



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

99-127

P13-99-127

Е.А.Бондарченко, Ю.Н.Пепельшев, А.К.Попов

МОДЕЛЬ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА
ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ИБР-2
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Направлено в журнал «Annals of Nuclear Energy»

1999

1. Введение

Исследование переходных процессов импульсного реактора ИБР-2 имеет важное значение для повышения безопасности и надежности работы реактора. В первую очередь это связано с необходимостью анализа поведения реактора в различных аномальных и аварийных ситуациях, во-вторых, для тренировки реакторного персонала и, в-третьих, для "подсказки" действий оперативного персонала в различных нетипичных ситуациях. Кроме того, эксплуатация импульсного реактора имеет специфическую особенность, при которой знание переходных процессов является крайне важным для безопасной и надежной работы реактора. Реактор оснащен системой аварийной защиты (АЗ), в том числе и по отклонению пиковой мощности (на +100% и -50%), а также средней мощности от заданных значений ($\pm 20\%$). Вследствие высокой чувствительности реактора к флуктуациям реактивности случайные изменения пиковой мощности достаточно велики ($\pm 40\%$ от среднего уровня), поэтому "запас" возмущений мощности до срабатывания АЗ мал, и некоторые действия оператора, направленные на поддержание средней мощности на заданном уровне, могут привести к срабатыванию АЗ. Кроме того, динамические параметры реактора в процессе его эксплуатации изменяются. Соответственно, необходимы дополнительные модельные исследования для обоснования безопасной работы реактора.

2. Краткое описание реактора ИБР-2

Импульсный реактор периодического действия ИБР-2 пущен в эксплуатацию в 1984 году на средней мощности 2 МВт с частотой повторения импульсов мощности 5 Гц. Активная зона реактора, состоящая из 74 кассет с двуокисью плутония, охлаждается жидким натрием с расходом 80-100 м³/час. Система охлаждения – двухконтурная, двухпетлевая. Импульсы мощности генерируются с помощью модулятора реактивности. Модулятор реактивности, состоящий из основного подвижного отражателя ОПО, вращающегося со скоростью 1500 об/мин, и дополнительного подвижного отражателя ДПО, вращающегося со скоростью 300 об/мин, создает периодические импульсы реактивности. Благодаря этому реактор периодически на короткое время переводится из состояния глубокой подкритичности в состояние надкритичности на мгновенных нейтронах. В результате создаются периодические импульсы мощности, в течение которых выделяется почти вся энергия, в то время как на долю пауз приходится лишь несколько процентов (~7%) энергии, выделяемой в реакторе.

3. Концепция построения модели ИБР-2

Предлагаемая модель реактора построена на следующей концепции:

1. Модель динамики реактора должна быть основана на максимально возможном использовании экспериментальных данных по параметрам обратных связей в различных режимах работы реактора. Это связано с тем, что при теоретическом описании некоторых сложных процессов, происходящих в активной зоне, таких, например, как искривление топливных кассет при изменении мощности, нельзя получить точного однозначного решения.
2. Модель должна учитывать влияние на мощность как "быстрых" процессов, происходящих в активной зоне, так и медленных - связанных с влиянием контура натриевой системы охлаждения активной зоны.

3. В-третьих, программная реализация модели должна иметь блочную структуру с возможностью внесения простым путем любых изменений и дополнений без изменения общей структуры модели. В общем случае модель представляет собой некоторую блочную систему автоматического регулирования мощности реактора.
4. Длительность импульсов мощности (215 мкс) на три порядка меньше периода их следования, равного 0,2 с. Это позволяет при моделировании динамики реактора математически представить каждый импульс мощности в виде дельта-функции, помноженной на энергию, выделяемую в течение импульса.

Ниже дано краткое описание отдельных блоков общей модели динамики ИБР-2.

4. Уравнения кинетики

В качестве исходных приняты известные уравнения кинетики одноточечной модели реактора

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{\delta k - \beta}{\tau} n + \sum_i \lambda_i C_i, \\ \frac{dc_i}{dt} &= \frac{\beta_i}{\tau} n - \lambda_i C_i, \end{aligned} \quad (1)$$

($i = 1, 2, \dots, 6$),

которые после перехода к безразмерным приведены к виду

$$\begin{aligned} T_0 \frac{dP}{dt} &= \frac{\varepsilon}{\beta} P + S, \\ S &= \sum_i S_i, \\ T_i \frac{dS_i}{dt} + S_i &= \mu_i P. \end{aligned} \quad (2)$$

В этих уравнениях:

n - плотность нейтронов,

β_i, β - соответственно доля запаздывающих нейтронов группы i и суммарная,

δk - реактивность,

$\varepsilon = \delta k - \beta$ - реактивность на мгновенных нейтронах.

