



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

4909/82

P13-82-533

**В.А.Вагов, В.Н.Замрий, М.З.Ишмухаметов,
Ю.Н.Пепельшев, А.С.Савватеев, И.М.Саламатин,
Б.Н.Соловьев, Е.П.Шабалин**

**СИСТЕМА ДЛЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ
И СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ
РЕАКТОРА ИБР-2**

1982

Система корреляционного анализа реакторных параметров является частью измерительно-вычислительного комплекса, предназначенного для исследования импульсного реактора ИБР-2. Основная задача, решаемая с помощью данной системы, состоит в изучении условий, обеспечивающих стабильную и безопасную работу реактора. Для этого исследуются временные и спектральные характеристики флуктуаций мощности, обусловленных влиянием различных элементов конструкции реактора, например вибрациями подвижных отражателей или флуктуациями расхода и температуры натрия при протекании последнего через активную зону. Кроме того, система позволяет изучать переходные процессы в реакторе, термогидродинамические характеристики натриевой системы охлаждения активной зоны и динамические характеристики различных вариантов подвижных отражателей. Система имеет ряд особенностей, связанных с уникальным сочетанием свойств реактора ИБР-2. Во-первых, в импульсном режиме реактор ИБР-2 на порядок более чувствителен к колебаниям реактивности, чем в стационарном. Поэтому для изучения причин, вызывающих флуктуации мощности, соответствующие уровню флуктуаций в стационарном режиме, точность измерения некоторых параметров должна быть на порядок выше и составлять $\sim 0,01-0,1\%$. Во-вторых, чувствительность реактора на быстрых нейтронах к колебаниям реактивности остается высокой /до ~ 5 кГц/, поэтому частотный диапазон измерения некоторых параметров составляет $0-1$ кГц. Для сравнения отметим, что аналогичные измерения для реакторов на тепловых нейтронах проводятся на частотах до ~ 10 Гц. В-третьих, наличие вращающегося модулятора реактивности требует измерения большого числа дополнительных параметров, не свойственных реакторам стационарного типа. Указанные особенности позволяют использовать универсальные возможности системы не только для изучения реакторных параметров, но и для проведения корреляционного анализа в других ядерно-физических и промышленных установках. Система ориентирована на использование аппаратуры стандарта КАМАК совместно с мини-ЭВМ PDP-11/20 /или программно совместимой ЭВМ типа СМ-3/^{1/}.

Данная система успешно использовалась при проведении физического пуска реактора ИБР-2^{2,3/}. Применительно к задачам энергетического пуска реактора возможности системы как аппаратные, так и программные были расширены.

В настоящей работе рассматривается методика измерений, структура системы, ее программное обеспечение и приводятся некоторые экспериментальные результаты.

0
1

1. МЕТОДИКА КОРРЕЛЯЦИОННЫХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА РЕАКТОРЕ ИБР-2

В процессе измерения параллельные значения двух исследуемых параметров $X(t)$ и $Y(t)$ запоминаются в памяти ЭВМ, образуя две дискретные выборки $\{X_n\}$ и $\{Y_n\}$, где n - длина выборки /число последовательных значений каждого параметра/. В дальнейшем проводится математическая обработка, содержание которой определяется характером исследуемых процессов. В целом можно выделить статические и динамические измерения соответствующих параметров. Обработка результатов измерений статических параметров связана с получением корреляционных и передаточных функций, спектральных и других характеристик исследуемых процессов. Измерения динамических параметров процессов необходимы для получения надежных оценок передаточных функций, определения эффектов реактивности или, например в случае измерения мощности, для вычисления соответствующего изменения реактивности.

Работа измерительной системы организуется совместно с работой мини-ЭВМ. Такой режим необходим для получения предварительных оценок результатов измерений и для контроля за их ходом. Накопленная информация в дальнейшем окончательно обрабатывается на одной из больших ЭВМ типа CDC-6500 или БЭСМ-6.

