионизационной камеры (ИК) в девятиразрядный двоичный код и последовательное заполнение кодом 400 ячеек устройства ЭВМ. Для уменьшения влияния случайных флуктуаций сигнала и других помех информация накапливается в течение нескольких циклов, число которых вводится в ЭВМ для автоматической остановки. Содержание в цикле нескольких периодов позволяет исключить дрейф порядка, определяемого числом периодов. Длительность периода (частота) уточняется по полному времени измерения и числу циклов. При обработке данных в процессе эксперимента использована программа, по которой вычисляются коэффициенты Фурье основной гармоники без учета дрейфа. По телетайпу в лабораторное помещение передавались с ЭВМ значения частоты, модуля и фазы частотной характеристики. Разброс получаемых данных оценен по нескольким измерениям, и на их основании сделан вывод о необходимости повторения замера на этой частоте. Такая «обратная связь» позволяла эффективно использовать время эксперимента.

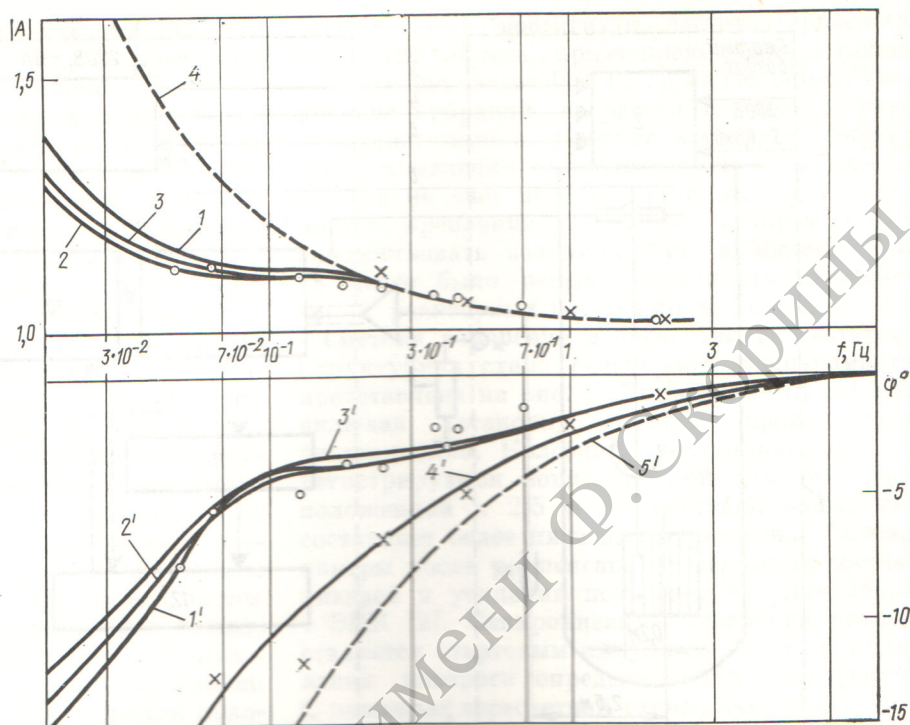


1 — реакторный зал; 2 — привод; 3 — переключенные диапазоны; 4 — точная установка частоты; 5 — управление; 6 — датчик частоты, контроль излучения; 7 — синхронизация; 8 — управление приводом; 9 — блок управления измерением; 10 — блок передачи данных на ЭВМ; 11 — электронные часы; 12 — клавишная вычислительная машина; 13 — лабораторное исполнение; 14 — аварийное отключение; 15 — указатель частоты; 16 — пульт реактора; 17 — БЭСМ-ЗМ

Эксперименты. Модулятор был установлен в крайнем ряду активной зоны реактора в зоне с большим градиентом потока [3]. Предварительно осциллятор с приводом и системой управления был опробован на заглушенном реакторе; затем проверена система измерений при работе с осциллятором на мощности 40 кВт. Форма вносимого периодического возмущения по реактивности близка к гармонической с двойной амплитудой ($\sim 2 \cdot 10^{-4} \Delta k/k$). Для нормальной работы гидростатического подшипника все измерения проводили при номинальных расходах теплоносителя ($G \approx 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$). После устранения ряда механических неполадок на мощностях, близких к номинальным ($N \approx 45 \text{ МВт}$), частоту осцилляции неоднократно поднимали до 18 Гц. Амплитуда колебаний сигнала не превышала 1,5% среднего значения в диапазоне частот 0,05—18 Гц при относительном стандарте нейтронных шумов $< 0,1\%$. Можно считать ампли-

туду колебаний, обеспечиваемую осциллятором, оптимальной с точки зрения отношения сигнал/шум, с одной стороны, и ненарушения режима нормальной эксплуатации установки, с другой. Автоматическое регулирование реактором во время измерений отключалось. Фурье-анализ по программе с устранением дрейфа [4] показал, что его величина не превосходила в среднем 1% за время измерения на одной частоте. Содержание высших гармоник не превышает 2%. Амплитуда и фаза колебаний нейтронного потока во всем исследованном диапазоне частот меняются в небольших пределах, не наблюдается каких-либо резонансов, амплитудно- и фазочастотные характеристики характерны для реактора со слабой отрицательной обратной связью (рис. 3).