$P = n / \bar{n}$ - мощность реактора в долях от средней мощности.

\bar{n} - средняя плотность нейтронов,

$\mu_i = \beta_i / \beta$ - относительная доля запаздывающих нейтронов группы i . C_i, λ_i - соответственно концентрация и постоянная распада источников запаздывающих нейтронов группы i .

τ - эффективное время жизни мгновенных нейтронов.

$T_i = \tau / \beta, T_i = 1 / \lambda_i$ - соответственно постоянная времени мгновенных и запаздывающих нейтронов,

$S_i = \tau \lambda_i c_i / (\beta \bar{n}), S$ - интенсивность источников запаздывающих нейтронов группы i и суммарная.

t - время.

Справедливость одноточечной модели для ИБР-2 была доказана во время физического пуска реактора в экспериментах России- α по измерению среднего времени жизни мгновенных нейтронов. Были приняты следующие значения параметров: $\tau = 6 \cdot 10^{-8}$ с, $\beta = 2,16 \cdot 10^{-3}$, $\mu_i = 0,038, 0,28, 0,216, 0,328, 0,103, 0,035, \lambda_i = 0,0129, 0,0311, 0,134, 0,331, 1,26, 3,21$ с $^{-1}$.

Импульс реактивности, обусловленный смещением основного подвижного отражателя (ОПО) относительно физического центра реактора показан на рис. 1. Энергия импульса мощности за интервал времени, соответствующий смещению ОПО от $-\varphi_\psi$ до φ_ψ (см. рис. 1), вычисленная из уравнений (2), имеет вид [1]

$$E_u = M(\varepsilon_m) \cdot S, \quad (3)$$

где S - интенсивность источников запаздывающих нейтронов в момент, соответствующий началу импульса реактивности (т.е. углу $-\varphi_\psi$ на рис. 1);

M - импульсный коэффициент передачи, представляющий собой нелинейную функцию от ε_m ;

ε_m - наибольшее значение реактивности, достигаемое в течение импульса реактивности.

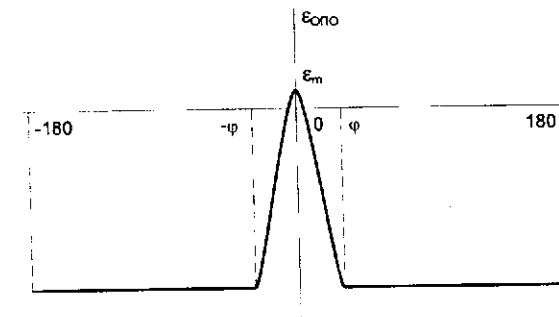


Рис.1. Реактивность основного подвижного отражателя на мгновенных нейтронах ε_{00}

Для режимов работы реактора, при которых энергия импульса изменяется не более, чем в 3-4 раза относительно базового значения, допустима экспоненциальная аппроксимация уравнения (3). Такая аппроксимация применима и в том случае, если полагать, что вся энергия за период E выделяется в течение импульса, т.е. присоединить энергию фона к энергии импульса. В результате из уравнений (2) получены уравнения (4), соответствующие n -му импульсу мощности:

$$\begin{aligned} \frac{E_n}{E^0} &= \frac{S_n}{S^0} \exp\left(\frac{\varepsilon_{mn} - \varepsilon_m^0}{\beta_u}\right), \\ S_n &= \sum_i S_{in}, \\ S_{in} &= (S_{in-1} + \mu_i \lambda_i E_{n-1}) \exp(-\lambda_i T_i). \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\beta_u = 1 / \left. \frac{d \ln M}{d \varepsilon_m} \right|_{\varepsilon_m^0} = M^0 / \left. \frac{dM}{d \varepsilon_m} \right|_{\varepsilon_m^0}, \quad M^0 = \frac{E^0}{S^0} = \frac{1}{\sum_i \mu_i \lambda_i \frac{\exp(-\lambda_i T)}{1 - \exp(-\lambda_i T)}} \quad (5)$$

Здесь $E^0, S^0, M^0, \varepsilon_m^0$ - базовые значения E, S, M и ε_m ;

T - период импульсов мощности,

β_u - импульсная доля запаздывающих нейтронов, введенная в работу [2] в качестве единицы измерения реактивности для импульсного реактора (по аналогии с β для стационарного реактора). Для ИБР-2 $\beta_u = 1,6 \cdot 10^{-4}$, $\varepsilon_m = 1 \cdot 10^{-3}$.

