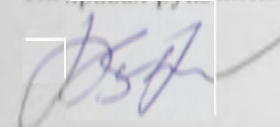


ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ ИМЕНИ И. М. ФРАНКА

13-2019-52

На правах рукописи



ДАВААСҮРЭН СУМХУУ

ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ
И ЕЕ ВЛИЯНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ИМПУЛЬСНОГО
РЕАКТОРА ИБР-2М

Специальность: 01.04.01 — приборы и методы
экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Отпечатано методом прямого репродуцирования
с оригинала, предоставленного автором.

Подписано в печать 25.10.2019.

Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 2,09. Тираж 100 экз. Заказ № 59789.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/

Дубна 2019

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики имени И.М.Франка
Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители: ПЕПЕЛЫШЕВ Юрий Николаевич,
*кандидат физико-математических наук,
начальник группы ядерной безопасности,
Лаборатория нейтронной физики
имени И.М.Франка ОИЯИ*

ПОПОВ Александр Ксенофонтович,
*кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Лаборатория нейтронной физики
имени И.М.Франка ОИЯИ*

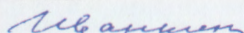
Официальные оппоненты: МАЛКОВ Андрей Павлович,
*доктор технических наук,
начальник управления ядерной безопасности,
АО ГНЦ-Научно-исследовательский
институт атомных реакторов,
Госкорпорация «Росатом», Димитровград*

АРТЕМЬЕВ Валерий Анатольевич,
*кандидат физико-математических наук,
директор, Автономная некоммерческая
организация Научно-исследовательский
институт технологии материалов, Москва*

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <http://dissertations.jinr.ru>.

С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного совета.

кандидат физико-математических наук  Т.И.Иванкина

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Создание модели динамики любого реактора крайне важно с точки зрения оценки его безопасности. Создание же модели динамики реактора, у которого нет аналога, важно вдвойне. Исследование динамики реактора ИБР-2М имеет огромное значение для повышения безопасности и надежности работы реактора. Во-первых, это связано с необходимостью анализа поведения реактора в различных аномальных и аварийных ситуациях; во-вторых, для «подсказки» действий оперативному персоналу в различных нетипичных ситуациях; в-третьих, для определения безопасных режимов его работы и определения границ возможных режимов неустойчивости.

Кроме того, эксплуатация импульсного реактора имеет специфическую особенность, поэтому знание переходных процессов является крайне важным для безопасной и надежной работы реактора. С помощью модели динамики можно оценивать: 1) переходные процессы при различных возмущениях, в том числе при нештатных возмущениях; 2) изменение параметров реактора путем сравнения зарегистрированных переходных процессов с процессами, полученными с помощью модели; 3) возможные изменения запаса устойчивости реактора.

Для исследования динамического состояния реактора с помощью модели динамики необходимо, в первую очередь, знание параметров мощностной обратной связи (МОС). Эти параметры определяются только экспериментальным путем, поскольку зависят от уровня мощности и от многих сложных процессов, происходящих в активной зоне.

Модель динамики ИБР-2М включает в себя широкий набор программ для моделирования переходных процессов изменения мощности реактора и вычисления частотных характеристик реактора как системы в целом, так и составляющих его элементов.

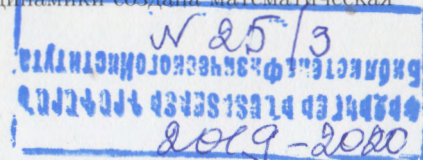
Работа выполнена по теме «Развитие реактора ИБР-2М с комплексом криогенных замедлителей нейтронов» (04-4-1105-2011/2019) и направлена на повышение безопасности ИБР-2М.

Цель работы

Цель работы – моделирование и экспериментальное исследование динамики импульсного реактора ИБР-2М периодического действия (модернизированного реактора ИБР-2) в начале эксплуатации (до энерговыработки 1000 МВт сут).

Научная новизна и значимость диссертационной работы

Создан вариант модели динамики ИБР-2М для вычисления процессов при быстром изменении реактивности (и, следовательно, мощности) в широком диапазоне. Также на основе модели динамики создана математическая



модель реактиметра ИБР-2М. В результате переходных процессов мощности, обусловленных прямоугольными колебаниями реактивности при работе ИБР-2М в режиме саморегулирования, оценены значения параметров МОС, запас устойчивости реактора по амплитуде и фазе при разных уровнях средней мощности, а также запас устойчивости реактора при работе в режиме автоматического регулирования мощности. На основе анализа вычисленных импульсных переходных характеристик и параметров МОС реакторов ИБР-2 и ИБР-2М показано, что при прочих равных условиях оба реактора устойчивы в штатном режиме работы.

Научно-практическая ценность работы

Научно-практическая ценность работы заключается в том, что была создана модель динамики ИБР-2М, с помощью которой можно моделировать быстрые изменения мощности реактора в широком диапазоне, вплоть до уровня фона, т.е. по времени от 0,2 с и по мощности до 10^{-5} от номинальной. Это позволило исследовать различные процессы изменения энергии импульсов, с помощью которых были определены безопасные режимы работы реактора и оптимизированы параметры системы автоматического регулирования мощности. Получены данные по изменению параметров МОС с мощностью и оценено влияние этого процесса на устойчивость реактора. Для реальных шумов реактивности, действующих в реакторе во время его нормальной работы, получены оценки границ колебательной неустойчивости ИБР-2М. Показано, что ИБР-2 и ИБР-2М реактора устойчивы к возмущениям реактивности. Разработанная модель динамики позволяет оценить поведение реактора не только в штатном режиме его работы, но и в различных аварийных ситуациях и аномальных переходных режимах. В целом все вышеуказанное повышает безопасность ИБР-2М.

Основные положения, выносимые автором на защиту

- Создание новой модели динамики ИБР-2М при быстром изменении мощности в широком диапазоне с помощью программы МАТЛАБ.
- Тестирование модели с помощью сравнения вычисленных переходных процессов для ИБР-2 и ИБР-2М с зарегистрированными.
- Создание модели реактиметра для получения реальных шумов реактивности из зарегистрированных амплитуд импульсов мощности.
- Обработка экспериментов по оценке параметров мощностной обратной связи, влияющей на безопасность реактора ИБР-2М.
- Оценка параметров мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2М.
- Оценка запаса устойчивости ИБР-2М при разных уровнях средней мощности в режимах саморегулирования и автоматического регулирования мощности.

- Сравнение динамики импульсных реакторов ИБР-2 и ИБР-2М.

Достоверность и апробация работы

Результаты исследования, вошедшие в данную диссертационную работу, были представлены автором на следующих научных мероприятиях:

- XVII научная конференция молодых ученых и специалистов (ОМУС-2013). МО, Дубна, 8-12 апреля 2013.
- International Conference «Mathematical Modeling and Computational Physics 2013». Dubna, Moscow reg. Russia, 8-12 July 2013.
- XVIII Международная научная конференция молодых ученых и специалистов (ОМУС-2014). МО, Дубна, 24-28 февраля 2014.
- Международная молодёжная конференция «Современные проблемы прикладной математики и информатики». МО, Дубна, 25-29 августа 2014.
- XIX Международная научная конференция молодых ученых и специалистов (ОМУС-2015). МО, Дубна, 16-20 февраля 2015.
- International Conference on Research Reactors: Safe Management and Effective Utilization. IAEA Headquarters in Vienna, Austria, 16-20 November 2015.
- The 6th International Conference on Contemporary Physics (ICCP-VI). Ulaanbaatar, Mongolia, 7-10 June 2016.
- International Conference on Mathematics & Computational Methods Applied to Nuclear Science & Engineering. Jeju, Korea, 16-20 April 2017.
- VI ежегодную конференцию молодых ученых и специалистов «Алушта-2017». Алушта, Республика Крым, 12-19 июня 2017.
- International Conference «Mathematical Modeling and Computational Physics, 2017». Dubna, Moscow reg. Russia, 3-7 July 2017.
- International Conference on Developments and Application of Nuclear Technologies. Krakow, Poland, 10-13 September 2017.

Публикации и личный вклад автора в работу

По теме диссертации опубликовано 6 научных статьи в реферируемых международных журналах, 1 препринта, а также 5 тезисов в сборниках научных трудов различных международных конференций (в том числе в реферируемых научных журналах).

Основные результаты, изложенные в диссертации, получены при непосредственном участии автора. Автор диссертации выполнял работы по созданию программ для модели динамики, по обработке и анализу данных экспериментальных исследований, проводил оценку параметров мощностной обратной связи. Автор участвовал в обсуждении и разработке моделей

динамики реактора и реализации решений их программного обеспечения (МАТЛАБ). Это отражено в теоретической части диссертации. Также автор выполнял моделирование переходных процессов при быстром изменении реактивности в широком диапазоне, моделирование реактиметра и проводил оценку запаса устойчивости реактора.

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, содержащего 56 наименований. Работа изложена на 96 страницах машинописного текста, включающих 43 рисунок и 5 таблиц.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы, формулируются цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту, кратко изложено основное содержание диссертационной работы.

В **первой главе** приведены подробное описание конструкции реактора ИБР-2М, его основные характеристики, основные понятия динамики ядерных реакторов и краткое описание изучения динамики импульсного реактора ИБР-2.

Во **второй главе** приведено подробное описание модели динамики импульсного реактора ИБР-2М и некоторые результаты её использования.

