

## SLAE SOLUTION IN PROGRAM PACKAGES OF THE INSTITUTE OF THEORETICAL AND MATHEMATICAL PHYSICS USING ALGEBRAIC MULTIGRID METHODS

*A. P. Karpov, Yu. G. Bartenev, V. A. Erzunov, D. A. Petrov, A. N. Stakanov, E. B. Shchanikova*

Russian Federal Nuclear Center –  
All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov

The paper describes the results of testing and comparison of several parallel preconditioning algebraic multi-grid methods and block ILU when solving the problems using LOGOS Heat module, NIMFA software package and some other methods in VNIIEF that comprise the solution of the heat transfer equation using implicit methods on regular and irregular meshes. We showed a possibility to speed up the computations of the problems when implementing selective AMG and aggregative AMG (AgAMG) of PMLP/ParSol library and BoomerAMG of hypre- library with seldom restructuring of coarse matrices when solving SLAE -flow at the sections of computations that produce complex SLAE, and that reduces considerably the costs of AMG construction. In a number of cases a faster solution of SLAE in a parallel multi-flow mode is ensured by incomplete ILU-factorization of local matrices of the problem processes which is broadened with one-sided overlapping and matching of corrections by I.E. Kaporin method. Both methods show their advantages in other cases of solutions as well. So, here there is a problem-dependent choice of the fastest method, which is solved partly either by the combination of both methods during preconditioning of each of SLAE with two-stage CPR -method, or by setting a number of parameters of preconditioning including both types of AMG- and ILU-preconditioning that are automatically selected in the course of computations aiming at time minimization of SLAE solution.

*Key words:* sparse matrices, a system of linear algebraic equations SLAE, computational systems with distributed memory and shared memory, preconditioning methods: parallel algebraic multi-grid ILU-decomposition (Schwarz), Coarse Grid Correction, CPR, adaptive preconditioning.

УДК 621.039.56; 519.65; 519.245

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДНЕКВАДРАТИЧНОЙ КУСОЧНО-ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА НЕЙТРОННОГО ШУМА В РЕАКТОРЕ ИБР-2М

*Н. В. Корепанова<sup>1,2</sup>, Н. Д. Дикусар<sup>1</sup>, Ю. Н. Пепельшев<sup>1</sup>, М. Дима<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>2</sup>Институт современной физики, Китайская академия наук, Ланьчжоу, Китай

<sup>3</sup>Национальный научно-исследовательский институт физики и ядерной технологии им. Хулубея, Магуреле, Румыния

В нормальных условиях работы реактора полный размах шумов ИБР-2М относительно среднего уровня мощности достигает  $\pm 22\%$ . Поэтому медленные изменения средней мощности, так называемые базисные компоненты мощности, обусловленные, например, перемещением органов

регулирования, фактически «тонут» в нейтронных шумах. В ряде случаев, именно базисные сигналы имеют принципиальное значение для обоснования условий безопасной работы реактора. Вопрос состоит в том, как корректно выделить эти базисные сигналы из общего хаоса последовательных значений энергии импульсов. Для обнаружения базовой линии в шумах ИБР-2М используется среднеквадратичная кусочно-полиномиальная аппроксимация шестого порядка (СКПА-6) в рамках метода базисных элементов. Оптимальные значения четырех управляющих параметров  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $M$ ,  $K$  алгоритма СКПА-6, зависят от исходных параметров шумов. Алгоритм применялся как к статическим, так и к динамическим состояниям реактора в диапазоне мощности 30 кВт – 2 МВт. Среднее время обработки одной точки на ПК x 86\_64 Intel Core i5-4570 Sandy Bridge machine, 3,20 ГГц составило приблизительно 0,05 мс, что позволяет использовать алгоритм СКПА-6 для обработки в реальном времени.

*Ключевые слова:* импульсный реактор ИБР-2М, спектр нейтронного шума, метод базисных элементов, кусочно-полиномиальное сглаживание, метод наименьших квадратов.

## Введение

Обычно шумы в физических и механических системах являются нежелательным явлением, и большинство методов обработки данных связано с подавлением шумов. Однако в ядерных реакторах и, особенно в импульсном реакторе периодического действия ИБР-2М (ОИЯИ, Дубна, Россия), шум, как флуктуация потока нейтронов [1], содержит важную информацию, которую можно извлечь и использовать для повышения надежности и безопасности работы реактора. Шумы возникают вследствие стохастического характера нейтронных процессов, а также из-за флуктуаций реактивности, вызванных работой различных технологических систем, обеспечивающих нормальное функционирование реактора, например, системы охлаждения активной зоны, или системы охлаждения ближайших к активной зоне конструкций. Поэтому, нейтронные шумы могут быть использованы для оценки как, например, кинетических параметров реактора – эффективной доли запаздывающих нейтронов, времени жизни нейтронов в активной зоне и т. д. [1], так и для диагностики состояния реактора [2 – 4]. Во всех случаях извлечение информации из нужного диапазона шумов является центральной задачей.