Представляет интерес в качестве переменных рассматривать отклонения переменных от базовых значений в относительных единицах, а в качестве реактивности - отклонение реактивности от ее базового значения, выраженное в долях β_u . В связи с этим уравнения кинетики (4) приведены к следующему виду

$$\begin{aligned} \Delta e_n &= (\Delta s_n + 1) \exp \rho_n - 1, \\ \Delta s_n &= \sum_i \Delta s_{in}, \\ \Delta s_{in} &= (\Delta s_{in-1} + \frac{E^0}{S^0} \mu_i \lambda_i \Delta e_{n-1}) \exp(-\lambda_i T) \end{aligned} \quad (6)$$

5. Уравнения мощностной обратной связи (МОС)

На основании анализа серии экспериментов 1982 г., в которых регистрировались переходные процессы мощности, вызванные изменением уровня реактивности при отключенном автоматическом регуляторе, МОС реактора ИБР-2 была описана простейшим образом - дифференциальным уравнением первого порядка, т.е. представлена одним инерционным звеном [3]. Более детальный анализ переходных процессов, которые были вызваны периодическими прямоугольными колебаниями реактивности в широком диапазоне частот в серии экспериментов 1988 - 1989 г.г., показал, что в линейном приближении МОС следует описывать тремя дифференциальными уравнениями [4, 5]. При симметричных колебаниях реактивности зарегистрированные колебания мощности заметно несимметричны. В связи с этим в работе [6] один из трех коэффициентов передачи был принят зависимым от температуры тепловыделяющих элементов. Так как температура топлива не регистрировалась, а оценивалась расчетным путем, в работе [7] коэффициенты передачи были приняты зависимыми от реактивности МОС, поскольку предполагалось, что реактивность МОС пропорциональна температуре топлива.

В 1992-1996 г.г. была зарегистрирована серия переходных процессов мощности, вызванных прямоугольными колебаниями реактивности с одним периодом колебаний (32 с) при средней мощности реактора от 1,7 до 2 МВт и расходе теплоносителя 90 м³/час. МОС была представлена в виде трех параллельных звеньев с коэффициентами передачи, зависимыми от ее реактивности, т.е. были введены местные обратные связи. Это дало хорошее приближение рассчитанных переходных процессов к зарегистрированным [8]. Звено с наибольшей постоянной времени (7-8 с) отображает расширение топлива активной зоны, что согласуется с расчетной оценкой [9]. Два других звена с меньшими постоянными времени, по-видимому, отображают изгиб топливных элементов и расширение опорной плиты, с которой связаны элементы

МОС, моделируемая этими звеньями и обусловленная процессами в активной зоне реактора, названа быстрой.

Анализ длительного переходного процесса, вызванного разовым уменьшением уровня реактивности при отключенном автоматическом регуляторе, показал, что помимо быстрой МОС необходимо дополнительно вести медленную МОС в виде двух параллельно соединенных инерционных звеньев с постоянными времени в десятки раз превосходящими постоянные времени быстрой МОС [10]. Медленная мощностная обратная связь, по-видимому, отображает влияние контура теплоносителя. Проанализированный переходный процесс (его длительность была взята 1000 с) соответствовал средней мощности ИБР-2 1,87 МВт, расходу теплоносителя 80 м³/час и был обусловлен быстрым смещением промежуточного регулятора на 3,41 мм вниз, т.е. уменьшением реактивности на 0,194 β_u . Этот переходный процесс, замеренный в январе 1997 г., отличался существенными колебаниями (более 40 % от исходного уровня). Быстрая МОС была представлена двумя инерционными звеньями. Коэффициент передачи звена с большей постоянной времени был принят зависимым от реактивности, обусловленной именно этим звеном, а коэффициент передачи звена с меньшей постоянной времени - от суммарной реактивности МОС. Именно при таких нелинейностях достигнуто наилучшее приближение рассчитанного и зарегистрированного переходных процессов мощности. Третье инерционное звено быстрой МОС было исключено, т.к. его постоянная времени получилась много меньше периода следования импульсов мощности. Введение того или иного вида нелинейностей в быструю МОС требует особого изучения.