Время измерения каждого параметра (ΔT) и число последовательных значений параметра (n) выбираются по условиям эксперимента и связаны соотношением

$$\Delta T = n \cdot 2^z / f, \quad n = 128 \cdot K,$$

где $K = 1 \div 80$ - число блоков экспериментальных данных /длина блока 128 слов/, $z = 0 \div 7$, f - частота опроса исследуемых параметров. При $z = 0$ в памяти ЭВМ запоминаются мгновенные значения параметров, а при $z > 0$ - усредненные по $\ell = 2^z$ последовательным мгновенным значениям.

Задание $z > 0$ эквивалентно введению на стадии накопления фильтра низких частот, уменьшающего дисперсию фонового шума, причем критическая частота Найквиста $f = f / (2 \cdot \ell)$. Максимальное значение f при измерении параметров с точностью 1% составляет 1 кГц; наиболее часто используемое значение f равно 25 Гц. Значения K, z, f задаются в начале каждого измерения. Максимальное значение числа n составляет по условиям измерения 10240 слов. Это обеспечивает погрешность вычисления оценок корреляционных и спектральных функций не более ~14%. По окончании набора информации для каждого параметра вычисляются среднее значение, дисперсия, коэффициент асимметрии и эксцесс, а также формируется гистограмма распределения. Кроме того, для каждой последовательности экспериментальных данных длиной 128 слов вычисляется ее дисперсия.

Детальная обработка проводится на ЭВМ типа БЭСМ-6. В статических измерениях основная обработка связана с получением ста-

тических оценок, характеризующих реальные физические процессы $X(t)$ и $Y(t)$, и включает следующие операции:

- а/ проверка нормальности распределения измеренных значений,
- б/ проверка стационарности и исключение возможных аппаратных выбросов и тренда путем применения цифровых фильтров,
- в/ вычисление автокорреляционной $R_{xx}(\tau)$ и взаимной корреляционной $R_{xy}(\tau)$ функций,
- г/ вычисление спектральных характеристик.

Для оценки спектральных характеристик флуктуаций исследуемых параметров вычисляется спектральная плотность мощности

$$G_x(\omega) = F[R_{xx}(\tau)],$$

где ω - циклическая частота, F - оператор Фурье-преобразования. Для повышения надежности спектральных оценок функция $G_x(\omega)$ вычисляется также в другом варианте обработки с применением алгоритма быстрого преобразования Фурье в виде

$$G_x(\omega) = |F[X(t)]|^2.$$

Аналогично вычисляется и взаимная спектральная плотность мощности

$$G_{xy}(\omega) = F[X(t)] \cdot F[Y(t)]^*.$$

Дополнительно определяются плотности вероятностей распределения $P(X)$ и $P(\Delta X)$, где $\Delta X = X_i - X_{i-1}$ - отклонение между последовательными значениями параметра и дисперсия внутри каждой последовательности экспериментальных данных длиной 128 слов. Кроме того, предусмотрена возможность нахождения действительных значений линий в спектре $G_x(\omega)$. Эта процедура необходима в том случае, когда реальный физический процесс содержит частоты, большие критической частоты Найквиста, в результате чего они проявляются в спектре $G_x(\omega)$ как ложные линии в диапазоне $[0, f_c]$. Процесс нахождения действительных частот осуществляется на основании двух или более измерений, проведенных с различной, но близкой частотой опроса измеряемых параметров. Аналогично проводится обработка второго параметра $Y(t)$.