В ИБР-2М нейтронный шум представлен изменением энергии последовательных импульсов относительно ее среднего (базового) значения. Базовое значение энергии импульсов может меняться во время работы реактора, главным образом из-за перемещения органов регулирования (органов СУЗ), изменения скорости потока и температуры теплоносителя на входе в активную зону (жидкого натрия), и др. Задача извлечения нейтронного шума предварительно требует определения базового значения. Для обеспечения необходимой точности обработки данных ИБР-2М была использована среднеквадратичная кусочно-полиномиальная аппроксимация шестого порядка (СКПА-6) [5], основанная на методе базисных элементов (МБЭ), разработанном в Лаборатории информационных технологий ОИЯИ [6, 7].

## 1. Импульсный реактор ИБР-2М

Импульсный реактор ИБР-2М (модернизированная версия реактора ИБР-2) при средней мощности 2 МВт был запущен в Лаборатории нейтронной физики им. Франка И. М. в 2011 г. Реактор генерирует короткие импульсы нейтронов (200 мкс на полуширине) с периодом 0,2 с и амплитудой 1830 МВт. Импульсы ИБР-2М инициируются двумя подвижными отражателями, вращающимися вблизи активной зоны. Основной (ОПО) и дополнительный (ДПО) подвижные отражатели коаксиально расположены и кинетически соединены друг с другом. ОПО вращается со скоростью 600 об/мин, а ДПО – 300 об/мин. При вращении подвижные отражатели генерируют периодические импульсы реактивности и соответственно импульсы мощности. Когда два подвижных отражателя

одновременно проходят мимо активной зоны, реактор на короткое время (450 мкс) переходит в состояние критичности на мгновенных нейтронах. Затем, после отхода отражателей от активной зоны, реактор переходит в состояние глубокой подкритичности. Форма импульса ИБР-2М близка к усеченному гауссовому распределению с полушириной  $200 \pm 4$  мкс (см. рис.2б).

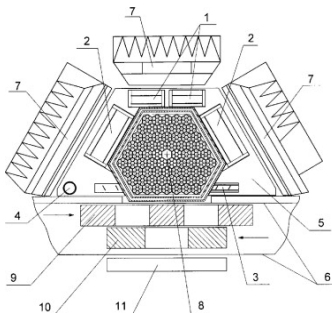


Рис. 1. Поперечное сечение активной зоны ИБР-2М: (1) блоки аварийной защиты, (2) компенсационный блок, (3) промежуточный блок управления, (4) автоматический регулятор, (5) стационарный отражатель, (6) корпус подвижного отражателя, (7) водяные замедлители (8) внешний источник нейтронов, (9) основной подвижный отражатель (ОПО), (10) дополнительный подвижный отражатель (ДПО), (11) плоский водяной замедлитель

Активная зона реактора имеет форму нерегулярной гексаэдрической призмы, расположенной вертикально. Два вращающихся подвижных отражателя проходят рядом с одной из поверхностей призмы. Стационарные отражатели, с расположенными внутри органами регулирования и автоматической защиты, примыкают к пяти другим граням. Схематическое изображение поперечного сечения ИБР-2М показано на рис. 1. Активная зона реактора содержит 69 топливных сборок с диоксидом плутония. В качестве теплоносителя в реакторе используется жидкий натрий с циркуляцией, активируемой электромагнитными насосами. Четыре водяных замедлителя, окружающих активную зону, служат для термализации быстрых нейтронов до тепловой энергии. Замедлители просматриваются 14-ми горизонтальными каналами для вывода нейтронных пучков тепловой энергии. Нейтроны используются для исследований в различных областях науки, таких как физика наносистем, динамика материалов и исследование их структуры, молекулярная биология и фармакология, исследования структуры горных пород и минералов и т. д. В основном используется времяпролетный метод исследований.

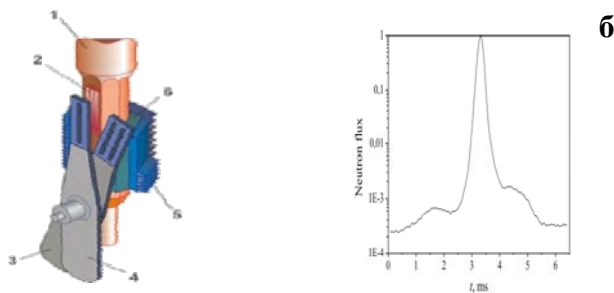


Рис. 2. ИБР-2М: (1) корпус реактора, (2) активная зона, (3) основной подвижный отражатель, (4) дополнительный подвижный отражатель, (5) гребенчатые водяные замедлители, (6) стационарный отражатель (а) и форма импульса мощности реактора ИБР-2М (б)

## 2. Сбор данных

Исходные данные представлены в виде массива последовательных значений энергии импульса. Частота опроса составляла 5 Гц, что соответствовало частоте импульсов. Зарегистрированная величина была пропорциональна заряду, выделяющемуся в ионизационных камерах деления во время импульса мощности.

