

**Восстановление утраченного показания высотного датчика контроля за полем  
нейтронов по данным архива**

**Загребасев А.М., Овсянникова Н.В., Рамазанов Р.Н. (НИЯУ МИФИ, г. Москва),**

**Мильто Н.В. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)**

**1. Введение**

Безопасная и эффективная эксплуатация ядерного реактора обеспечивается постоянным контролем состояния активной зоны, в том числе энерговыделения с помощью датчиков внутриреакторного контроля. В ВВЭР датчики прямого заряда объединены в каналы нейтронных измерений по семь датчиков, равномерно расположенных по высоте [1]. В РБМК устанавливаются как радиальные, так и высотные датчики контроля энерговыделения (ДКЭВ), состоящие из четырёх протяжённых чувствительных секций [2].

В практике эксплуатации ядерных реакторов нередки ситуации, когда часть внутриреакторных датчиков выходит из строя. Если датчик выходит из строя, то его показаниями пользоваться запрещено. Например, если выйдет из строя более чем одна секция ДКЭВ РБМК, то детектор считается «запрещённым». Канал нейтронных измерений ВВЭР запрещается при выходе из строя более двух датчиков.

Уменьшение числа показаний датчиков внутриреакторного контроля, на основе которых восстанавливается энерговыделение в активной зоне реактора, приводит к возрастанию погрешности его определения и требует модификации штатного алгоритма восстановления. Отметим, что в ВВЭР возможна замена датчиков только между кампаниями, в РБМК – «на ходу» без останова реактора, но это осложняет работу, так как заменяется не только датчик, но и ТВС, фактически осуществляется неплановая перегрузка топлива.

Утраченную измерительную информацию можно восстановить математическими методами и тем самым избежать преждевременной замены вышедших из строя детекто-

ров, что целесообразно и с экономической точки зрения. Для этого утраченные показания предлагается рассчитать путем аппроксимации по известным точкам, при этом пробные функции определяются на основе накопленной архивной информации. Поясним это на следующем примере.

Простейший алгоритм основан на том, что распределение плотности потока нейтронов, например, по высоте аппроксимируется с помощью собственных функций «голового» одномерного реактора с однородной загрузкой без обратных связей:

$$\varphi(x) \approx \sum_{j=1}^n A_j \psi_j(x) \quad (1)$$

где  $\psi_j(x) = \sin \frac{j\pi x}{H}$  – собственные функции реактора,  $x \in [0, H]$ ;

$H$  – высота активной зоны реактора;

$n$  – число собственных функций;

$A_j$  – коэффициенты аппроксимации.

Коэффициенты аппроксимации  $A_j$  находятся по методу наименьших квадратов из условия:

$$J = \min_{A_j} \sum_{i=1}^m (C_i - \sum_{j=1}^n A_j \psi_j(x_i))^2 \quad (2)$$

где  $m$  – число работоспособных датчиков,

$C_i$  – показания работоспособных датчиков.

Утраченное измерение  $C_i$  в месте расположения «запрещенного» датчика  $x_i$  определяется из выражения:

$$C_i = \sum_{j=1}^n A_j \psi_j(x_i) \quad (3)$$

Очевидно, что число функций разложения в представлении (1) должно быть не больше числа работоспособных датчиков ( $n \leq m$ ). Например, если отказали 3 датчика из 7

в одном КНИ, то для восстановления поля по остальным датчикам можно привлекать не более четырех гармонических функций  $\psi_j(x) = \sin \frac{j\pi x}{H}$ ,  $j = 1 \dots 4$ .

Понятно, что реальное распределение поля нейтронов может не описываться суперпозицией именно этих функций. Действительно, в реальной эксплуатации в силу множества причин (обратные нейтронно-физические и теплофизические связи, перемещение органов регулирования и др.) распределение размножающих свойств меняется во времени и пространстве и не является однородным.

Предлагается на основе архивной информации о поведении полей нейтронов в процессе эксплуатации синтезировать такие функции аппроксимации  $\tilde{\psi}_i(x)$ , которые меньшим количеством описывали бы распределение ППН в реакторе. Тогда возможно было бы по показаниям работоспособных датчиков восстановить информацию в местах расположения запрещенных ДПЗ или секций ДКЭВ.

## 2. Методика использования архивной информации для определения функций аппроксимации

Пусть из архива эксплуатационных параметров в некоторые моменты времени  $t_k$  извлечена информация о показаниях внутриреакторных датчиков  $C_i^k$ , где  $i$  – номер точки измерения,  $k$  – номер момента времени измерения. Набор  $C_i^k$  будем называть временным срезом. Пусть на каждом временном срезе по формуле (2) при всех работающих датчиках найдены коэффициенты  $A_j^k$ . Представим полученный результат в виде таблицы.