В импульсном реакторе ИБР-2М вращающийся вблизи активной зоны модулятор реактивности создает импульсы реактивности. В результате реактор с периодом 0,2 с на короткое время (примерно 450 мкс) становится надкритическим на мгновенных нейтронах, оставаясь глубоко подкритическим основную часть периода. Вследствие этого реактор генерирует импульсы мощности с длительностью 200 мкс на половине высоты с периодом 0,2 с. Для ИБР-2 значения этих параметров были 240 мкс и 0,208 с соответственно.

Модели реактора ИБР-2М, работающего в штатном режиме поддержания нулевого отклонения энергии импульсов мощности от заданного уровня (режим стабилизации мощности), соответствует блок-схема, показанная на рис. 1. Модель представлена в виде замкнутой системы управления с тремя каналами обратной связи, обусловленными запаздывающими нейтронами (на рис. 1 этот канал включён в блок кинетики), разогревом реактора (блок мощностной обратной связи МОС) и автоматическим регулятором (блок АР). Схема соответствует уравнениям динамики (линейным и нелинейным).

Для описания кинетики реактора ИБР-2М в качестве исходных исполь-

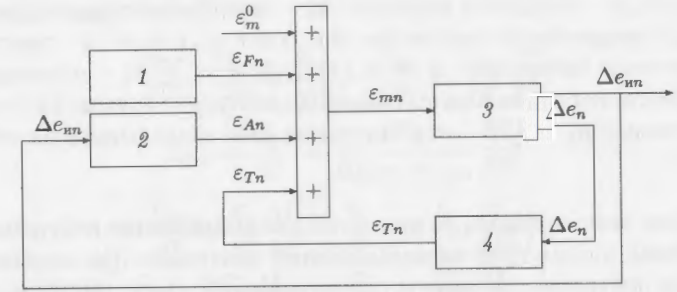


Рис. 1: Блок-схема реактора ИБР-2М. 1 – блок возмущения реактивности; 2 – блок автоматического регулятора; 3 – блок кинетики импульсного реактора; 4 – блок мощностной обратной связи; ε_m^0 – базовое значение максимальной надкритичности на мгновенных нейтронах в импульсе реактивности; ε_F , ε_A , ε_T – реактивность, обусловленная соответственно внешними факторами, мощностной обратной связью и вносимая автоматическим регулятором; $\Delta\varepsilon$, $\Delta\varepsilon_n$ – относительное отклонение энергии и энергии импульсов мощности от их среднего значения соответственно

зованы следующие уравнения одноточечной модели реактора [1–4]:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\tau} n + \sum_{i=1}^{N_i} \lambda_i C_i; \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\tau} n - \lambda_i C_i; \quad (2)$$

где n – плотность нейтронов в реакторе; ρ – реактивность; N_i – количество групп запаздывающих нейтронов; β_i , β – доли запаздывающих нейтронов группы i и суммарная соответственно; C_i , λ_i – концентрация и постоянная распада источников запаздывающих нейтронов группы i соответственно; τ – эффективное время жизни мгновенных нейтронов; t – время.

После перехода от плотности нейтронов к мощности и от интенсивности источников нейтронов к нормированной интенсивности, выраженной в единицах мощности, уравнения кинетики (1) и (2) приобретают вид

$$\frac{\tau}{\beta} \frac{dP}{dt} = \frac{\varepsilon}{\beta} P + S; \quad (3)$$

$$S = \sum_i S_i; \quad (4)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} \frac{dS_i}{dt} + S_i = \mu_i P. \quad (5)$$

Здесь $P = k_n n$ — мощность реактора (k_n — коэффициент пропорциональности между мощностью и плотностью нейтронов n); $\epsilon = \rho - \beta$ — реактивность на мгновенных нейтронах; $S_i = k_n \tau \lambda_i C_i / \beta$, $S = \sum_i S_i$ — нормированная интенсивность источников запаздывающих нейтронов группы i и суммарная соответственно; $\mu_i = \beta_i / \beta$ — относительная доля запаздывающих нейтронов группы i .

В работе использованы шесть групп запаздывающих нейтронов ($N_i = 6$). Значения параметров запаздывающих нейтронов при делении ^{239}Pu быстрыми нейтронами приняты следующими [5]: $\beta = 0,00216$; $\mu_i = 0,038$; $0,28$; $0,216$; $0,328$; $0,103$; $0,035$; $\lambda_i = 0,0129$; $0,0311$; $0,134$; $0,331$; $1,26$; $3,21$.

Ширина импульсов мощности на половине высоты на три порядка меньше периода импульсов. Поэтому импульсы мощности рассматриваются как идеальные (бесконечно узкие) импульсы с энергией E_n . Поскольку между импульсами выделяется лишь 8% от всей энергии реактора, для удобства принято, что энергия фона E_Φ выделяется не непрерывно, а в виде бесконечно узких импульсов, причем совмещенных с импульсами мощности. С учетом этих упрощений мощность реактора рассматривается как последовательность идеальных импульсов. Такое представление мощности позволяет от уравнений кинетики (3)–(5), из которых первое и третье являются дифференциальными, перейти к алгебраическим уравнениям (6), связывающим значения безразмерных переменных в дискретные моменты времени — моменты, соответствующие текущему импульсу мощности (с индексом n) и предшествующему импульсу мощности (с индексом $n-1$) [3, 4]. Параметры с нижним индексом, например n , соответствуют n -му импульсу мощности, а с верхним индексом 0 — базовым значениям параметров.

Энергия импульса мощности E_n и амплитуда импульса мощности P_m пропорциональны интенсивности запаздывающих нейтронов перед началом импульса мощности S и импульсным коэффициентом передачи M (для энергии импульса мощности) и M_P (для амплитуды импульса): $E_{nn} = M_n S_n$, $P_{mn} = M_{Pn} S_n$. Импульсные коэффициенты M и M_P , являющиеся нелинейными функциями максимального значения реактивности в импульсе ϵ_m , вычислены по уравнениям кинетики (3)–(5). Промежуточные значения этих параметров с достаточной точностью определяются путем линейной интерполяции. Режиму стабилизации, т.е. режиму с постоянной амплитудой импульсов мощности, соответствует значение реактивности в максимуме $\epsilon_m^0 = 1,02 \cdot 10^{-3}$.

Применительно к параметрам, соответствующим n -му импульсу и выраженным в относительных единицах, уравнения кинетики приведены к

следующему виду:

$$\begin{aligned} \frac{E_n}{E^0} &= \frac{E_{nn}}{E^0} + \frac{E_{\Phi n}}{E^0}; & \frac{E_{nn}}{E^0} &= \frac{E_{nn}}{E_n^0} \frac{E_n^0}{E^0}, \\ k_{\Phi n} &= \frac{E_{\Phi n}}{E^0} = \frac{\beta T_n}{\Delta k_{\text{ПО}} - \epsilon_{mn}} \frac{S^0}{E^0}; \\ \frac{E_{nn}}{E_n^0} &= \frac{S_n}{S^0} \frac{M_n}{M^0} = \frac{S_n}{S^0} \exp\left(\ln \frac{M_n}{M^0}\right); & (6) \\ \frac{P_{mn}}{P_m^0} &= \frac{S_n}{S^0} \frac{M_{Pn}}{M_P^0} = \frac{S_n}{S^0} \exp\left(\ln \frac{M_{Pn}}{M_P^0}\right); \\ \frac{E_{\Phi n}}{E^0} &= k_{\Phi n} \frac{S_n}{S^0}; & \frac{S_n}{S^0} &= \sum_i \frac{S_{in}}{S^0}; & \frac{S_{in}}{S^0} &= \left(\frac{S_{in-1}}{S^0} + \mu_i \lambda_i \frac{E^0}{S^0} \frac{E_{n-1}}{E^0}\right) e^{-\lambda_i T_n}. \end{aligned}$$

Постоянные величины S^0/E^0 и E_n^0/E^0 в (6) вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} \frac{S^0}{E^0} &= \sum_i \mu_i \lambda_i \frac{1}{e^{\lambda_i T_n} - 1}; \\ k_{\Phi}^0 &= \frac{E_{\Phi}^0}{E^0} = \frac{\beta T_n}{\Delta k_{\text{ПО}} - \epsilon_m^0} \sum_i \mu_i \lambda_i \frac{1}{e^{\lambda_i T_n} - 1}; & (7) \\ \frac{E_n^0}{E^0} &= 1 - k_{\Phi}^0. \end{aligned}$$

В уравнениях (6) и (7) E_n , E_Φ , $E = E_n + E_\Phi$ — энергия, выделяемая соответственно в импульсе мощности, в интервале между импульсами (энергия фона) и полная за период импульсов T_n ; E_{nn}/E_n^0 — отношение энергии импульса мощности к ее базовому значению E_n^0 ; P_m , P_m^0 — амплитуда импульса мощности и ее базовое значение соответственно; n — номер импульса мощности; M , M^0 — импульсный коэффициент передачи и его базовое значение соответственно; M_{Pn} , M_P^0 — коэффициент передачи амплитуды импульса мощности и его базовое значение соответственно; k_{Φ}^0 — доля энергии фона за период от полной энергии за этот же период; S_i , $S = \sum_i S_i$ — нормированная интенсивность источников запаздывающих нейтронов (выраженная в единицах мощности) группы i и суммарная соответственно; $k_{\text{ПО}}$ — эффективность подвижного отражателя; ϵ_m — максимальная реактивность (надкритичность) в импульсе.