2. СТРУКТУРА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

К основным объектам ИБР-2, для которых прежде всего требуется описанный выше анализ, относятся активная зона, модулятор реактивности и натриевый контур системы охлаждения. Информация об измеряемых параметрах объектов поступает на ЭВМ от датчиков различного типа /ионизационных камер, термопар, емкостных и индукционных датчиков/, которые различаются внутренним сопротивлением /датчики тока или напряжения/, видом выходного сигнала /аналоговый, дискретный/, а также уровнем помех. Для измерения сигналов в условиях интенсивных помех используются изолированные нормирующие преобразователи ^{1/4}, соответствующие формирователи и согласую-

щие устройства для передачи сигналов на расстояние ~1 км. Эти устройства позволяют преобразовать сигналы датчиков в сигналы, воспринимаемые входными блоками КАМАК: текущее значение непрерывного аналогового сигнала, амплитуда импульсного сигнала, частота следования импульсов или число импульсов, пропорциональные значению параметра. В соответствии с этим для измерения любых комбинаций двух параметров и некоторых комбинаций трех параметров в крейт КАМАК введены следующие блоки: два 12-разрядных и один 10-разрядный амплитудный кодировщик /АК/, один 12-разрядный временной кодировщик /ВК/, 16-разрядный реверсивный счетчик /РСЧ/ и четыре 12-разрядных счетчика /СЧ₁₋₄/.

Структурная схема измерительной части системы показана на рис.1. Аналоговые сигналы с датчиков температуры натрия на входе ($T_{вх}^{\circ}$) и выходе ($T_{вых}^{\circ}$) активной зоны, расхода теплоносителя в петлях "А" (G_A) и "Б" (G_B), а также подогрева натрия в активной зоне (ΔT°) преобразуются в частоту с погрешностью 0,1-0,3% и в течение времени Δt , задаваемого программно при помощи счетчика с предварительной установкой /СПУ/ и генератора /Г₂/, интегрируются в счетчиках /СЧ/. Синхронизация и частота опроса значений параметра задаются генератором Г₁ или внешним импульсом запуска от ИБР /"0" P/. Реверсивный счетчик /РСЧ/ служит для отсчета импульсов с датчиков положения органов регулирования КО, ПР, АР ($L_{КО}, L_{ПР}, L_{АР}$). Все параметры модулятора реактивности /МР/ измеряются с использованием блоков АК или ВК. Основные сочетания параметров при измерении парных корреляций представлены в табл.1, где W - мощность реактора /в импульсном режиме - энергия импульсов мощности; при измерении корреляций W-W используют сигналы с двух ионизационных камер/, X_O и X - осевые смещения основного /ОПО/ и дополнительного /ДПО/ подвижных отражателей, T_O и T - периоды вращения ОПО и ДПО соответственно, ϕ - сдвиг фаз между ОПО и ДПО, I - ток в цепи электромагнитной муфты, соединяющей вал двигателей с валом ОПО, U - напряжение в цепи двигателя привода модулятора реактивности.

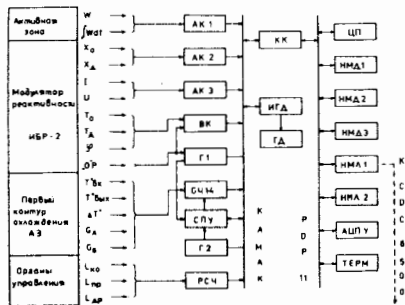


Рис.1. Структурная схема измерительной системы корреляционного анализа реакторных параметров. Пояснения в тексте.

Магистраль КАМАК подключена через крейт-контроллер /КК/ к мини-ЭВМ типа PDP-11/20 с емкостью оперативной памяти 28 К слов.