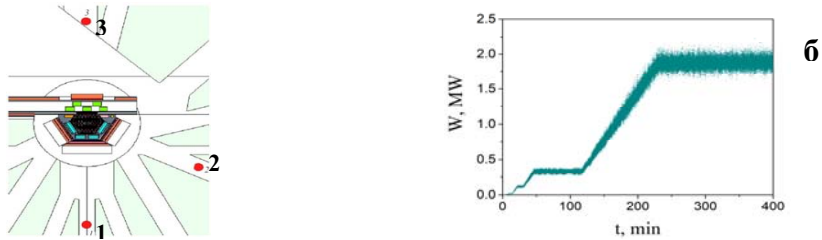


Рис. 3. Расположение ионизационных камер деления (а) и данные импульсной энергии ИБР-2М (б). Детекторы расположены вокруг активной зоны: (1) – 5-й пучок, 115 см от центра активной зоны, (2) – 8-й пучок, 119 см от центра активной зоны, (3) – 13-й пучок, 116 см от центра активной зоны

Чтобы исключить ошибки из-за экранирования детектора в процессе движения регулирующих элементов при изменении мощности, данные были усреднены по показаниям трех независимых детекторов (см. рис. 3). Калибровка абсолютной мощности проводилась в соответствии с калибровочными измерениями теплоотдачи в активной зоне. Сбор данных осуществлялся с помощью системы измерения параметров реактора. Измерения проводились как в динамическом состоянии реактора (здесь – повышения мощности), так и в стационарном при мощности от 30 кВт до 2 МВт.

### 3. МБЭ-многочлены

Обнаружение базовой линии в шумах ИБР-2М в реальном масштабе времени с помощью кубических сплайнов или СКПА высокого порядка усложняется из-за повышения вычислительной сложности и неустойчивости вычислений.

В данной работе для обнаружения базовой линии используется среднеквадратичная кусочно-полиномиальная аппроксимация шестого порядка [5], основанная на методе базисных элементов [6]. В МБЭ многочлен  $P_n(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i$  преобразуется в форму МБЭ-многочлена, конструкция которой основана на четырех базисных элементах (БЭ):  $w_1, w_2, w_3$  (квадратичные параболы) и  $Q$  (кубическая парабола). БЭ строятся на трехточечной сетке  $\Delta_3^{\alpha\beta} : x_\alpha < x_0 < x_\beta$  и зависят от трех управляющих параметров  $x_0, \alpha = x_\alpha - x_0$ , и  $\beta = x_\beta - x_0$ ,  $\alpha, \beta \in R$ . Параметры  $x_0, \alpha, \beta$  и переменная  $r = x - x_0$  связаны между собой специальным правилом двойного отношения четырех точек [6]. Для четверки  $[\alpha\beta 0]$  это правило порождает три дробно-рациональные функции  $w_1, w_2, w_3$  относительно  $\alpha, \beta, r$  и (квадратичные относительно  $r$ ):

$$w_1 = \frac{-r(r-\beta)}{\alpha\gamma}, \quad w_2 = \frac{r(r-\alpha)}{\beta\gamma}, \quad w_3 = \frac{(r-\alpha)(r-\beta)}{\alpha\beta}, \quad \sum_{i=1}^3 w_i = 1, \quad \gamma = \beta - \alpha$$

Элемент  $Q$  является зануляющей кубической параболой:

$$Q = \alpha\beta r w_3 = r(r-\alpha)(r-\beta), \quad \alpha\beta\gamma \neq 0, \quad \alpha\beta < 0, \quad r, \alpha, \beta \in R.$$

На сетке  $\Delta_3^{\alpha\beta}$  многочлен  $P_n$  принимает форму МБЭ-многочлена:

$$P_n = P_{n \downarrow m} = \sum_{j=0}^m Q^j \mathbf{w}^T \mathbf{r}_j, \quad m = \lfloor n/3 \rfloor, \quad (1)$$

где  $\mathbf{w} = [w_1, w_2, w_3]^T$ ,  $\mathbf{r}_j = [r_{1j}, r_{2j}, r_{3j}]^T$  – коэффициенты.