В настоящей работе коэффициенты передачи быстрой МОС приняты зависимыми от отклонений энергии импульсов мощности, т.е. без использования местных обратных связей, что более удобно при моделировании. Такой учет нелинейности вполне приемлем при умеренных отклонениях энергии импульсов мощности (-10%).

В результате реактивности быстрой МОС описана следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \rho'_{Tj} &= \sum_{i=1}^j \rho_{Tji} \\ \rho_{Tjm} &= (\rho_{Tjm-1} + E^0 \Delta e_{n-1} \frac{k_j (1 + c_j \Delta e_{n-1})}{T_j}) \exp(-\frac{T}{T_j}), \end{aligned} \quad (7)$$

где $j = 1, 2, 3$.

Для моделирования длительных переходных процессов (сотни секунд) необходим учет медленной МОС, которая описана уравнениями:

$$\begin{aligned} \rho''_{Tn} &= \sum_{i=4}^5 \rho_{Tni} \\ \rho_{Tjm} &= (\rho_{Tjm-1} + E^0 \Delta e_{n-1} \frac{k_j}{T_j}) \exp(-\frac{T}{T_j}), \end{aligned} \quad (8)$$

где $j = 4, 5$. При этом параметры медленной МОС удовлетворяют условию

$$k_4 / T_4 = -k_5 / T_5 \quad (9)$$

Условие (9) выбрано из физических соображений и означает, что реактивность медленной МОС не изменяется скачком.

6. Уравнения автоматического регулятора

Автоматический регулятор ИБР-2 включает в себя регулирующий стержень совместно с шаговым двигателем и блоком его управления, а также блок сглаживания. На вход блока сглаживания подается сигнал $\delta e_n = \Delta e_m - \Delta e_n$, обусловленный относительным отклонением энергии импульса мощности Δe_n от его задающего значения Δe_m , а на выходе формируется сигнал $\delta \tilde{e}_n$, подаваемый на блок управления двигателя.

Блоку сглаживания соответствует уравнение

$$\delta \tilde{e}_n = \delta \tilde{e}_{n-1} + \frac{\delta e_n - \delta \tilde{e}_{n-1}}{k}, \quad (10)$$

где $\delta \tilde{e}_{n-1}$, $\delta \tilde{e}_n$ - выходные сигналы блока сглаживания, соответствующие (n-1)-му и n-му импульсам мощности,

k - коэффициент сглаживания.

На реакторе ИБР-2 предусмотрен выбор четырех фиксированных значений k, равных 4, 8, 16 и 32. В блоке управления двигателем также предусмотрен выбор четырех фиксированных значений коэффициентов пропорциональности между $\delta \tilde{e}$ и скоростью шагового двигателя. Это осуществляется выбором одного из четырех возможных значений параметра Δ (0,05, 0,10, 0,15, 0,20), т.е. выбирается соответствие между сглаженным отклонением энергии импульса мощности $\delta \tilde{e} = \Delta$ и скоростью шагового двигателя $v_A = 5,5$ шагов/с. Каждый шаг двигателя приводит к изменению реактивности AP на $m_A = 0,0136 \beta_u$. В результате реактивность, обусловленная шаговым двигателем, описана следующим уравнением

$$\rho_{An} = \rho_{An-1} + \frac{v_A m_A}{\Delta} T \delta \tilde{e}_{n-1}, \quad (11)$$

где $v_A m_A = 0,0748 \beta_u/c$.

7. Блок-схема реактора ИБР-2 для моделирования переходных процессов

На рис. 2 показана блок-схема реактора ИБР-2, а на рис. 3, 4, 5 - блок схемы входящих в нее элементов. Реактивность реактора представлена суммой

$$\rho_n = \rho_{An} + \rho_{Fn} + \rho_{Tn}, \quad (12)$$

где $\rho_{Tn} = \rho'_{Tn} + \rho''_{Tn}$ - суммарная реактивность МОС;

ρ_{Fn} - реактивность, обусловленная внешними факторами.