Таблица 1

Коэффициенты аппроксимации гармоническими функциями

Номер временного среза $k$	Значения коэффициентов $A_j^k$					
1	$A_1^1$	$A_2^1$	...	$A_i^1$	...	$A_n^1$
2	$A_1^2$	$A_2^2$	...	$A_i^2$	...	$A_n^2$

...	...	...	...	...	...	...
N	$A_1^N$	$A_2^N$	...	$A_i^N$	...	$A_n^N$
Среднее значение $\bar{A}_i$	$\bar{A}_1$	$\bar{A}_2$	...	$\bar{A}_i$	...	$\bar{A}_n$

Пользуясь этими данными получим матрицу коэффициентов корреляции амплитуд:

$$\hat{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1N} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{N1} & r_{N2} & \dots & r_{NN} \end{pmatrix}, \text{ где } r_{ij} = \frac{1}{\sigma_i \cdot \sigma_j \cdot N} \sum_{k=1}^N (A_i^k - \bar{A}_i) \cdot (A_j^k - \bar{A}_j)$$

Рассмотрим матрицы коэффициентов корреляции в результате обработки архивов энергоблоков с РБМК и ВВЭР, работающих на номинальном режиме, с интервалом между временными срезами 1 ч с временем наблюдения 1 месяц. Как правило, матрицы не являются диагональными, значит, между коэффициентами аппроксимации сильная корреляционная связь. Иными словами, плотность потока нейтронов как случайная функция представляется в виде суперпозиции (1) гармонических функций с коррелированными случайными коэффициентами.

Из теории случайных функций известно [3], что при разложении случайной функции в ряд  $\varphi(x) = \sum_{j=1}^{\infty} A_j \psi_j(x)$  сходимость всегда может быть улучшена тождественным преобразованием к каноническому разложению случайной функции:

$$\varphi(x) = M[\varphi(x)] + \sum_{j=1}^{\infty} V_j \tilde{\psi}_j(x), \quad (4)$$

где  $M[\varphi(x)]$  – математическое ожидание;

$V_j$  – некоррелированные случайные величины  $M[V_j \cdot V_i] = 0$  при  $i \neq j$   $M[V_j] = 0$ ;

$\tilde{\psi}_j(x)$  – координатные функции канонического разложения;

Процедура перехода к каноническому разложению во многом напоминает процедуру Грамма – Шмидта ортогонализации векторов или процедуру метода главных компонент [4]. Случайные величины  $A_1, \dots, A_n$  представляются в виде линейных комбинаций

некоррелированных случайных величин  $V_1, \dots, V_n$ , имеющих нулевые математические ожидания:

$$A_1 = M[A_1] + V_1, \quad A_s = M[A_s] + \sum_{i=1}^{s-1} a_{si} V_i + V_s, \quad s = 2, \dots, n \quad (5)$$

Коэффициенты  $a_{si}$  находятся последовательно, исходя из требования некоррелированности случайных величин  $V_1, \dots, V_n$ . При этом коэффициенты  $a_{si}$  и дисперсии  $D_1, \dots, D_n$  случайных величин  $V_1, \dots, V_n$  выразятся через корреляционные моменты случайных величин  $A_1, \dots, A_n$ . Подставляя (5) в (4) и перегруппировывая слагаемые, получим приближенное каноническое разложение случайной функции  $\varphi(x)$ :

$$\varphi(x) \approx M[\varphi(x)] + \sum_{i=1}^n V_i \tilde{\psi}_i(x) \quad (6)$$

Например, для реактора РБМК эта система функций для аппроксимации высотных полей будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_0(x) &= M[\varphi(x)] = \bar{A}_1 \sin(\pi x / H) + \bar{A}_2 \sin(2\pi x / H) + \bar{A}_3 \sin(3\pi x / H) + \bar{A}_4 \sin(4\pi x / H); \\ \tilde{\psi}_1(x) &= \sin(\pi x / H) + a_{21} \sin(2\pi x / H) + a_{31} \sin(3\pi x / H) + a_{41} \sin(4\pi x / H); \\ \tilde{\psi}_2(x) &= \sin(2\pi x / H) + a_{32} \sin(3\pi x / H) + a_{42} \sin(4\pi x / H); \\ \tilde{\psi}_3(x) &= \sin(3\pi x / H) + a_{43} \sin(4\pi x / H); \\ \tilde{\psi}_4(x) &= \sin(4\pi x / H). \end{aligned} \quad (7)$$

В дальнейшем, коэффициенты при гармонических функциях в выражении (7) будем называть коэффициентами смещения.