Используя свертку  $\mathbf{w}^T \mathbf{r}_j = w_1 r_{1j} + w_2 r_{2j} + w_3 r_{3j} = \Pi_j$ , равенство (1) запишется в виде

$$P_{n \downarrow m} = \sum_{j=0}^m Q^j \Pi_j,$$

где  $\Pi_j$  – квадратичная парабола, проходящая через три точки плоскости:  $r_{1j}$ ,  $r_{2j}$  и  $r_{3j}$ . Видно, что значение  $P_n(\bullet) \equiv P_{n \downarrow m}(\bullet)$  вычисляется по координатам точек на параболах  $\Pi_j(\bullet)$  и  $Q^j(\bullet)$  (рис. 4, б,  $n = 5, m = 1$ ). С помощью векторов  $\mathbf{b}_j = [b_{1j}, b_{2j}, b_{3j}]^T$  с компонентами  $b_{ij} = Q^j w_i$ , МБЭ-многочлен (1) можно записать в форме базисных функций

$$P_{n \downarrow m} = \sum_{j=0}^m \mathbf{b}_j^T \mathbf{r}_j = \sum_{j=0}^m \sum_{i=1}^3 Q^j w_i r_{ij}, \quad \mathbf{b}_0 = \mathbf{w}.$$

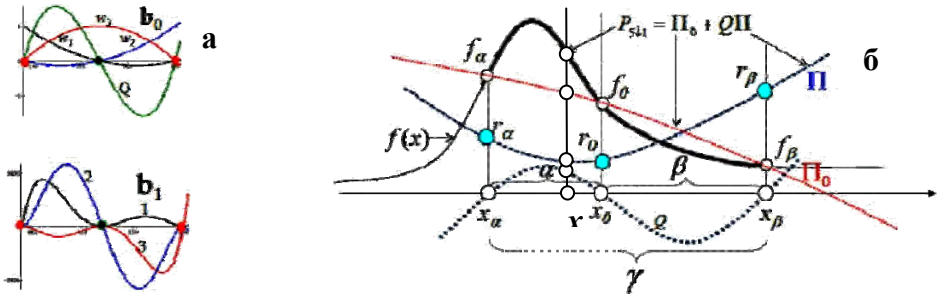


Рис. 4. Базисные функции (а) и геометрия МБЭ-многочлена  $P_{5 \downarrow 1}(x, \alpha, \beta)$  (б)

Базисные функции  $b_{ij}$  (рис. 4а,  $n = 5, m = 1$ ) суть многочлены степени  $3j + 2$  относительно  $x$  с нулями в узлах сетки  $\Delta_3^{\alpha\beta}$ . Коэффициенты  $\mathbf{r}_j = [r_{\alpha j}, r_{\beta j}, r_{0j}]^T$  зависят от параметров  $\alpha, \beta$  и производных  $P_n^{(j)}(x_\nu)$ ,  $j = \overline{0, m}$ ,  $\nu = \alpha, \beta, 0, m \ll n$  [7].

#### 4. Свойства МБЭ-многочленов

МБЭ-многочлены обеспечивают *устойчивость* вычислений при повышении порядка аппроксимации, *параметризацию базисных функций* координатами узлов трехточечной сетки, *понижение порядка производных* при вычислении коэффициентов, *управление качеством* регрессионной матрицы, *устойчивость вычислений* к ошибкам [7, 8]. Эти свойства расширяют границы применения метода наименьших квадратов (МНК) за счет *параметров управления, равномерного распределения ошибки* на локальном отрезке  $[x_\alpha, x_\beta]$ , *увеличения шага* сетки, *понижения размерности* нормальной матрицы. Такой потенциал обеспечивает *точность, качество аппроксимации* и *понижение вычислительной сложности*. Например, при выделении квадратичной части ( $\Pi_0$ ), МБЭ-модель шестого порядка приводится к виду  $u = Q\Pi$  с тремя коэффициентами, что *заметно сокращает* число арифметических операций. МБЭ-многочлены ориентированы на решение задач кусочно-полиномиальной аппроксимации (КПА) кривых. В отличие от кубических сплайнов, МБЭ-многочлены высокой степени обеспечивают лучшее качество приближения (за счет *уменьшения* числа сегментов  $K$ ). На глобальном отрезке  $[a, b]$  число  $K$  влияет на качество аппроксимации, так как оно изменяет длину локального интервала  $\gamma = x_\beta - x_\alpha$ . Параметр  $x_0$  используется для сдвига сетки  $\Delta_3^{\alpha\beta}$  на координатной оси, а его положение внутри границ локальной сетки определяет параметры базисных функций  $\alpha$  и  $\beta$ , от которых зависят обусловленность нормальной матрицы и *устойчивость вычислений* [6].