Оценка параметров. Параметры определяли на основе простой динамической модели. Нейтронную кинетику описывали точечным уравнением с 6 группами запаздывающих нейтро-



Р и с. 3. Амплитудно- и фазочастотная характеристики реактора, измеренные при мощности 45 (○) и 22 (×) МВт (модуль амплитудно-частотной характеристики A выражен в долях изменения мощности, относенной к реактивности в долях запаздывающих нейтронов, φ в градусах):

1 — $\Gamma = 4,47 \cdot 10^{-3}$ и $\Gamma_M = 6,76 \cdot 10^{-3}$ ($\Delta h/k$)·МВт $^{-1}$, $\tau = 2,11$ с, $\tau_M = 8,94$ с, $\chi^2 = 2,5 \cdot 10^{-3}$; 2 — $\Gamma = 5,4 \cdot 10^{-3}$ и $\Gamma_M = 6,8 \cdot 10^{-3}$ ($\Delta h/k$)·МВт $^{-1}$, $\tau = 2,35$ с, $\tau_M = 5,76$ с, $\chi^2 = 2,59 \cdot 10^{-3}$; 3 — $\Gamma = 5,67 \cdot 10^{-3}$ и $\Gamma_M = 0$ ($\Delta h/k$)·МВт $^{-1}$, $\tau = 2,39$ с, $\chi^2 = 2,08 \cdot 10^{-3}$; 4 — $\Gamma = \Gamma_M = 0$ (реактор «нулевой» мощности); 1' — $\Gamma = 5,5 \cdot 10^{-3}$ и $\Gamma_M = 4,67 \cdot 10^{-7}$ ($\Delta h/k$)·МВт $^{-1}$, $\tau = 2,39$ с, $\tau_M = 5,15$ с, $\chi^2 = 0,979$; 2' — $\Gamma = 5,4 \cdot 10^{-3}$ и $\Gamma_M = 6,8 \cdot 10^{-3}$ ($\Delta h/k$)·МВт $^{-1}$, $\tau = 2,35$ с, $\tau_M = 5,76$ с (при расчете $2'$ коэффициенты взяты из анализа амплитудной характеристики); 3' — $\Gamma = 5,5 \cdot 10^{-3}$ и $\Gamma_M = 0$ ($\Delta h/k$)·МВт $^{-1}$, $\tau = 2,11$ с, $\chi^2 = 0,768$; 4' — $\Gamma = 5,0 \cdot 10^{-3}$ ($\Delta h/k$)·МВт $^{-1}$, $\tau = 2,4$ с, $\chi^2 = 1,12$; 5' — $\Gamma = \Gamma_M = 0$ (реактор «нулевой» мощности)

нов, динамика обратной связи представлялась двумя точечными уравнениями для средних температур топлива и теплоносителя. Отсутствие пространственных эффектов подтверждается контрольными измерениями с детекторами, расположенными в разных по отношению к активной зоне точках (блок ИК, вертикальные каналы); результаты согласуются в пределах погрешности измерения. Частотная характеристика обратной связи для линеаризованной системы выглядит следующим образом:

$$W_{o.c.} = \frac{\Gamma_T + \gamma \Gamma_N / (1 + j\omega\tau_N)}{1 + j\omega\tau_T - \gamma / (1 + j\omega\tau_N)}, \quad (1)$$

где Γ_T , Γ_N — температурные коэффициенты реактивности по топливу и теплоносителю соответственно; $\tau_T = C_T/k$, $\tau_N = C_N/(k + 2C_{NH})$ — постоянные времени, выраженные через коэффициент теплопередачи от топлива к теплоносителю k и их теплоемкости C_T и C_N ; $\gamma =$

$= k/(k + 2C_{NH})$. Анализ результатов измерений показывает, что в пределах информативного диапазона частот (0,05—1 Гц) выражение (1) можно упростить так:

$$W_{o.c.} = \Gamma / (1 + j\omega\tau), \quad (2)$$

где $\Gamma = (\Gamma_T + \gamma \Gamma_N) / k (1 - \gamma)$ — мощностной коэффициент реактивности; $\tau = \tau_T / (1 - \gamma)$ — его постоянная времени.