Реактивность в модели для удобства выражена как в абсолютных единицах (ρ), так и в долях β_n ($r = \rho/\beta_n$). Бета-импульсная реактивность [6]

вычисляется по следующей формуле:

$$\beta_n = \frac{1}{d \ln \left(\frac{M}{M^0} \right) / d \varepsilon_m |_{\varepsilon_m^0}} = \frac{M^0}{dM / d \varepsilon_m |_{\varepsilon_m^0}}. \quad (8)$$

Для реактора ИБР-2М $\beta_n = 1,54 \cdot 10^{-4}$.

По аналогии с реактором ИБР-2 реактивность мощностной обратной связи (МОС) ИБР-2М, соответствующая n -му импульсу мощности, представлена суммой трех составляющих [3, 4]:

$$r_{Tn} = \sum_{j=1}^3 r_{Tjn}. \quad (9)$$

Три составляющие МОС с нелинейными коэффициентами передачи k_{TNj} соответствуют МОС и для n -го импульса описаны следующим образом:

$$r_{Tjn} = \left(r_{Tjn-1} + \Delta E_{n-1} \frac{k_{TNj}}{T_{Tj}} \right) \exp \left(-\frac{T_n}{T_{Tj}} \right), \quad (10)$$

где T_{Tj} — постоянная времени j -й составляющей МОС ($j = 1, 2, 3$).

Нелинейный коэффициент передачи для n -го импульса при $j = 1$ выражен формулой

$$k_{TNj} = k_{Tj} (1 + c_j r_{Tjn-1}), \quad (11)$$

т. е. зависит от реактивности этой составляющей r_{T1} , а при $j = 2, 3$ — от суммарной реактивности МОС r_T :

$$k_{TNj} = k_{Tj} (1 + c_j r_{Tn-1}), \quad (12)$$

где c_j — параметр нелинейности МОС.

Структура и параметры блока МОС оценены путём математической обработки зарегистрированных переходных процессов энергии импульсов мощности, вызванных прямоугольными колебаниями реактивности при разных уровнях средней мощности ИБР-2М (0,5; 1; 1,5 и 2 МВт). Линейные уравнения связывают дискретные значения переменных, относящиеся к соседним импульсам мощности. Этим уравнениям в модели соответствуют дискретные передаточные функции $W_{si}(z)$, $W_{Tj}(z)$, $W_A(z)$ и $W_{\sim}(z)$, которыми удобно пользоваться при исследовании импульсных систем автоматического регулирования и которые представляют собой отношения z -изображений выходных сигналов к входным. В модели предусмотрен также блок возмущающей реактивности. На его выходе можно создать различные виды возмущений реактивности, в частности возмущение, вызванное преднамеренным перемещением промежуточного регулятора (ПР),

блоков аварийной защиты (АЗ1 и АЗ2) и компенсирующих органов (КО1 и КО2). Также можно вычислять изменение реактивности, вызванное перемещением автоматического регулятора (АР) при работе реактора в режиме автоматической стабилизации мощности.

В модели учтены следующие нелинейные зависимости:

1. Зависимость импульсного коэффициента передачи энергии импульса мощности $M = E_n/S$ (отношения энергии импульса мощности к суммарному источнику нейтронов) от реактивности ИБР-2М.
2. Зависимость импульсного коэффициента передачи амплитуды импульса мощности $M_p = P_m/S$ (отношения амплитуды импульса мощности к суммарному источнику нейтронов) от реактивности ИБР-2М.
3. Зависимость реактивности стержней АЗ (АЗ1 и АЗ2), КО (КО1 и КО2), ПР и АР от их положения в активной зоне.
4. Зависимость коэффициентов передачи МОС от ее реактивности.

Модельная реализация блока автоматического регулирования мощности (АР), представленного на рис.1, в общей структуре динамики реактора исследована достаточно подробно, поскольку от системы АР во многом зависят стабильность и надежность работы реактора. Суть исследований АР состояла в выборе оптимальной статистической модели параметров АР. Регулируемым параметром реактора является относительное отклонение амплитуды импульса мощности. Оно равно относительному отклонению энергии импульса мощности $\Delta e_n = (E_n - E_n^0)/E_n^0$, где E_n и E_n^0 — энергия импульса и его базовое (среднее) значение соответственно. При анализе динамики реактора именно оно принято в качестве регулируемого параметра.

Флуктуации регулируемого параметра относительно среднего уровня в штатном режиме стабилизации обычно соответствуют диапазону $\pm 20\%$ с возможными выбросами до 40%. С учетом этого к автоматическому регулятору предъявляются особые, причем противоречивые, требования. С одной стороны, он должен обеспечивать традиционные показатели качества переходных процессов при регулярных возмущениях реактивности (малое перерегулирование и малое время регулирования при скачке реактивности). С другой стороны, АР должен удовлетворять некоему критерию качества при случайных возмущениях реактивности.

В качестве статистически оптимального принят АР, обеспечивающий в режиме стабилизации минимум вероятного среднеквадратического относительного отклонения энергии будущего (n -го) импульса мощности на основе информации, полученной из предшествующих (k -х) импульсов мощности ($k < n$). При этом информации от предшествующих импульсов

придается разный вес, и тем самым вводится принцип старения информации. Статистически оптимальному АР соответствует следующий вид алгоритма [11]:

$$r_{An} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n a_{n-k}^2} \sum_{k=1}^n a_{n-k}^2 (r_{Ak} - \Delta e_{nk}), \quad (13)$$

где r_{An} , r_{Ak} – отклонения реактивности АР от среднего (базового) уровня, относящиеся к будущему (n -му) и предшествующим (k -м) импульсам мощности соответственно (здесь реактивность для удобства выражена в долях; Δe_{nk} – относительные отклонения энергии предшествующих импульсов мощности ($k = 0$ соответствует началу отсчета – началу набора автоматическим регулятором информации); $a_{n-k}^2 \leq 1$ – параметр, зависящий от разности номеров импульсов $n - k \geq 1$, характеризует степень старения информации, полученной из предшествующих импульсов мощности).

Импульсная переходная характеристика автоматического регулятора и, следовательно, его структура определяются выбором функции a_{n-k}^2 в формуле (13) [11, 14].

В связи с этим проведен детальный анализ динамики реактора для двух наиболее естественных вариантов выбора этой функции [5].

В первом варианте параметр a_{n-k}^2 уменьшается с ростом индекса $n - k$ ($a_0^2 = 1 > a_1^2 > a_2^2 > \dots$). Это означает, что более ранней информации придается меньший вес. В результате импульсная передаточная функция АР принимает вид передаточной функции интегратора

$$W_A(z) = \frac{r_A(z)}{\delta_A(z)} = \frac{T_n}{T_A} \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}}, \quad (14)$$

где T_n – период импульсов мощности; T_A – постоянная времени экспоненциальной функции a_{n-k}^2 .

Автоматический регулятор ИБР-2М представляет собой именно такой интегратор. Значение T_A может устанавливаться различным, для чего используется соотношение $T_A = 10\Delta$, где Δ – варьируемый параметр. В настоящее время принято $\Delta = 0,2$. Этому значению Δ соответствует постоянная времени $T_A = 2$ с, и коэффициент передачи АР в формуле (14) равен $T_n/T_A = 0,1$. Варьируемый параметр Δ – параметр скорости АР: чем он больше, тем меньше скорость АР при одном и том же сигнале на его входе. С целью еще большего ослабления влияния шумов на работу АР ИБР-2М введен дополнительный фильтр. Регулируемый параметр $\Delta e_{ин}$ пропускается через этот фильтр и превращается в сглаженный сигнал $\Delta \tilde{e}_{ин}$. В итоге на вход АР подается не сигнал $\delta_{An} = -\Delta e_{ин}$, а сглаженный сигнал $\delta_{An} = -\Delta \tilde{e}_{ин}$ (рис. 2).

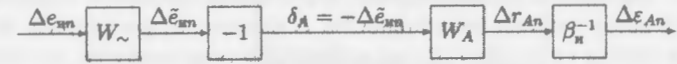


Рис. 2: Блок-схема АР импульсного реактора ИБР-2М. W_A , $W_~$ – импульсные передаточные функции АР и фильтра соответственно

Алгоритм сглаживания фильтра удовлетворяет статистически оптимальному критерию, аналогичному критерию оптимальности АР [12], и выражается формулой

$$\Delta \tilde{e}_{ин} = \Delta \tilde{e}_{ин-1} + \frac{1}{q} (\Delta e_{ин} - \Delta \tilde{e}_{ин-1}), \quad (15)$$

где $q > 1$ – коэффициент сглаживания (при $q = 1$ $\Delta \tilde{e}_{ин} = \Delta e_{ин}$, т.е. фильтр не работает и сглаживания регулируемого параметра не проводится).

Фильтру с алгоритмом (15) соответствует импульсная передаточная функция

$$W_~(z) = \frac{\Delta \tilde{e}_n}{\Delta e_n} = \frac{\frac{1}{q-1}}{\frac{q}{q-1} - z^{-1}}. \quad (16)$$

Во втором варианте учитывается только информация, полученная из N предшествующих импульсов мощности, и ей придается наибольший вес. Этому случаю соответствует статистически оптимальный алгоритм АР

$$r_{An} = \frac{\sum_{k=1}^N (r_{An-k} - \Delta e_{ин-k})}{N}. \quad (17)$$

Таким образом, выходной сигнал АР представляет собой среднеарифметическое значение N предшествующих входных сигналов. Из формулы (17) следует, что импульсная передаточная функция АР равна

$$W_A(z) = \frac{r_A(z)}{\delta_A(z)} = \frac{z^{-1}}{N} \frac{z^{-N}}{1 - z^{-1}}. \quad (18)$$

Второму варианту соответствует структурная схема автоматического регулирования реактора ИБР-2М, показанная на рис. 2, но при $W_~ = 1$, т.е. схема без фильтра. Моделирование процессов проведено в соответствии с этой структурной схемой. Поскольку динамика реактора существенно зависит от параметров обратной связи, обусловленной разогревом реактора, то значения этих параметров были оценены до моделирования. Оценка осуществлена посредством математической обработки зарегистрированных переходных процессов мощности, обусловленных преднамеренными прямоугольными колебаниями реактивности, в режиме саморегулирования [4].