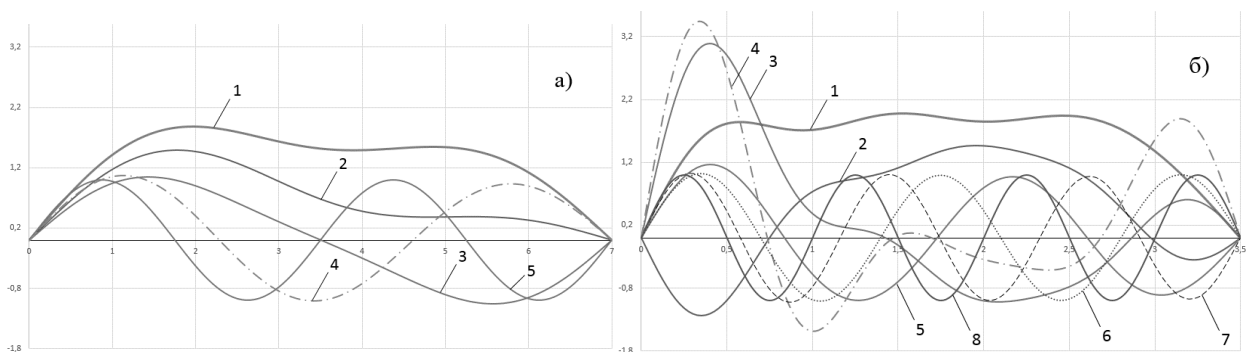


Рис. 1. Функции приближенного канонического разложения (1 – математическое ожидание, 2, 3, 4, 5, [6, 7, 8] – соответствующие функции) в РБМК (а) и ВВЭР (б)

Об эффективности аппроксимации аксиального распределения плотности потока нейтронов координатными функциями канонического разложения можно судить по результатам, приведенным на рис. 2. Представленные зависимости средних относительных невязок аппроксимирующих кривых и показаний датчиков от числа функций аппроксимации гармоническим рядом и координатными функциями приближенного канонического разложения показывает, что правильный выбор функций разложения резко повышает точность аппроксимации. Например, наличие третьей гармоники в разложении гармоническими функциями снижает погрешность аппроксимации лучше, чем наличие в наборе второй гармоники. Преимущество функций канонического разложения в том, что каждая из них содержит в себе несколько гармоник. Поэтому использование меньшего количества таких функций для аппроксимации даёт меньшую ошибку, чем при использовании большого числа гармонических функций.

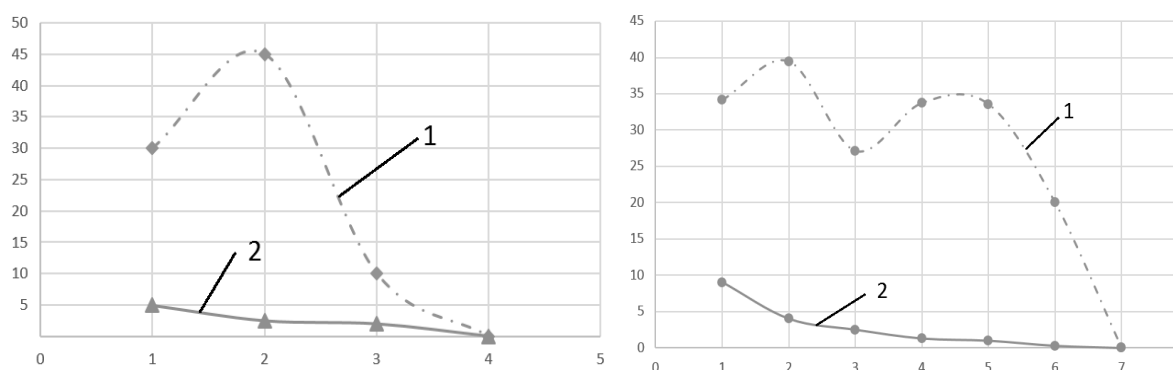


Рис. 2. Зависимость относительной средней невязки от числа исходных функций (1) и функций приближенного канонического разложения (2) для РБМК (а) и ВВЭР (б)

Физический смысл координатных функций канонического разложения плотности потока нейтронов установлен в работе [5]. Оказывается, координатные функции канонического разложения являются аналогом собственных функций работающего реактора. При этом математическое ожидание плотности потока нейтронов – функция  $\tilde{\psi}_0(x)$  – аналог фундаментального решения, т. е. собственной функции, отвечающей наименьшему собственному значению, функции  $\psi_1, \dots, \psi_n$  соответственно отвечают большим собственным значениям. Их предложено называть «естественными функциями реактора». Видимо, по

этой физической причине ряд из координатных функций канонического разложения сходится быстрее, чем при других функциях аппроксимации.