В число периферийных устройств ЭВМ, используемых в данной системе, входят два накопителя на магнитной ленте /НМЛ/, накопитель /НМД/ на гибких дисках (RX) емкостью 128К слов, накопителя на съемном диске (RK) 2,5 Мбайт и фиксированном диске (RF) емкостью 256 Кслов, а также алфавитно-

Таблица

Основные парные корреляции, измеряемые на реакторе ИБР-2, и используемые при этом блоки КАМАК

№	Измеряемые параметры	Используемые входные блоки КАМАК	Режим работы реактора	
			стационарн.	импульсн.
I	W - W	АК - АК(СЧ)	+	
		АК - АК		+
	W - X ₀ (X _д)	АК - АК		+
	W - T ₀ (T _д)	АК - ВК		+
	W - φ	АК - ВК		+
5	W - T ₀ ^{вх} (T _{вх} ⁰)	АК - СЧ	+	+
	W - ΔT ⁰			
6	W - G _A (G _B)	АК - СЧ	+	+
7	W - I(U)	АК - АК		+
8	W - L _{КО} (L _{ПР} , L _{АР})	АК - РСЧ	+	+
9	X ₀ - X _д	АК - АК		+
10	X ₀ (X _д) - φ	АК - ВК		+
II	G _A - G _B	СЧ - СЧ	+	+
12	G _A (G _B) - ΔT ⁰	СЧ - СЧ	+	+
13	G _{A+B} - ΔT ⁰	СЧ СЧ СЧ	+	+
14	G _{A+B} - L _{КО} (L _{ПР} , L _{АР})	СЧ-СЧ-РСЧ	+	+

цифровое печатающее устройство /АЦПУ/ и консольный терминал /ТЕРМ/ типа DZM - 180 KSR. Минимальный состав внешних устройств, необходимых для работы системы, следующий: один НМЛ, любой из перечисленных выше магнитных дисков и телетайп. Минимальная емкость необходимой оперативной памяти - 10 К слов. Один из дисков /обычно РК/ используется для хранения операционной системы и программ, работающих с блоками КАМАК. Два других диска служат для временного хранения экспериментальных файлов. После окончания измерений или в ходе измерений информацию можно записать в НМЛ с целью дальнейшей обработки на ЭВМ CDC-6500.

3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

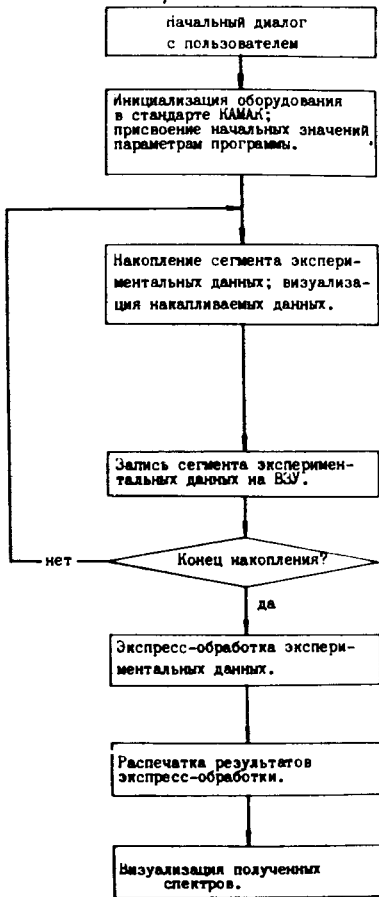
Создано несколько версий программного обеспечения системы, построенных по модульному принципу. Каждая версия обеспечивает работу системы с определенным сочетанием блоков КАМАК. В состав

Рис.2. Структурная схема программного обеспечения.

каждой версии программного обеспечения входят средства ведения диалога с экспериментатором, управляющая программа, средства накопления экспериментальной информации, программа визуализации результатов эксперимента и программы экспресс-обработки экспериментальных данных /рис.2/.

Средства ведения диалога позволяют задать дату, время эксперимента, размер и название файла экспериментальных данных, название внешнего запоминающего устройства /ВЗУ/ ЭВМ, на которое должен записываться этот файл, начальные установочные значения блоков КАМАК и другую сопутствующую предстоящему эксперименту информацию. По желанию экспериментатора диалог ведется либо в полном, либо в сокращенном варианте.

Управляющая программа осуществляет начальную установку состояния и начальных условий /статуса/ в используемом оборудовании КАМАК, задание констант и начальных значений переменных, используемых программами.