Для обоих вариантов АР вычислены переходные процессы мощности при различных возмущениях реактивности. А именно: а) регулярное возмущение в виде скачка $r_F = -0,1$; б) реальный шум реактивности, вычисленный реактиметром [2] по зарегистрированному шуму мощности при работе реактора в режиме саморегулирования при номинальной средней мощности 2 МВт; в) случайное возмущение в виде белого шума с дисперсией $\sigma_F^2 = 0,05^2$.

Приведенные ниже рисунки иллюстрируют результаты расчетов для номинальных значений средней мощности 2 МВт и расхода теплоносителя (натрия) $100 \text{ м}^3/\text{ч}$.

На рис. 3 для первого варианта АР показаны переходные процессы, вызванные скачком реактивности при разных значениях коэффициента сглаживания фильтра $q = 1, 8$ и 32 и параметра скорости АР $\Delta = 0,2$. Там же для сравнения показаны аналогичные переходные процессы для режима саморегулирования, т.е. без АР.

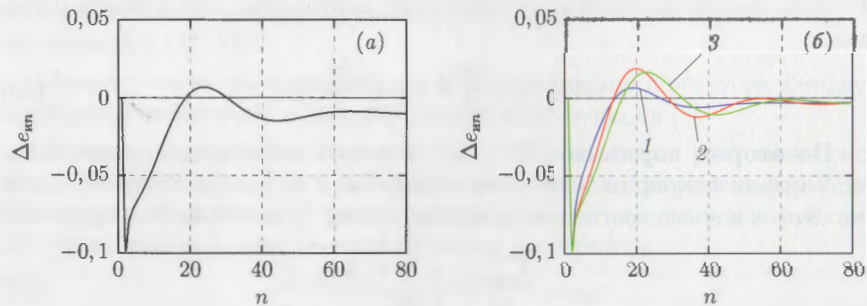


Рис. 3: Относительное отклонение энергии импульсов мощности $\Delta e_{ин}$ при скачке реактивности (в долях $\beta_{н}$) $r_F = -0,1$ для первого варианта АР. а) АР отключен (режим саморегулирования); б) АР включен, параметр фильтра $q = 1$ (1); 8 (2); 32 (3) при $\Delta = 0,2$; n – номер импульса мощности

На рис. 4 показаны аналогичные процессы для второго варианта АР в зависимости от числа N предыдущих импульсов мощности, по которым путем усреднения входных сигналов АР формируется его выходной сигнал.

На рис. 5 показано среднеквадратическое отклонение энергии импульсов мощности σ , обусловленное шумом реактивности, при разных значениях коэффициента сглаживания фильтра q , параметра скорости АР Δ (первый вариант АР) и параметра N (второй вариант АР). На рис. 5 показаны кривые, рассчитанные для реального шума реактивности. Кривые, рассчитанные для возмущения реактивности в виде белого шума, не отличаются существенно от кривых, показанных на рис. 5.

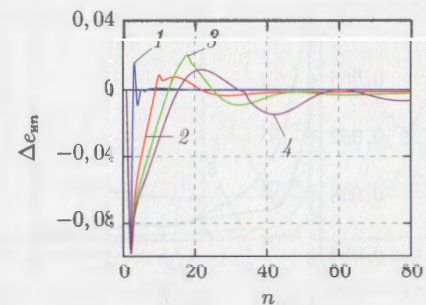


Рис. 4: Относительное отклонение энергии импульсов мощности $\Delta e_{ин}$ при скачке реактивности (в долях $\beta_{н}$) $r_F = -0,1$; для второго варианта АР. 1 – параметр АР $N = 1$; 2 – $N = 8$; 3 – $N = 16$; и 4 – $N = 32$; n – номер импульса мощности

Чтобы убедиться, что в модели динамики ИБР-2М как в физическом представлении реактора, так и в ее программной реализации не допущены ошибки, с помощью этой модели были смоделированы переходные процессы реактора ИБР-2. Значения параметров модели были приняты равными значениям параметров модели ИБР-2, включая и параметры МОС. Смоделированные при таких значениях параметров переходные процессы мощности полностью совпали с аналогичными процессами, ранее полученными с помощью модели ИБР-2. Также были смоделированы переходные процессы в реакторе ИБР-2М, обусловленные перемещением промежуточного регулятора. Переходные процессы, вызванные этими перемещениями ПР (при наличии существенных шумов), были зарегистрированы ранее. По этим процессам были оценены параметры двух каналов МОС ИБР-2М и рассчитаны переходные процессы, обусловленные перемещением ПР [10]. Полученные с помощью модели ИБР-2М переходные процессы совпали с расчетными.

Приведены результаты моделирования переходных процессов при сбросе АЗ, когда амплитуда импульса мощности уменьшается более чем на четыре порядка за время не более 10 с. Смоделированы процессы аварийного сброса мощности при разных уровнях средней мощности реактора перед сбросом (от 0,2 до 2 МВт). Смоделированные переходные процессы практически совпадают с зарегистрированными (рис. 6).

Создание математической модели реактиметра ИБР-2М стало логическим продолжением работ, посвященных созданию модели для анализа динамики импульсного реактора [13–14].

В ИБР-2М регистрируется амплитуда каждого n -го импульса мощности P_{mn} . Входной величиной импульсного реактиметра является относительная

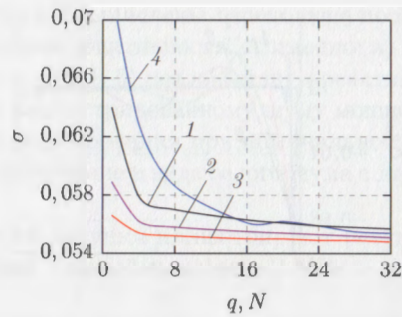


Рис. 5: Среднеквадратическое отклонение энергии импульсов мощности σ как функция параметра фильтра q и параметра AP N . 1 - $\Delta = 0,05$; 2 - $\Delta = 0,1$; 3 - $\Delta = 0,2$ (первый вариант AP) и 4 - второй вариант AP

амплитуда импульса мощности P_{mn}/P_m^0 , где P_m^0 - базовая (заданная) амплитуда импульса мощности. Выходной величиной является рассчитанное по обратным уравнениям кинетики максимальное значение реактивности в импульсе реактивности импульсного реактора ИБР-2М.

Импульсному реактору присущи значительные шумы реактивности, вследствие чего наблюдается большой разброс амплитуд и, следовательно, энергии импульсов мощности (до $\pm 20\%$). Вычисленную реактивностью ИБР-2М можно использовать напрямую для анализа его статистического состояния (путем спектрального анализа, корреляционного и др.). Регулярная составляющая реактивности, обусловленная как медленным «уходом» реактивности вследствие изменения параметров, так и преднамеренным изменением реактивности органами управления для периодической оценки их параметров, фактически «тонет» в шумах. Таким образом, для оценки регулярной составляющей вычисленная реактивность не может быть использована напрямую: шумы реактивности необходимо отфильтровать.

В предлагаемом импульсном реактиметре использован принципиально иной метод фильтрации. В нем как постановка задачи, так и способ ее решения носят прикладной инженерный характер с ясным физическим смыслом, а не формально математический. Метод основан на принципе статистически оптимального алгоритма, впервые предложенного применительно к регулированию мощности импульсного реактора [11]. Этот принцип оказался универсальным и позднее был распространен на возможные иные режимы работы реактора, а затем применен непосредственно к задаче собственно фильтрации [8, 11-16].