## 5. Алгоритм СКПА-6

Алгоритм СКПА-6 выполняется в 4 этапа (I-IV):

**I.** Отрезок  $[a, b]$  и входные данные  $\tilde{S}$  разбиваются на  $K$  частей  $[a, b] = \bigcup_{k=1}^K [x_{\alpha_k}, x_{\beta_k}]$  и  $\{\tilde{S}_i\}_{i=1}^N = \bigcup_{k=1}^K \{\tilde{S}_i\}_{i=1}^{N_k}$ , где  $N_k = \lfloor N/K \rfloor$ , при условии  $x_{\alpha_k} \equiv x_{\beta_{k-1}}$ , где  $K$  – число сегментов. Аппроксимирующая кривая ищется в виде многочлена  $P_{5\downarrow 1}(x) = \mathbf{w}^T \mathbf{f} + \mathbf{b}^T \mathbf{r}$ ,  $x \in [x_{\alpha_k}, x_{\beta_k}]$ , при  $\beta_k = -\alpha_k$ . Вектор  $\mathbf{f}$  фиксирован, с компонентами  $f_v = P_n(x_v)$ ,  $v = \alpha_k, \beta_k, 0_k$ , в узлах сетки  $\Delta_3^{\alpha_k \beta_k}$ , а  $\mathbf{r}$  – свободен [7]. При  $\beta_k = -\alpha_k = h$  базисные функции не меняются для  $k = \overline{1, K}$ .

**II.** Вычисление  $\hat{f}_k = [\bar{f}_{\alpha_k} \bar{f}_{\beta_k} \bar{f}_{0_k}]^T$  по  $2M + 1$  координатам точек, ближайшим к линиям  $x = x_v$ ,  $v = \alpha_k, \beta_k, 0_k$ , где  $M$  – локальный параметр. Преобразование данных  $\tilde{S}_i^k \xrightarrow{\hat{f}_k} \tilde{u}_i^k$ ,  $k = \overline{1, K}$ :  

$$\bar{f}_{v_k} = \frac{1}{2M+1} \sum_{i=-M}^M \tilde{S}_i^k, \quad \tilde{u}_i^k = \tilde{S}_i^k - \mathbf{b}_0^T \hat{f}_k, \quad i = \overline{1, N}, \quad f_v = f(v), \quad v = \alpha, \beta, 0.$$

Условие  $\bar{f}_{\alpha_k} \equiv \bar{f}_{\beta_{k-1}}$  обеспечивает нулевую гладкость стыковка сегментов.

**III.** Вычисление оценки  $\hat{r}_k$  (по критерию МНК):  $\sum_j^{N_k} [\tilde{u}_j^k - \mathbf{b}_k^T(r_j) r_k]^2 \rightarrow \min_{r_k}$ ,  $r_j \in [\alpha_k, \beta_k]$ ,  

$$\hat{r}_k = [\mathbf{B}^T \mathbf{B}]^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{u}^k, \quad \mathbf{b}_k \equiv \mathbf{b} = [b_1, b_2, b_3]^T, \quad \text{где } \mathbf{u}^k = [u_1^k u_2^k \dots u_{N_k}^k]^T, \quad \text{а } [\mathbf{B}^T \mathbf{B}]^{-1} \text{ – нормальная матрица } 3 \times 3 \text{ для } k\text{-го сегмента.}$$

**IV.** Вычисление оценки  $\hat{S}^k(x)$ :  $\hat{S}^k(x) = \mathbf{b}_0^T \hat{f}_k + \mathbf{b}^T \hat{r}_k$ ,  $k = \overline{1, K}$ , где

$$\mathbf{b}_0 = \left[ \frac{r(r-\beta)}{\alpha\gamma}, \frac{r(r-\alpha)(r-\beta)}{\alpha\beta} \right]^T, \quad \mathbf{b} = \left[ \frac{r^2(r-\alpha)(r-\beta)^2}{\alpha\gamma}, \frac{r^2(r-\alpha)^2(r-\beta)}{\gamma\beta}, \frac{r^2(r-\alpha)^2(r-\beta)^2}{\alpha\beta} \right]^T.$$

Этот алгоритм проверен на нетривиальных примерах (см. [5 – 7, 8]).

## 6. Настройка параметров и обсуждение результатов обработки

Алгоритм СКПА-6 использует пять параметров  $x_0, \alpha, \beta, M$  и  $K$  для управления среднеквадратичной сегментацией. Параметр  $x_0$  служит для сдвига трехточечной сетки по оси абсцисс. Его положение внутри отрезка  $[x_\alpha, x_\beta]$  определяет значения  $\alpha$  и  $\beta$ . Параметры  $\alpha, \beta$  и  $M$  (число точек для оценки компонент  $\hat{f}_k$ ) называются *локальными*. Их значения влияют на точность и качество сглаживания в пределах отрезка  $[x_\alpha, x_\beta]$ , а параметр  $K$  влияет на точность и качество сглаживания на глобальном отрезке  $[a, b]$ .

Результаты изменения  $M$  и  $K$  показаны на рис. 5 и 6. На рис. 5 показано изменение аппроксимирующей кривой энергии импульсов при изменении  $K$ , для одного и того же значения  $2M + 1$ . На рис. 6 параметр  $K$  был зафиксирован, а  $2M + 1$  менялся.