В зависимости от условий эксперимента управляющая программа осуществляет вызовы необходимых программ и управляет последовательностью их работы.

Программа накопления экспериментальных данных вызывается по сигналу прерывания от блоков КАМАК. Информация считывается с выходных регистров блоков КАМАК и записывается в свободное поле /буфер/ оперативной памяти /из имеющихся двух/. Содержимое заполненного буфера, закрытого для регистрации, без прерывания процесса накопления переписывается /по внепрограммному каналу/ на указанное в начале диалога ВЗУ /магнитный диск или на магнитную ленту/. По желанию экспериментатора программа позволяет регистрировать усредненные значения экспериментальных данных, используемые далее в качестве исходных.

Программа визуализации позволяет экспериментатору контролировать на точечном дисплее процесс накопления экспериментальных данных и наблюдать полученные в результате обработки гистограммы.

После окончания накопления на этой же мини-ЭВМ проводится предварительная обработка данных в объеме, указанном в разд.1. Запуск программы обработки следует после указания ВЗУ и названия сформированного файла. Для вывода результатов обработки используются терминал оператора и дисплей /5,6/.

4. НЕКОТОРЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В течение 1977-1981 гг. при помощи системы корреляционного анализа проведены исследования наиболее важных параметров реактора ИБР-2. Большое внимание уделялось изучению шумовых характеристик реактора, особенно влиянию вибраций подвижного отражателя на флуктуации мощности, как одному из предполагаемых основных источников шумов реактора. По сравнению с физическим пуском энергетический пуск реактора осуществлялся с другим вариантом подвижного отражателя /с дополнительным подвижным отражателем в виде трезубца/. Естественно, что динамика этого отражателя оказалась иная, чем для предыдущего варианта /со сплошным диском ДПО/. Однако ожидаемые газодинамические удары и вызванные ими вибрации отражателей не привели к дополнительным флуктуациям мощности /7/.

На рис.3а для сравнения показаны спектральные плотности мощности осевых колебаний основного подвижного отражателя в разных вариантах отражателей и соответствующие им спектры флуктуаций мощности. Поперечные вибрации ОПО невелики и по оценке стандартного отклонения σ_x составляют $\sim 0,01$ мм. Снижение скорости ОПО в два раза с 50 до 25 Гц уменьшило значение σ_x , однако суммарные флуктуации мощности по сравнению с аналогичными флуктуациями при физическом пуске несколько увеличились. - с $\sim 2\%$ до $\sim 3\%$. Здесь проявился дополнительный эффект, обусловленный протеканием натрия через активную зону. Пик 0,6 Гц в спектре флуктуаций мощности /рис.3б/ обусловлен влиянием натриевой системы охлаждения и растет при увеличении расхода натрия. Влияние динамики натрия в этой области частот подтверждает взаимная корреля-

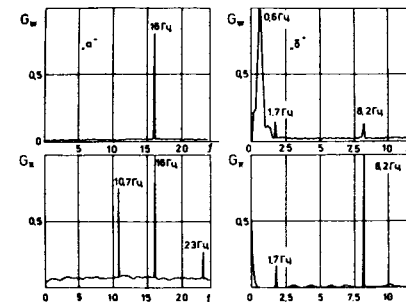


Рис.3. Спектральные плотности мощности шумов энергии всплеск реактора ИБР-2 (G_w) и осевых колебаний лопасти основного подвижного отражателя (G_x) во время физического /а/ и энергетического /б/ пусков реактора; f - частота /Гц/. Цифрами на рисунках обозначена частота характерных пиков.