Рассмотрены два варианта расположения статистически оптимального

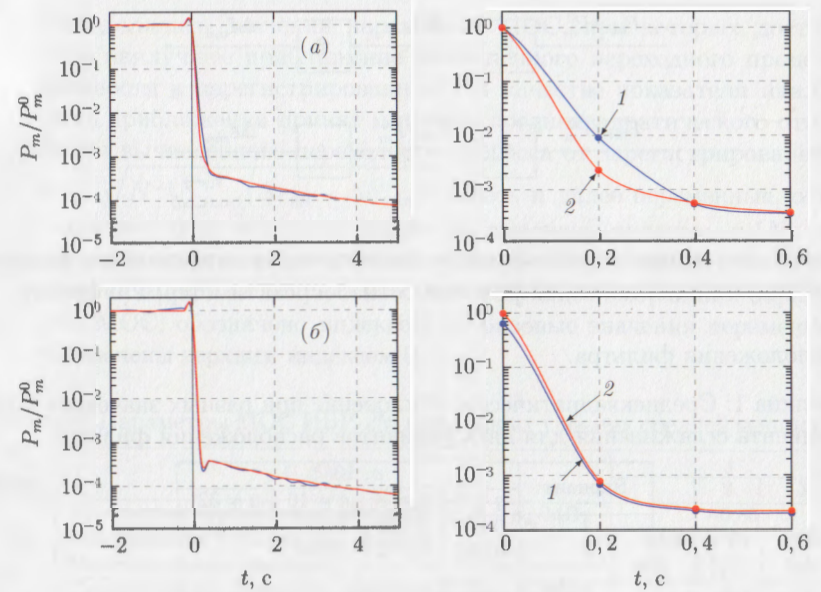


Рис. 6: Переходные процессы амплитуды импульсов мощности, вызванные сбросом АЗ и одновременным аварийным перемещением КО и ПР при средней мощности реактора 1 (а) и 2 МВт (б). P_m - амплитуда импульса мощности (1 - модель, 2 - эксперимент); t - время

фильтра относительно реактиметра. В первом варианте по относительной амплитуде импульса мощности, характеризующейся шумами, вычисляется соответствующая реактивность (тоже с шумами), которая сглаживается фильтром (рис. 7, а). Во втором варианте фильтром сглаживается относительная амплитуда импульсов мощности (рис. 7, б) и по ней вычисляется соответствующая реактивность. Лучшие результаты соответствуют первому варианту. Такая оценка основана на анализе зарегистрированного переходного процесса амплитуды импульсов мощности, обусловленного преднамеренным изменением реактивности посредством перемещения штатного органа управления (промежуточного регулятора). Реактивность изменялась промежуточным регулятором линейно. Реактор работал в режиме саморегулирования. Вычисленная в первом варианте реактивность при наличии шумов сравнивалась со сглаженной, соответствующей как первому, так и второму варианту. В табл. 1 приведены среднеквадратическое отклонение при разных значениях коэффициента сглаживания q , вычисленные за время перемещения промежуточного регулятора, для двух вариантов

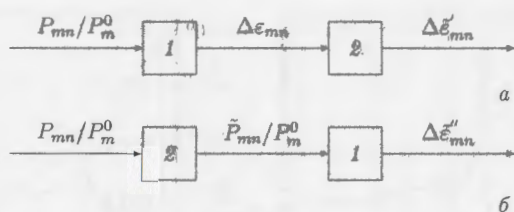


Рис. 7: Два варианта расположения статистически оптимального фильтра для получения сглаженной реактивности. 1 – реактиметер; 2 – фильтр

расположения фильтра.

Таблица 1: Среднеквадратическое отклонение при разных значениях коэффициента сглаживания для двух вариантов расположения фильтра

Вариант	$\sigma, 10^{-5}$			
	$q = 4$	$q = 8$	$q = 16$	$q = 32$
1	0,628	0,718	0,777	0,824
2	0,642	0,770	0,988	1,5

В третьей главе приведены результаты исследования динамики импульсного реактора ИБР-2М на начальном этапе его эксплуатации. Описаны эксперименты для оценки параметров мощностной обратной связи (МОС) и методы обработки экспериментальных данных. Исходя из характера переходных процессов выбрана структура МОС, получена оценка значений параметров МОС и степени устойчивости реактора в режимах саморегулирования и автоматического регулирования. Вычислены запасы устойчивости по амплитуде и фазе. Дан сравнительный анализ динамики импульсных реакторов ИБР-2 и ИБР-2М при одинаковой энерговыработке.

Для определения параметров МОС создана специальная программа поиска минимума. Обработка данных проводилась в следующем порядке:

1. От зарегистрированного переходного процесса (в виде последовательности периодов колебаний), обусловленного прямоугольными колебаниями и шумом реактивности, делался переход к процессу Δe_{in} с усредненным периодом и уменьшенным шумом.
2. Задавались начальные значения параметров МОС, которые варьировались программой поиска минимума. Для каждого набора параметров вычислялся переходный процесс Δe_{iAn} . Вычисления проводились по уравнениям кинетики и МОС, представленным в виде разностных уравнений, связывающих значения переменных, соответствующих текущему (с индексом n) и предшествующему (с индексом $n - 1$) импульсу мощности.

3. Определялись значения параметров МОС, при которых достигалось наилучшее приближение вычисленного переходного процесса мощности к зарегистрированному. В качестве показателя наилучшего приближения принят минимум среднеквадратического отклонения вычисленного переходного процесса от зарегистрированного $\sigma = \sqrt{N^{-1} \sum_{n=1}^N (\Delta e_{in} - \Delta e_{iAn})^2}$. Здесь и далее переменные, относящиеся к n -му импульсу мощности, помечены индексом n (N – количество импульсов в периоде колебаний). Вычисленное отклонение энергии импульса мощности, соответствующее выбранным параметрам МОС, обозначено индексом A . Базовые значения переменных обозначены верхним индексом 0.

Таблица 2: Параметры МОС ИБР-2М при разных уровнях средней мощности

$P^0, \text{МВт}$	Параметр	j		
		1	2	3
0,5	Суммарный коэффициент передачи $\sum_j k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-6,85		
	Коэффициент передачи $k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-6,99	1,75	-1,61
	Постоянная времени $T_{Tj}, \text{с}$	6,0	0,22	0,41
1,0	Суммарный коэффициент передачи $\sum_j k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-5,54		
	Коэффициент передачи $k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-5,61	1,16	-1,09
	Постоянная времени $T_{Tj}, \text{с}$	6,9	0,40	0,37
1,5	Суммарный коэффициент передачи $\sum_j k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-5,52		
	Коэффициент передачи $k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-5,87	1,31	-0,96
	Постоянная времени $T_{Tj}, \text{с}$	8,2	1,33	1,13
2,0	Суммарный коэффициент передачи $\sum_j k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-5,14		
	Коэффициент передачи $k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-5,91	1,59	-0,82
	Постоянная времени $T_{Tj}, \text{с}$	7,6	1,02	0,46

Для всего охваченного экспериментом диапазона значений средней мощности P^0 (от 0,5 до 2 МВт) хорошее приближение вычисленных переходных процессов к зарегистрированным переходным процессам получено при представлении математической модели МОС в виде параллельного соединения трех линейных аperiodических звеньев со значениями коэффициента передачи k_{Tj} и постоянной времени T_{Tj} . При мощности меньше номинальной (от 0,5 до 1,5 МВт) две наиболее быстрые составляющие МОС практически компенсируют друг друга и МОС упрощенно может быть представлена одним аperiodическим звеном. Оценка параметров математической модели МОС ИБР-2М в виде трех аperiodических звеньев приведена в табл. 2.

На рис. 8 представлены зарегистрированные и вычисленные переходные процессы, соответствующие выбранным параметрам МОС в трехкомпонентной модели при уровнях средней мощности 0,5 и 2 МВт.

Модель реактора получена на основании наилучшего приближения смоделированных переходных процессов к зарегистрированным при существо-

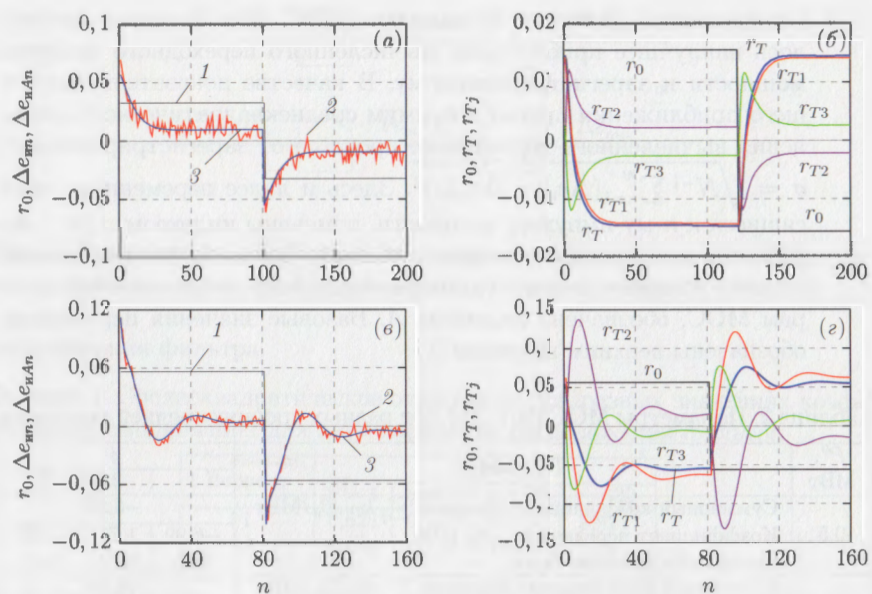


Рис. 8: Переходные процессы, вызванные прямоугольными колебаниями задающей реактивности при разных уровнях средней мощности реактора: а, б) $P^0 = 0,5$ МВт; в, г) $P^0 = 2,0$ МВт; а, в) задающая реактивность r_0 (1); относительное отклонение зарегистрированной энергии импульсов $\Delta\epsilon_{нА}$ (2) и вычисленной $\Delta\epsilon_{нА}$ (3); б, г) вычисленная суммарная реактивность МОС r_T и её составляющие r_{T1} , r_{T2} и r_{T3}

ных изменениях мощности. Для моделирования переходных процессов в нештатных режимах целесообразно использовать именно ее. Линейная модель предназначена, в первую очередь, для оценки устойчивости реактора. Реактор ненулевой мощности должен удовлетворять важнейшему требованию – устойчивости в режиме саморегулирования. Для оценки устойчивости реактора удобно воспользоваться критерием устойчивости Найквиста. Для этого следует представить реактор в виде одноконтурной замкнутой системы с отрицательной обратной связью и судить об устойчивости замкнутой системы по частотным характеристикам разомкнутой системы.

Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) разомкнутой системы не охватывает точку на комплексной плоскости с координатами $(-1, j0)$. Устойчивость характеризуют запасом по амплитуде ($a = 1/|0A$) и по фазе (φ). Запас по амплитуде показывает, в сколько раз надо увеличить коэффициент передачи разомкнутой части системы, чтобы вывести замкну-

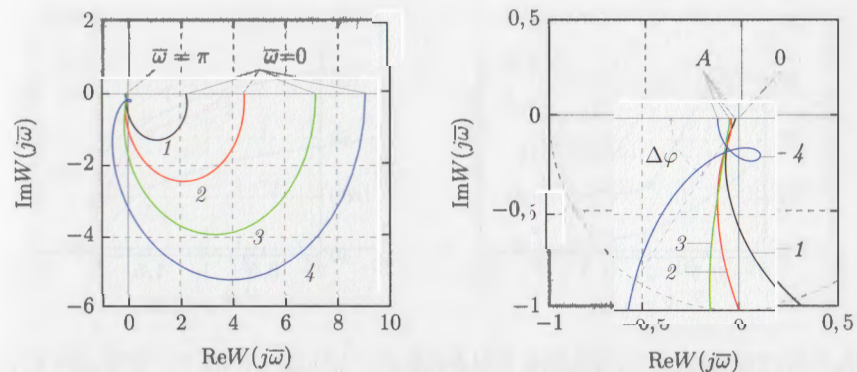


Рис. 9: Амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы при представлении реактора без автоматического регулятора в виде одноконтурной замкнутой системы при средней мощности реактора 0,5 МВт (1); 1 МВт (2); 1,5 МВт (3) и 2 МВт (4)

той систему на границу устойчивости. Т.е. чтобы в замкнутой системе возникли незатухающие колебания. Запас по фазе характеризуют допустимое увеличение задержки сигнала по времени. Следовательно, реактор ИБР-2М в режиме саморегулирования устойчив. Его запасы устойчивости при указанных параметрах МС вполне достаточные (рис. 9 справа).

Запасы устойчивости по амплитуде и фазе уменьшаются при увеличении средней мощности реактора ИБР-2М в режиме саморегулирования. Зависимости запасов устойчивости по амплитуде и фазе от средней мощности реактора ИБР-2М показаны на рис. 10.

На рис. 11 приведены АФЧХ разомкнутой системы динамики, которые используются для суждения об устойчивости замкнутой системы «регулятор–реактор» по критерию устойчивости Найквиста. Рис. 11, а иллюстрирует влияние на АФЧХ коэффициента сглаживания фильтра и параметра скорости АР для первого варианта АР, а рис. 11, б – влияние количества усредняемых входных сигналов АР на АФЧХ.

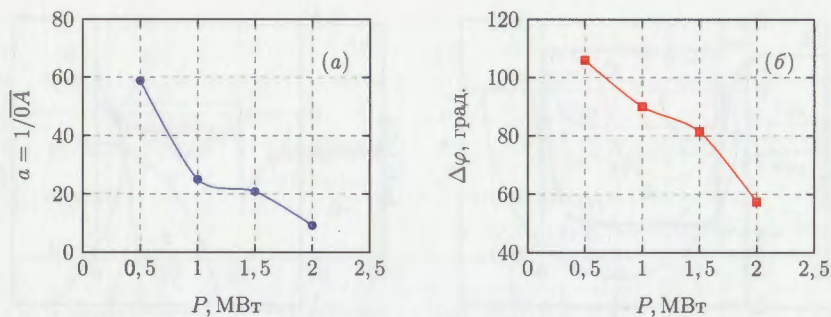


Рис. 10: Зависимости запасов устойчивости по амплитуде (а) и фазе (б) от средней мощности импульсного реактора ИБР-2М

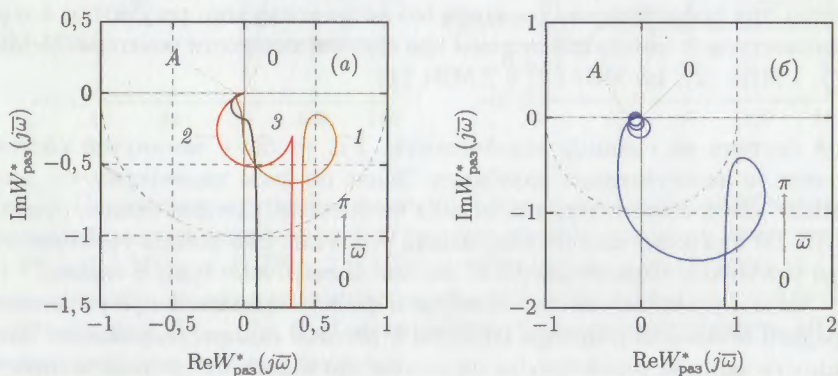


Рис. 11: Амплитудно-фазовые частотные характеристики разомкнутой системы «регулятор-реактор». а) для первого варианта АР с параметром скорости $\Delta = 0,2$ при разных значениях коэффициента сглаживания $q = 1$ (1); 8 (2) и 32 (3); б) для второго варианта АР при $N = 8$

По АФЧХ, соответствующим тому или иному значению варьируемых параметров q (коэффициента сглаживания) и Δ (параметра скорости АР) для первого варианта или N (числа предыдущих входных сигналов) для второго, определены запасы устойчивости по амплитуде $a = 1/0A$ и фазе $\Delta\varphi$, равной наименьшему углу поворота вектора АФЧХ единичной длины до отрицательной действительной полуоси (см. рис. 11).

На рис. 12 показаны зависимости запасов по амплитуде и фазе от варьируемых параметров q и Δ для первого варианта АР и от N для второго.

Исследованы сравнительные характеристики динамических свойств реакторов ИБР-2 и ИБР-2М. Из-за отличий активных зон ИБР-2 и ИБР-2М

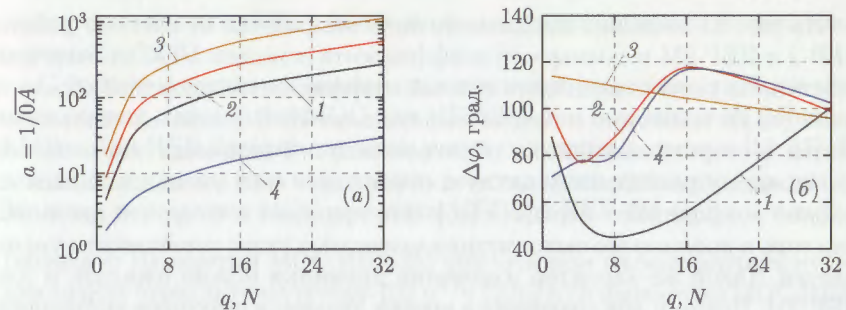


Рис. 12: Запас по амплитуде (а) и фазе (б): для первого варианта АР 1 - $\Delta = 0,05$, 2 - $\Delta = 0,1$ и 3 - $\Delta = 0,2$; для второго варианта АР - 4

по геометрии и структуре топлива термомеханические процессы в реакторах, вызываемые изменениями мощности, различаются. В связи с этим различаются структура и значения параметров МОС и, как следствие, динамика реакторов. Опыт эксплуатации ИБР-2 показал, что мощностная обратная связь и динамика реактора существенно зависят от энерговыработки, т.е. выгорания топлива, поэтому сравниваются состояния реакторов ИБР-2 и ИБР-2М, соответствующие начальному периоду эксплуатации, когда влиянием выгорания на динамику можно пренебречь. Это так называемые базовые исходные состояния. Для этих базовых состояний в работе рассматриваются отличия в динамике ИБР-2 и ИБР-2М и их влияние на колебательную устойчивость ИБР-2М и его безопасность.

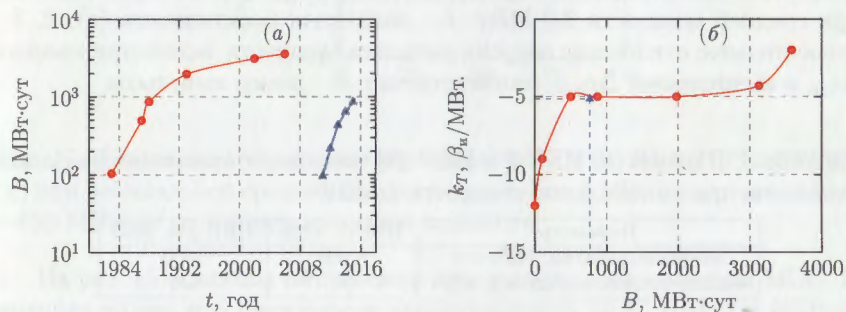


Рис. 13: Энерговыработка импульсных реакторов ИБР-2 (●) и ИБР-2М (▲) в зависимости от времени работы реактора (а) и суммарный коэффициент мощностной обратной связи ИБР-2 (k_T) в зависимости от энерговыработки для ИБР-2 и при энерговыработке ~ 850 МВт-сут для ИБР-2М (б)

На рис. 13 показаны зависимости энерговыработки от времени работы ИБР-2 и ИБР-2М и суммарного коэффициента передачи МОС от энерговыработки. Из рисунка видно, что полный коэффициент мощностной обратной связи (k_T) в некоторые моменты эксплуатации ИБР-2 довольно сильно меняется в сторону ослабления обратной связи. Фактически это означает, что каждому реакторному циклу соответствует свой уменьшающийся по модулю коэффициент передачи [15]. Это приводит к тому, что динамика реактора в процессе его эксплуатации меняется, а запас устойчивости уменьшается. Такой же характер изменения динамики можно ожидать и для ИБР-2М. Поэтому для сравнения и оценки динамики реакторов выбирались их состояния с близкими и небольшими значениями энерговыработки: на уровне $\sim 850-900$ МВт·сут.