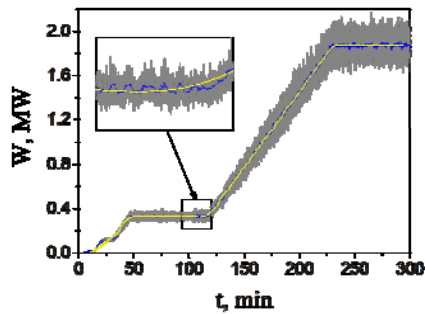


Рис. 5. Аппроксиманта, как функция числа  $K$ : (серый) – мощность импульса, (желтый) –  $K = 13$ ,  $2M + 1 = 201$ , (синий) –  $K = 1344$ ,  $2M + 1 = 201$  для регулярного увеличения мощности ИБР-2М

Для ИБР-2М полные колебания энергии импульса можно разделить на 2 множества: *медленные* изменения и *быстрые* изменения или шум. На рис. 5 видно, что параметр  $K$  отвечает за чувствительность метода к медленным изменениям.

В зависимости от количества сегментов ( $K$ ) аппроксимирующая кривая может включать только основной тренд (желтая линия рис. 5) а также медленные изменения (синяя линия рис. 5). Набор локальных параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $M$  (см. раздел 6) отвечает за чувствительность метода к уровню шума. Следует отметить, что начиная с  $2M + 1 = 51$  при фиксированном параметре  $K$ , максимальное отклонение аппроксимант составляет 1,5 %.

Как было отмечено выше, увеличение числа сегментов ( $K$ ) позволяет выявить изменения энергии импульса, вызванные медленно меняющимся источником. Однако, если  $K$  слишком велико, шум проникает в базовую линию. Вопрос обнаружения *оптимального*  $K$  является *критическим*.

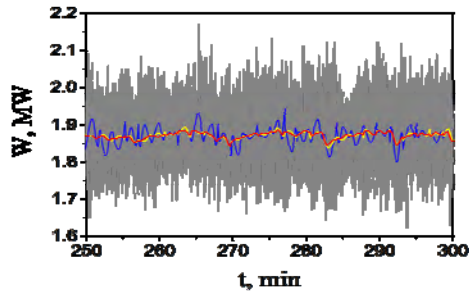


Рис. 6. Аппроксимирующая кривая как функция  $2M + 1$ ,  $K = 335$ : (серый) – мощность импульса, (синий) –  $2M + 1 = 9$ , (желтый) –  $2M + 1 = 51$ , (красный) –  $2M + 1 = 201$

Ранее было упомянуто, что базовый уровень должен содержать влияние органов управления на колебания мощности реактора. Для ИБР-2М основным источником медленных изменений энергии импульса является автоматический регулятор (АР), который используется для автоматического регулирования уровня мощности. Поэтому критерием оценки для выбора параметра  $K$  является наличие изменений энергии импульса, вызванных перемещениями позиции АР.

Поскольку базовая линия включает только низкие частоты, мы можем оценить оптимальный параметр  $K$ , изменяя вклад *низкочастотной составляющей* шума реактора ( $0 \dots 2,5$  Гц) в общий шум:

$$\frac{D_{0-0,25}}{D} = \frac{\int_0^{0,25} S(f) df}{\int_0^{2,5} S(f) df},$$

где  $S$  – спектральная плотность шума и  $D$  – его интеграл по определенным диапазонам. На рис. 8 показано это соотношение (кривая 1) вместе с его производной  $d(D_{0-0,25} / D) / dK$  за период времени 240 – 320 мин., показанный также на рис. 5 и 7.



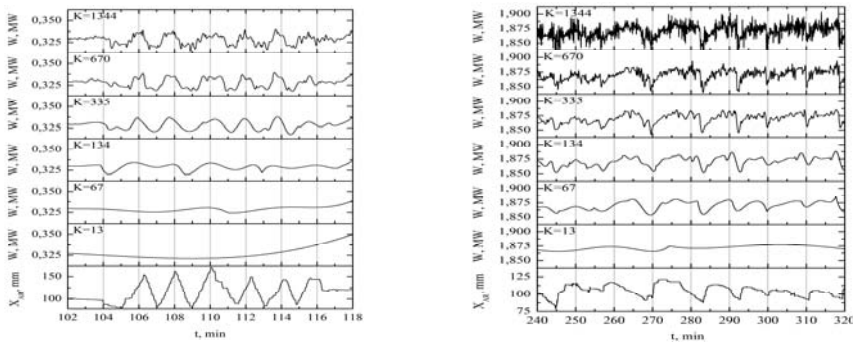


Рис. 7. Перемещения автоматического регулятора (внизу) и их отображения в аппроксимантах в зависимости от параметра  $K$ ,  $2M + 1 = 201$

Для малых  $K$ , при извлечении базовой линии, происходит постепенное уменьшение вклада низкочастотной составляющей. Через некоторое время в области  $K \in [700, 900]$  влияние  $K$  уменьшается, и это мы интерпретируем как истощение потенциала  $K$ . Оптимальное значение  $K$  можно найти в этой области из условия  $d(D_{0-0,25} / D) / dK = 0$ .