Была предпринята попытка учесть также более медленные эффекты, обусловленные термическим расширением конструкций реактора, добавлением составляющей мощностного эффекта с большей постоянной времени:

$$W_{o.c.} = [\Gamma / (1 + j\omega\tau)] + [\Gamma_M / (1 + j\omega\tau_M)].$$

Параметры модели определяли из условия минимума среднего квадратического отклонения расчетной и экспериментальной частотных характеристик с помощью оптимизационной программы [5]. В число искомых параметров

входили также амплитуда колебаний реактивности и фазовый сдвиг между сигналом датчика положения осциллятора и вносимой реактивностью. Результаты иллюстрируются на рис. 3. Выяснилось, что по данным измерений практически нереально выделить медленную составляющую. Сравнение кривых 1 и 2 показывает, что небольшие отклонения исходных данных дают резко отличающиеся значения параметров при весьма близких средних квадратических погрешностях χ^2 . Оптимизационные расчеты по простейшей модели (2) показывают, что для мощности $N = 45$ МВт и частот $f > 0,5$ Гц динамические характеристики с достаточной точностью можно представить мощностным коэффициентом $\Gamma = 5,67 \cdot 10^{-5} (\Delta k/k) \cdot \text{МВт}^{-1}$ с постоянной времени $\tau = 2,4$ с. Обработка фазо-частотной характеристики дает близкие значения: $\Gamma = 5,5 \cdot 10^{-5} (\Delta k/k) \cdot \text{МВт}^{-1}$ и $\tau = 2,1$ с. Число измерений на мощности $N = 22$ МВт недостаточно. Принимая $\tau = 2,4$ с, из фазовой характеристики удалось получить оценку $\Gamma = 5,0 \cdot 10^{-5} (\Delta k/k) \cdot \text{МВт}^{-1}$.

Выводы. Эксперименты подтвердили работоспособность осциллятора и соответствие его характеристик поставленным задачам. Для ис-

следованных режимов и некоторого ограниченного диапазона частот динамика реактора может быть представлена простой моделью с одним мощностным коэффициентом реактивности и соответствующей ему постоянной времени. Для более детального изучения динамики реактора и установки необходимо большее число экспериментов на различных режимах работы реактора. Целесообразно расширить диапазон измерений в область более низких частот. При этом с помощью того же осциллятора возможно нанесение широкополосных псевдослучайных возмущений, что сократит время реакторного эксперимента. Осцилляторные измерения желательно провести при загрузке реактора новыми видами топлива, что должно существенно изменить динамику активной зоны.

Поступила в Редакцию 2.IX.77

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багдасаров Ю. Е. и др. Технические проблемы реакторов на быстрых нейтронах. М., Атомиздат, 1969.
2. Качалин В. А. и др. Препринт НИИАР П-236. Димитровград, 1974.
3. Лейпунский А. И. и др. Препринт ФЭИ-187. Обнинск, 1969.
4. Scholz J. Dissertation Zfk. Dresden, 1972.
5. Slotta J., Stiller G. Preprint Zfk-142. Dresden, 1968.

УДК 621.311.003.13

Оценка экономической эффективности развития АЭС

МИРКОВСКАЯ Р. Е., ХАЙНСОН Я. И.

Работы последних лет по изучению перспектив развития топливно-энергетического комплекса страны показали необходимость и неизбежность внедрения ядерной энергетики в народное хозяйство. Этот процесс уже интенсивно осуществляется. На современном этапе атомная энергия в основном преобразуется в электрическую, а в ближайшем будущем — в тепловую энергию, а также будет вводиться непосредственно в технологию ряда промышленных производств. Тем не менее на весь прогнозируемый период (примерно на 50 лет) ядерное топливо в основном будет внедряться в народное хозяйство посредством электричества. Отсюда перед энергетиками стоит очень важная задача по определению рациональных масштабов развития атомных электростанций во времени, выбору оптимальной доли их среди других достаточно перспективных генерирующих источников и определению требований к работе

АЭС совместно с другими генерирующими источниками в единых энергетических системах. Сложность решения задач подобного рода заключается в том, что по мере удаления в будущее снижается достоверность и точность исходной информации, характеризующей ядерную энергетику, а также различные сравниваемые направления развития новой техники и топливно-энергетические ресурсы. Задача состоит в отыскании системы зависимостей, характеризующих взаимную эффективность сравниваемых решений при различных сочетаниях изменений их исходных технико-экономических характеристик. Эти зависимости позволяют выделить устойчивые зоны эффективности одного направления развития по сравнению с другим, а также получить сравнительную эффективность разных направлений в широком диапазоне сочетаний исходной информации. Разработанные зависимости включают капитальные