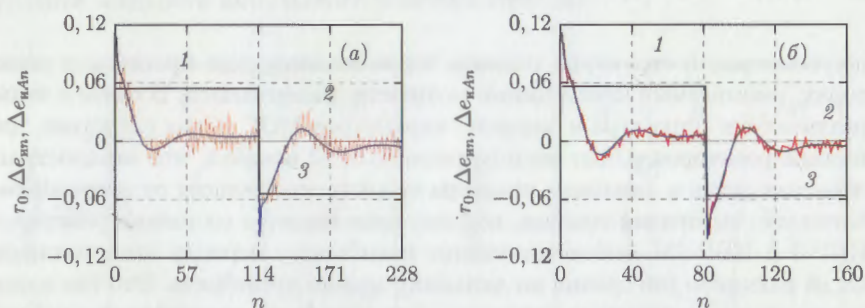


Рис. 14: Переходные процессы изменения энергии импульсов реакторов ИБР-2 (а) и ИБР-2М (б) при прямоугольных колебаниях задающей реактивности при средней мощности 2,0 МВт: 1 – задающая реактивность (r); 2, 3 – относительное отклонение энергии импульса мощности зарегистрированное $\Delta\epsilon_{ин}$ и вычисленное $\Delta\epsilon_{инAn}$ соответственно; n – номер импульсов

Таблица 3: Параметры ИБР-2 и ИБР-2М на момент сравнения динамики реакторов при номинальной мощности 2 МВт

Параметр	ИБР-2, 1988	ИБР-2М, 2015
Энерговыработка, МВт·сут	~ 900	~ 850
Расход теплоносителя АЗ, м ³ /ч	90	100

При сравнении динамических свойств ИБР-2 и ИБР-2М были получены оценки параметров МОС для разных уровней средней мощности, в том числе для номинальной мощности 2 МВт [12, 14–16]. Нужно также отметить, что на динамику реактора влияет расход теплоносителя через АЗ [17]. Поэтому при сравнении динамического состояния реакторов расход натрия через АЗ

соответствовал значениям, принятым для эксплуатационного номинального режима (табл. 3).

С помощью методики ввода осциллирующей реактивности были получены оценки параметров МОС для ИБР-2М при номинальной мощности 2 МВт. Для ИБР-2 использовались ранее полученные данные [12–17]. Переходные процессы при осцилляции реактивности приведены на рис. 14. Значения параметров МОС реакторов ИБР-2 и ИБР-2М сведены в табл. 4.

Таблица 4: Параметры МОС ИБР-2М при штатном расходе натриевого теплоносителя через активную зону 100 м³/ч (2015 г.) и параметры МОС ИБР-2 при штатном расходе теплоносителя 90 м³/ч (1988 г.) при номинальной средней мощности 2 МВт и энерговыработке ~ 850 МВт·сут

Параметр	ИБР-2М			ИБР-2		
	Номер компонентов МОС, j					
	1	2	3	1	2	3
Коэффициент передачи $k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-5,91	1,59	-0,82	-6,98	2,16	-0,43
Постоянная времени $T_{Tj}, \text{с}$	7,60	1,02	0,46	9,00	3,00	0,24
Коэффициент нелинейности c_j, β_n^{-1}	0	0	0	-0,50	0,60	-2,20
Суммарный коэффициент передачи $\sum_j k_{Tj}, \beta_n/\text{МВт}$	-5,14			-5,25		

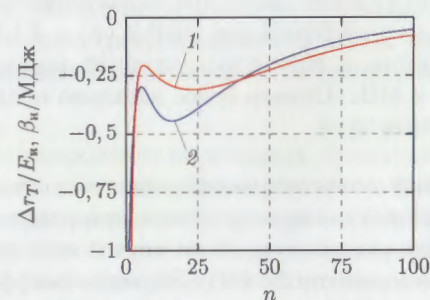


Рис. 15: Импульсные переходные характеристики МОС ИБР-2 (1) и ИБР-2М (2) при номинальной средней мощности реакторов 2 МВт и энерговыработке ~ 850 МВт·сут; n – номер импульса мощности

На рис. 15 показаны импульсные переходные характеристики МОС. Из рисунка видно, что импульсные характеристики МОС ИБР-2 и ИБР-2М различаются, что свидетельствует и о различии в параметрах динамики. Первое указание на различие динамики реакторов было получено при сравнении реакций реакторов на симметричные возмущения реактивности в большую и меньшую стороны относительно равновесного критического состояния. В ИБР-2М симметричные колебания реактивности вызывают

симметричные колебания мощности. Напротив, в ИБР-2 симметричные колебания реактивности вызывали несимметричные колебания мощности. Таким образом, мощностная обратная связь в ИБР-2 – нелинейная, а в ИБР-2М может быть описана линейными уравнениями. Для ИБР-2 и ИБР-2М, импульсные переходные характеристики МОС которых показаны на рис. 15, приведен анализ устойчивости реакторов.

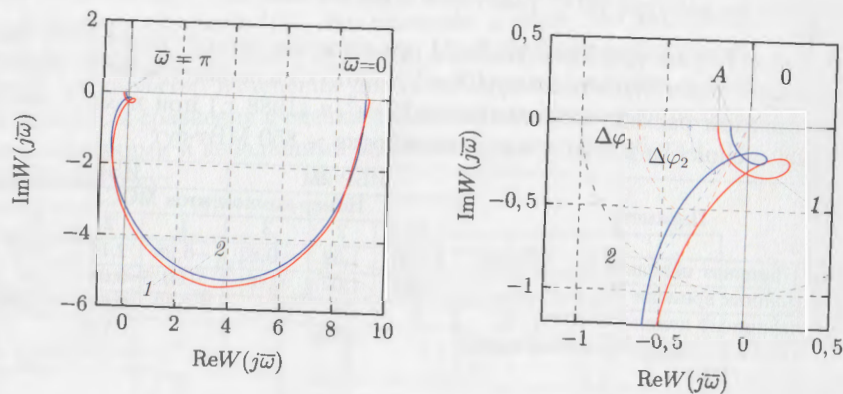


Рис. 16: Амплитудно-фазовые частотные характеристики разомкнутой системы при представлении реакторов ИБР-2 (1) и ИБР-2М (2) без автоматического регулятора в виде одноконтурной замкнутой системы при средней мощности 2 МВт. Справа более детально представлены участки характеристики вблизи нуля

На рис. 16 показаны амплитудно-фазовые частотные характеристики разомкнутой части системы при представлении реактора в режиме саморегулирования в виде одноконтурной замкнутой системы с отрицательной обратной связью при мощности 2,0 МВт. Значения коэффициентов передачи и постоянных времени МОС взяты из табл. 4. АФЧХ разомкнутой системы не охватывают точку на комплексной плоскости с координатами $(-1, j0)$ [2]. Следовательно, реакторы ИБР-2 и ИБР-2М в режиме саморегулирования устойчивы. Их запасы устойчивости при указанных параметрах МОС достаточные для безопасной работы (рис. 16, б). Реактор ИБР-2М более устойчив по сравнению с ИБР-2 в штатном режиме работы: запас по амплитуде (т.е. по коэффициенту усиления «реактивность–мощность» реактора) у ИБР-2М по сравнению с ИБР-2 выше практически в два раза.

В **заклучении** приведены основные результаты исследования динамики в начале эксплуатации реактора ИБР-2М.

Цель работы – моделирование и экспериментальное исследование динамики импульсного реактора ИБР-2М периодического действия (модернизированного реактора ИБР-2) в начале эксплуатации (до энерговыработки 1000 МВт сут) – достигнута.

Основные результаты работы сводятся к следующему.

1. Создана дискретная модель импульсного реактора ИБР-2М и осуществлена ее программная реализация с помощью МАТЛАБ для исследования переходных процессов. Линейные элементы модели описаны дискретными функциями, полученными в результате использования z -преобразования. Учтены нелинейные зависимости в блоках кинетики и мощностной обратной связи.
2. Проведены тестовые проверки модели применительно к известным переходным процессам в реакторе ИБР-2 и к рассчитанным процессам в реакторе ИБР-2М, показавшие правильность модели. Приемлемость модели подтверждена путем сравнения смоделированных процессов и зарегистрированных при сбросе аварийной защиты, когда регулируемый параметр (относительная амплитуда импульса мощности) уменьшается более чем на четыре порядка. Моделирование проведено при разных уровнях средней мощности (от 0,2 до 2 МВт). Получено хорошее приближение смоделированных процессов к зарегистрированным.
3. Проведено моделирование переходных процессов мощности реактора. Дана оценка влияния параметров автоматического регулятора на переходные процессы при регулярном возмущении реактивности, при случайном возмущении реактивности с нормальным законом распределения, а также при реактивности с реальным шумом. В связи с существенным разбросом амплитуд импульсов мощности рассмотрены два варианта автоматического регулятора, удовлетворяющие критерию минимума среднеквадратического отклонения амплитуды будущего импульса мощности на основании информации, полученной в уже прошедших импульсах. Отличие вариантов в выборе характера учета информации состоит в следующем. Первый вариант характеризуется плавным старением информации: более ранней информации придается меньший вес. Второй вариант характеризуется скачкообразным видом старения информации: информация, полученной из фиксированного количества последних импульсов, придается наибольший вес, а более ранней – нулевой (т.е. более ранняя информация не учитывается вообще).