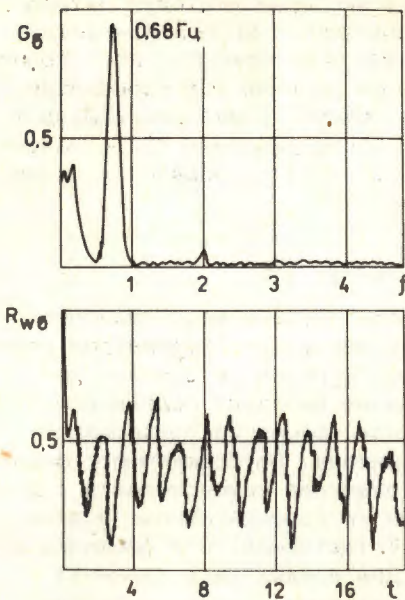


Рис.4. Спектр шумов расхода теплоносителя в петле "А" первого контура (G_G) и взаимная корреляционная функция мощности реактора и расхода теплоносителя в петле "А" (R_{WG}); f - частота /Гц/, t - время /с/.

корреляционная функция между расходом натрия и мощностью, а также наличие соответствующего пика в спектре флуктуаций расхода /рис.4/. В режиме 5 Гц в спектре флуктуаций мощности появляются пики с частотой от 0,2 до 0,5 Гц, вызванные рассинхронизацией ОПО и ДПО при их вращении. Однако этот эффект, как показали измерения, можно уменьшить введением так называемого "мягкого" режима вращения ОПО с проскальзыванием электромаг-

нитной муфты, соединяющей вал двигателя с ОПО. Суммарные флуктуации энергии всплеск реактора в режиме 5 Гц $/\sigma_W/\bar{W} = 4 \div 5\%$ несколько превышают флуктуаций в режиме 25 Гц, однако в целом для данного варианта модулятора реактивности шумы реактора ниже допустимого уровня.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Г.П.Жукову за внимание к работе и помощь. Авторы благодарны также В.Г.Тяшину, неизменно принимавшему участие в обсуждении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Наумов Б.Н. и др. Приборы и системы управления, 1977, №10, с.3.
2. Ломидзе В.Л. и др. ОИЯИ, P13-12195, Дубна, 1979.
3. Вагов В.А. ОИЯИ, 62-13-12305, Дубна, 1978.
4. Гуляев В.А., Замрий В.Н. ОИЯИ, P13-81-230, Дубна, 1981.
5. RT-11 System Reference Manual (DEC-11-ORUGA-C-D). DEC, Maynard, Massachusetts, 1975.
6. RT-11 System Support Manual (DEC-11-ORPGA-B-D). DEC, Maynard, Massachusetts, 1975.
7. Едунов Л.В. и др. ОИЯИ, 13-80-628, Дубна, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 июля 1982 года.

Вагов В.А. и др. Система для корреляционных и спектральных измерений параметров реактора ИБР-2 P13-82-533

Рассматривается методика корреляционных и спектральных измерений ~20 основных параметров активной зоны, модулятора реактивности, первого контура системы натриевого охлаждения и органов управления реактора ИБР-2 с целью исследования условий стабильной и безопасной работы реактора. Описывается структура измерительно-вычислительной системы /ориентированной на использование ЭВМ/, которая программно совместима с малой ЭВМ типа СМ-3 и с оборудованием в стандарте КАМАК. Рассматривается также программное обеспечение измерительной системы и приводятся некоторые результаты измерений, осуществленных при проведении физического и энергетического пусков реактора ИБР-2.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Vagov V.A. et al. A System for Correlational and Spectral Measurements of IBR-2 Reactor Parameters P13-82-533

The method is considered of correlational and spectral measurements of about 20 principal parameters of the core, of the reactivity modulator, of the first circuit of liquid sodium cooling system and of control units of the IBR-2 pulsed reactor in order to study the conditions for safe and stable operation of the reactor. The structure is considered of the measuring system based on a computer compatible with the mini-computer of the СМ-3 type and devices in CAMAC standard. Its software is also discussed. Several results are reported of the measurements performed during the physical startup and power startup of the IBR-2 reactor.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.