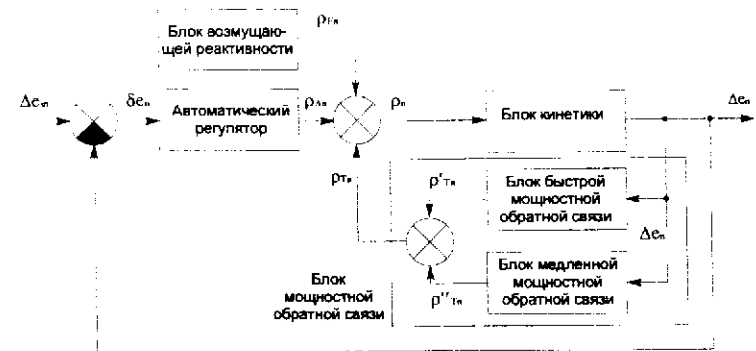


Рис.2. Блок-схема реактора ИБР-2

Реактивность ρ_{Fn} моделируется блоком возмущающей реактивности. Он позволяет формировать различные возмущения реактивности, вносимые перемещением органов управления, поперечными колебаниями основного и вспомогательного подвижных отражателей, их взаимной расфазировкой и т.д.

Блок кинетики описан уравнениями (6), блок быстрой МОС - (7), блок медленной МОС - (8), (9), автоматический регулятор - (10), (11).

Блоки кинетики и быстрой МОС содержат помимо линейных также и нелинейные элементы. Блок медленной МОС и AP линейны. Относительное отклонение энергии импульсов представлены в виде импульсов, пропорциональных дельта-функциям. Что касается прочих переменных, то в уравнениях динамики используется лишь их значения в моменты появления импульсов мощности.

При создании программного обеспечения модели были использованы программы, позволяющие конструировать модульную систему из отдельных блоков, описанных в z-представлении. Исходные входные воздействия реактивности задавались во временной области. Выходной процесс изменения мощности определялся путем обратного z-преобразования.

Дискретные передаточные функции получены путем замены переменной $z = \exp(j\omega T)$ из импульсных передаточных функций, которые, в свою очередь, были получены ранее для анализа устойчивости [8, 11]. Блоку запаздывающих нейтронов, который описан уравнениями (6), соответствует передаточная функция $W_S(z)$

$$W_S(z) = \sum_{i=1}^6 W_{Si}(z), \quad (13)$$

$$W_{Si}(z) = \frac{\Delta s_i(z)}{\Delta e(z)} = h_{Si} \frac{z^{-l}}{a_{Si} - z^{-1}},$$

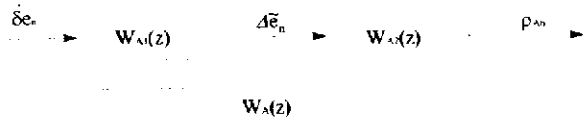


Рис.5. Блок-схема автоматического регулятора.

$W_A(z)$, $W_{A1}(z)$, $W_{A2}(z)$ - дискретные передаточные функции соответственно автоматического регулятора, блока сглаживания и шагового двигателя совместно с регулирующим стержнем (17), (18)

8. Моделирование переходных процессов

Для моделирования переходных процессов использована общая блок-схема (рис.2) и блок-схемы входящих в нее элементов (рис. 3+5), где показаны дискретные передаточные функции и учтены нелинейности.

На рис.6 показан переходный процесс энергии импульсов мощности $\Delta \epsilon$, зарегистрированный в эксперименте с периодическими прямоугольными колебаниями реактивности ρ_n с периодом 32 с. Реактор находился в режиме саморегулирования, т.е. при отключенном АР. Эксперимент проводился в мае 1993 г. при средней мощности 1,7 МВт, расходе теплоносителя 90 м³/час и амплитуде реактивности 0,0589 β_0 . Там же на рис.6 показан переходный процесс $\Delta \epsilon$, вычисленный согласно описанным блок-схемам (рис. 2-5). Поскольку период колебаний в десятки раз меньше наименьшей постоянной времени медленной МОС, медленная МОС не учитывалась.