4. Создана модель реактиметра реактора ИБР-2М, использующая разностные уравнения кинетики импульсного реактора периодического действия типа ИБР-2. Разностные уравнения соответствуют традиционным уравнениям кинетики и связывают параметры импульсного реактора, соответствующие текущему и предшествующему импульсам мощности. В модели учтены нелинейные зависимости энергии импульса мощности и его амплитуды от реактивности.
5. На основе анализа переходных процессов мощности, обусловленных прямоугольными колебаниями реактивности при работе импульсного реактора ИБР-2М в режиме саморегулирования, оценены значения параметров математической модели МОС.
6. Оценены запасы устойчивости по амплитуде и фазе при разных значениях средней мощности реактора ИБР-2М в режиме саморегулирования, а также в режиме автоматического регулирования реактора.
7. На основе анализа вычисленных импульсных переходных характеристик и параметров МОС реакторов ИБР-2 и ИБР-2М показано, что оба реактора устойчивы в штатном режиме работы. Запас по амплитуде (т.е. по коэффициенту усиления «реактивность-мощность» реактора) у ИБР-2М по сравнению с ИБР-2 выше практически в два раза. Запасы по фазе (т.е. по фазовому сдвигу между мощностью и возмущающей реактивностью) у реакторов ИБР-2 и ИБР-2М существенно не отличаются, и они достаточно большие.

Литература

- [1] Бондарченко Е.А., Пепельшев Ю.Н., Попов А.К. Экспериментальное и модельное исследование особенностей динамики импульсного реактора периодического действия ИБР-2 // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2004. Т. 35, вып. 4. С. 928–983.
- [2] Попов А.К. Основы управления ядерным реактором: Учебное пособие. М.: МГУ, 2012. 208 с.
- [3] Popov A.K., Pepelyshev Yu.N., Bondarchenko E.A. The Model of IBR-2 Pulsed Reactor of Periodic Operation for Investigations of Transitional Processes // Annals of Nuclear Energy. 2000. V. 27. P. 563–574.
- [4] Popov A.K., Pepelyshev Yu.N., Bondarchenko E.A. The Model of the IBR-2 Pulsed Reactor Dynamics and Investigations of Pulse Energy Stabilization // Nuclear Technology. 2002. V. 139, No. 1. P. 21–29.

- [5] Кипин Дж. Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1967.
- [6] Бондаренко И.И., Стависский Ю.Я. Импульсный режим работы быстрого реактора // Атомная энергия. 1959. Т. 7, вып. 5. С. 417–420.
- [7] Попов А.К. О статистически оптимальном регулировании энергии импульсов быстрого реактора // Атомная энергия. 1971. Т. 31, вып. 3. С. 269.
- [8] Marachev A.A., Pepelyshev Y.N., Popov A.K. Statistically Optimal Filter for IBR-2 Mean Power Estimation // Annals of Nuclear Energy. 2008. V. 35. P. 1779–1784.
- [9] Пепельшев Ю.Н., Попов А.К. Оценка параметров мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2М по переходным процессам. Препринт ОИЯИ Р13-2013-9. Дубна, 2013.
- [10] Popov A.K., Marachev A.A. On Statistically Optimal Algorithms of Regulation of a Pulsed Reactor. Nuclear Waste Research: Siting, Technology and Treatment. 2008. P. 107–141.
- [11] Попов А.К., Марачев А.А. О статистически оптимальных алгоритмах регулирования для различных режимов работы импульсного реактора. Сообщение ОИЯИ Р13-2002-277. Дубна, 2002.
- [12] Пепельшев Ю.Н., Попов А.К. Оценка параметров мощностной обратной связи и устойчивости ИБР-2 при различных уровнях средней мощности // Атомная энергия. 2007. Т. 103, вып. 2.
- [13] Попов А.К. Импульсный коэффициент передачи реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р:3-95-463. Дубна, 1995.
- [14] Попов А.К. Анализ длительного колебательного переходного процесса мощности импульсного реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-97-361. Дубна, 1997.
- [15] Ли Ен Чхан, Пепельшев Ю.Н. Изменение быстрых эффектов реактивности в процессе работы реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-2008-1. Дубна, 2008.
- [16] Попов А.К. Анализ устойчивости импульсного реактора ИБР-2 при девятипараметрической модели мощностной обратной связи. Сообщение ОИЯИ Р13-96-297. Дубна, 1996.
- [17] Шабалин Е.П., Анцупов Н.П., Злоказов В.Б., Мельников В.Н., Пепельшев Ю.Н., Попов А.К., Рогов А.Д. Импульсная характеристика обратной связи в реакторе ИБР-2 // Атомная энергия. 1991. Т. 70, вып. 5. С. 326–329.

Работы автора по теме диссертации

- [1] Пепельшев Ю.Н., Попов А.К., Сумхуу Д., Сангаа Д. Модель динамики импульсного реактора ИБР-2М для анализа быстрых переходных процессов // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, № 3(194). С. 682–686.
- [2] Марачев А.А., Пепельшев Ю.Н., Попов А.К., Сумхуу Д. Реактиметр импульсного реактора периодического действия ИБР-2М // Атомная энергия. 2014. Т. 117, № 5. С. 249–254.
- [3] Pepelyshev Yu.N., Popov A.K., Sumkhuu D. Model of the IBR-2M Pulsed Reactor Dynamics for Investigating Transition Processes in a Wide Range of Power Variation // Annals of Nuclear Energy. 2015. V. 85. P. 488–493.
- [4] Пепельшев Ю.Н., Попов А.К., Сумхуу Д. Оценка параметров мощностной обратной связи реактора ИБР-2М с помощью прямоугольных колебаний реактивности // Атомная энергия. 2017. Т. 122, № 2. С. 63–67.
- [5] Марачев А.А., Пепельшев Ю.Н., Попов А.К., Сумхуу Д. Анализ динамики импульсного реактора ИБР-2М при статистически оптимальном автоматическом регуляторе // Атомная энергия. 2017. Т. 123, № 3. С. 172–176.
- [6] Pepelyshev Y.N., Popov A. K., Sumkhuu D. Stability analysis of the IBR-2M pulsed reactor in an automatic regulating regime at the different level of average power // European Physical Journals. 2018. №173, 04012.
- [7] Pepelyshev Yu.N., Popov A.K., Sangaa D., Sumkhuu D. Test of the model dynamics of the pulsed reactor IBR-2M // Proceeding of Institute of Physics and Technology, Mongolian Academy of Sciences. 2013. № 40, P. 85–91.
- [8] Pepelyshev Yu.N., Popov A.K., Sumkhuu D. Mathematical modeling of reactivity of the IBR-2M pulsed reactor // Proceedings of International Conference for Young Scientists Modern Problems of Applied Mathematics and Computer Science. 2014. P. 138–142.
- [9] Pepelyshev Yu.N., Popov A.K., Sumkhuu D. Some results of dynamics modeling of the IBR-2M pulsed reactor of periodic operation // Summary of an International Conference «Research Reactors: Safe Management and Effective Utilization» Held in Vienna, 16–20 November 2015, STI/PUB/1793; (ISBN:978-92-0-105117-2), 2017.
- [10] Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д. Сравнение мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2 и его модернизированной версии ИБР-2М. Препринт ОИЯИ Р13-2016-67. Дубна, 2016.

- [11] Pepelyshev Yu.N., Popov A.K., Sumkhuu D. Study of dynamics of the IBR-2M reactor by mathematical modeling // Mongolian Journal of Physics. December, 2016. Iss. 2. P. 522–529.
- [12] Pepelyshev Yu.N., Popov A.K., Sumkhuu D. A stability analysis of the IBR-2M pulsed reactor of periodic operation at self-regulating regime // Proceedings of International Conference on Mathematics & Computational Methods Applied to Nuclear Science & Engineering, 2017; https://www.kns.org/paper_file/paper/MC2017_2017_6/P268S06-04DavaasurenS.pdf

Благодарность

Автор выражает искреннюю благодарность своим научным руководителям к.ф.-м.н. Ю.Н. Пепельшеву и к.т.н. А.К. Попову за интересные и важные задачи, за помощь и поддержку в работе. А также руководителям темы по развитию реактора ИБР-2 главному инженеру А.В. Виноградову, д.ф.-м.н. А.В. Белушкину за постоянное внимание и поддержку. Автор признателен к.ф.-м.н. А.Д. Рогову, к.ф.-м.н. Л.А. Тайыбову, моему другу Ц. Цогтсайхану и всему коллективу группы ядерной безопасности №1 и ЛНФ ОИЯИ за творческую научную обстановку и дружескую атмосферу.

Я бесконечно благодарен моему руководителю академику Б. Чадраа и академикам Д. Сангаа, Ц. Баатару, Р. Тогоо и коллегам Института физики и технологии АНМ.

Считаю своим приятным долгом поблагодарить полномочных представителей правительства Монголии в ОИЯИ академика С. Энхбату, профессора С. Даваа, и весь коллектив национальной группы Монголии в ОИЯИ.

Автор глубоко благодарен своим родителям, родным, близким и друзьям за неоценимую поддержку и мотивацию на протяжении всего периода работы над диссертацией. Благодарю любимую жену и мать моих детей за искренность, верность, любовь, добрые слова и за то, что всегда рядом!