Число  $K$  эффективно моделирует полиномиальный порядок, поэтому его дальнейшее увеличение эквивалентно аппроксимации полиномом более высокой степени. Полиномы более высокой степени могут быть, например, Тейлора или рядами Фурье. Использование более высоких порядков означает включение компонентов Фурье (шума). Однако, для базовой линии более характерны ряды Тейлора. Поэтому дальнейшее уменьшение отношения, показанного на рис. 8, свидетельствует об избыточном моделировании, включающем компоненты Фурье в базовую линию. Поэтому  $d(D_{0-0,25} / D) / dK = 0$  соответствует оптимальному значению для  $K$ .

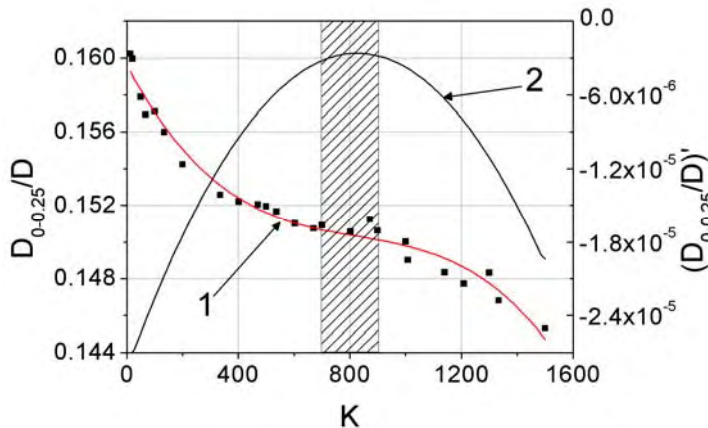


Рис. 8. Зависимость вклада низкочастотной составляющей шума реактора  $D_{0-0,25} / D$  (1) и скорости его изменения  $d(D_{0-0,25} / D) / dK$ , (2) на параметр  $K$ . Выделенная область указывает оптимальные значения параметров  $K$

Максимум  $(D_{0-0,25} / D)'$  соответствует оптимальному значению параметра  $K = 802$ . Однако область максимума довольно плоская, поэтому можно сказать, что оптимальный параметр  $K$  составляет от 700 до 900 сегментов. Более низкое число сегментов оставляет базовую линию в спектре шума, в то время как увеличение  $K$  выше оптимального значения обрезает низкие шумовые частоты вместе с частотами базовой линии. Анализ других интервалов исходных данных дал то же значение.



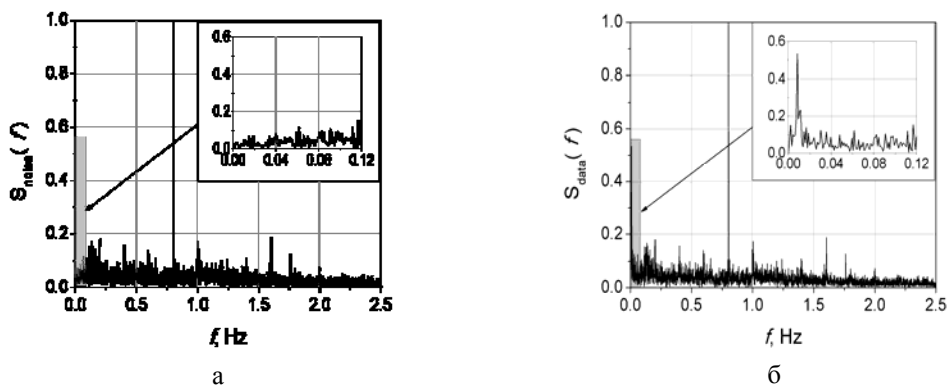


Рис. 9. Спектральная плотность исходных данных (сигнал) (а) и шума реактора (б)

## Заключение

Представлен алгоритм СКПА-6 для определения базового уровня нейтронного шума с использованием МБЭ-многочленов. Алгоритм был применен как к статическим, так и к динамическим состояниям реактора в диапазоне мощности от 30 кВт до 2 МВт. Алгоритм зависит от двух управляющих параметров,  $K$  и  $M$ . Их оптимальные значения были определены таким образом, чтобы базовая линия (в основном из-за движения органов регулирования) не попадала в спектр шума, и не содержала низкочастотные составляющие спектра шума. Алгоритм СКПА является флэш-алгоритмом из-за его аналитичности. Среднее время выполнения составляет примерно 0,05 мс / точку на x86\_64 Intel Core i5-4570 Sandy Bridge machine с частотой 3,20 ГГц. Использование МБЭ-многочленов для обработки данных из реактора ИБР-2М, показало их полезность при анализе медленных трендов изменения мощности, что особенно важно для исследований изменений в реакторе деградационного типа.