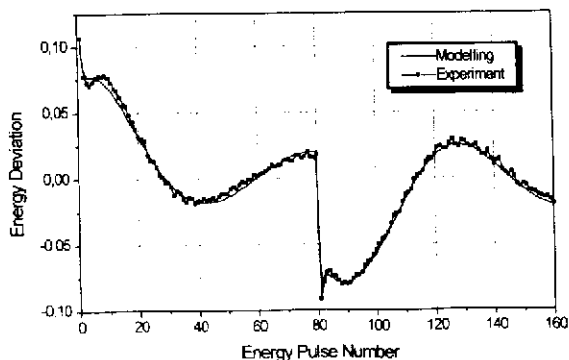


Рис. 6. Сравнение экспериментальной и расчетной зависимости колебаний энергии импульсов мощности при периодической модуляции внешней реактивности на $\pm 0.0589 \beta_0$ с периодом 160 импульсов. Средняя мощность равна 1.7 МВт

Вычисленный переходный процесс соответствовал следующим параметрам МОС:

$T_1 = 9.27$	$T_2 = 3.19$	$T_3 = 0.24$ (с)
$k_1 = -6.03$	$k_2 = 2.33$	$k_3 = -0.391$ (β_0 /МВт)
$c_1 = 0.89$	$c_2 = 0.10$	$c_3 = -1.4$

Эти параметры были выбраны из условия наименьшего среднеквадратического отклонения $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\Delta \epsilon_n - \Delta \epsilon_n^c)^2}$, которое оказалось равным 0,0283. Число импульсов N в одном периоде прямоугольного изменения реактивности равно 160 (32 с).

9. Заключение

1. Создана модель импульсного реактора ИБР-2, предназначенная для моделирования переходных процессов с использованием программ, ориентированных на прямое и обратное z-преобразование.
2. Для отдельных режимов работы реактора учтены нелинейные зависимости в блоках кинетики и мощностной обратной связи.
3. Линейные элементы модели представлены дискретными передаточными функциями, полученными в результате использования z-преобразования.
4. Мощностная обратная связь представлена в виде блока быстрой обратной связи, отражающего все сложные процессы, происходящие в активной зоне при ее разогреве, и блока медленной обратной связи, отражающего влияние контуров теплоносителя на мощность для частного случая.

Авторы полагают, что созданная модель является только некоторым промежуточным шагом многолетней работы, как в экспериментальном, так и в теоретическом плане. Реальная ситуация такова, что при работе реактора и, соответственно, выгорании топлива динамика реактора меняется. Соответственно, в принятой идеологии, необходимо проведение дополнительных экспериментов по определению изменений в параметрах быстрых компонентов обратной связи. Кроме того, медленные составляющие обратной связи, обусловленные системой охлаждения реактора, изучены не полностью. Здесь необходимо включение в общую модель динамики теоретического описания контура охлаждения и проведение дополнительных экспериментов по уточнению его характеристик.

Работа выполнена по проекту МНТЦ №682-97.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов А.К. Импульсный коэффициент передачи реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ. РЗ-95-463, Дубна, 1995.

2. Бондаренко Е.Е., Стависский Ю.Я. Импульсный режим работы быстрого реактора. Атомная энергия, 1959, т.7, вып. 5. с.417-422.
3. Пепельшев Ю.Н., Попов А.К., Рогов А.Д. Частотные характеристики быстрой мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ, Р13-83-471, Дубна, 1983.
4. Шабалин Е.П и др. Импульсная характеристика обратной связи в ИБР-2. Атомная энергия, 1991, т.70, вып.5, с.326-329 (препринт ОИЯИ, Р3-90-29, Дубна, 1990).
5. Попов А.К. Частотная и импульсная переходные характеристики мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ, Р13-90-203, Дубна, 1990.
6. Каминский В.Л. Нелинейность мощностной обратной связи в реакторе ИБР-2. Сообщение ОИЯИ, Р13-93-95, Дубна, 1993.
7. Попов А.К. Упрощенная нелинейная модель мощностной обратной связи реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ, Р13-95-464, Дубна, 1995.
8. Попов А.К. Анализ устойчивости импульсного реактора ИБР-2 при девятипараметрической модели мощностной обратной связи. Сообщение ОИЯИ, Р13-96-297, Дубна, 1996.
9. Попов А.К., Рогов А.Д. Программа для моделирования на ЭВМ динамики импульсного реактора. Депонированная публикация ОИЯИ, Б1-11-10120, Дубна, 1976.
10. Попов А.К. Анализ длительного колебательного переходного процесса мощности импульсного реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ, Р13-97-361, Дубна, 1997.
11. Попов А.К. Анализ устойчивости импульсного реактора ИБР-2 при включенном автоматическом регуляторе. Сообщение ОИЯИ, Р13-98-275, Дубна, 1998.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 апреля 1999 года.