## Литература

1. Bernitt P. In-core neutron noise analysis for diagnosis of fuel assembly vibrations: Thesis for the Degree of Master of Science. Chalmers University of Technology, Sweden 2008. СТН-NT-218.
2. Pepelyshev Y. N., Taiybov L. A., Garibov A. A., et al. // At. Energy. – 2013. – 113. – 248.
3. Пепельшев Ю. Н., Цогтсайхан Ц. Влияние шумов натриевой системы охлаждения активной зоны ИБР-2М на колебания реактивности: Сообщение ОИЯИ, Р13-2014-1, 2014.
4. Пепельшев Ю. Н., Цогтсайхан Ц. Исследование динамики шумов энергии импульсов реактора ИБР-2М в процессе выгорания топлива: Сообщение ОИЯИ, Р13-2017-4, 2017.
5. Дикусар Н. Д. Кусочно-полиномиальная аппроксимация шестого порядка с автоматическим обнаружением узлов // Матем. модел. – 2014. – Т. 26, № 3. – С. 31 – 48 (ММКС. – 2014. – V. 6, no. 5. – P. 509 – 522).
6. Дикусар Н. Д. Метод базисных элементов // Матем. модел. – 2010. – Т. 22, № 12. – С. 115–136 (ММКС. – 2011. – V. 3, no. 4. – P. 492 – 507).
7. Дикусар Н. Д. Полиномиальная аппроксимация высоких порядков // Матем. модел. – 2015. – Т. 27, № 9. – С. 89-109 (ММКС. – 2016. – V. 8, no. 2. – P. 183 – 200).
8. Дикусар Н. Д. Оптимизация решения в задачах кусочно-полиномиальной аппроксимации // Супервычисления и математическое моделирование. XVI Международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование»: сб. науч. тр. / под ред. Р. М. Шагалиева. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. – С. 113 – 122.

## USING THE MAIN-SQUARE PIECEWISE APPROXIMATION FOR NEUTRON NOISE ANALYSIS IN THE IBR-2M REACTOR

*N. V. Korepanova<sup>1</sup>, N. D. Dikumar<sup>2</sup>, Y. N. Pepelyshev<sup>2</sup>, M. Dima<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, China

<sup>2</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna

<sup>3</sup>Horia Hulubei National Institute of Physics and Nuclear Engineering, Măgurele, Romania

Under normal operating conditions of the reactor, the full noise level of the IBR-2M with respect to the average power level reaches  $\pm 22\%$ . Therefore, slow changes in average power, caused, of power, for example, by the movement of regulatory bodies, «drown» in the noises. But in a number of cases, it is these slow components of the pulse energy variation, the so-called basic signals (baseline), that are of fundamental importance for justifying the condition for safe operation of the reactor. The question is how to correctly distinguish these basic signals from the general chaos of successive values of the pulse energy. For detection of the baseline in the IBR-2M noise, the mean-square piecewise polynomial approximation of the sixth order (MSPPA-6) is used within the framework of the basic element method. The optimal values of the four control parameters  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $M$ ,  $K$  of the MSPPA-6 algorithm depend on the initial noise parameters. The algorithm was applied to both static and dynamic states of the reactor in the power range of 30 kW – 2 MW. The average processing time of a single point on the x86\_64 PC Intel Core i5-4570 Sandy Bridge machine, 3.20 GHz was approximately 0.05 ms, which allows using the MSPPA-6 algorithm in real time.

*Key words:* IBR-2M pulsed reactor, spectrum of neutron noise, basic element method, piecewise-polynomial smoothing, method of least squares.

УДК 004.418

## ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ИННОВАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОСТОПУС – ПЛАТФОРМА ОЦИФРОВКИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

*Т. Н. Корохов, И. С. Кремнев, О. Б. Крестунов*

АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт энергетических технологий "Атомпроект"»

Цифровизация – слово, которое мы слышим регулярно в новостях, постоянно видим в стратегии и планах развития любой из отраслей экономики. Термин набирал и продолжает набирать огромную популярность, цифровизацией, без преувеличения, занимаются все и повсеместно. И это действительно происходит, этим емким понятием можно охарактеризовать огромное множество процессов. Например, когда вы сканируете бумажные документы и складываете их в электронный архив, записываете видео во время интервью уникального специалиста, применяете электронный документооборот, выполняете численные эксперименты вместо натуральных, развиваете, внедряете и используете суперкомпьютерные технологии и т. д. перечислять можно очень долго. По сути, все, что связано с применением электронных устройств, так или иначе, участвует в процессе цифровизации. Но определенно есть разница между использованием отсканированного документа в виде