Поскольку естественные функции находятся в результате обработки архивной информации, их вид должен зависеть от объема и характера обработанной информации, т. е. от числа временных срезов, интервалов между ними и режимов работы реактора (стационарный или переходной режим).

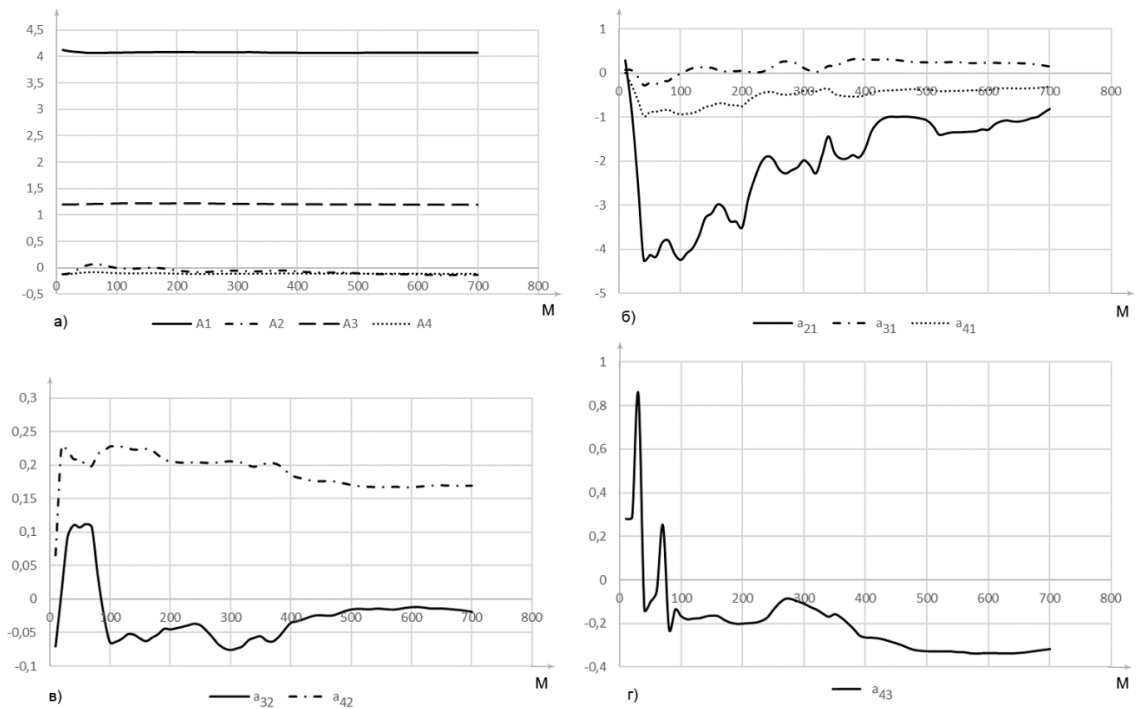


Рис. 3. Зависимость коэффициентов смещения пространственных гармоник от числа временных срезов  $M$  в функции  $\psi_0(x)$  (а),  $\psi_1(x)$  (б),  $\psi_2(x)$  (в),  $\psi_3(x)$  (г)

Видно, что при числе используемых временных срезов  $M$  порядка 500-700 зависимости коэффициентов смещения от числа временных срезов выходят на асимптотику. Отсюда можно сделать вывод, что для нахождения естественных функций достаточен объем выборки показаний датчика, равный 700 временных срезам.

### 3.1 Восстановление показаний запрещенных ДПЗ ВВЭР

В ВВЭР канал нейтронных измерения состоит из семи ДПЗ, поэтому естественные функции определяются по семи точкам. Это позволяет использовать большее их число для восстановления утраченных показаний. Выход из строя двух и даже более датчиков не

вносит сильную погрешность при использовании предложенной методики. Приведены результаты обработки архивов данных измерительных каналов 1-го и 2-го энергоблоков Тяньваньской АЭС (Китай), а также архива с 1-го энергоблока Балаковской АЭС. По архивным данным был построен набор из «естественных» функций (см. рис. 1), после чего фиктивно запрещались различные комбинации датчиков: от одного до четырех датчиков по центру или с одной стороны. При этом погрешность восстановления составляет не более 2,5%. Однако, такая большая точность обусловлена не только удачным выбором функций, но и тем, что в реакторах типа ВВЭР при работе в стационарном режиме поле энерговыделения не претерпевает сильных изменений.

### 3.2. Восстановление показаний запрещенных секций для реактора РБМК

Смоделируем ситуацию, когда одна из секций датчика ДКЭВ РБМК выходит из строя. Восстановим показание запрещённой секции с помощью аппроксимации тремя естественными функциями. Исследуем влияние числа используемых срезов на точность аппроксимации. Для этого сравним аппроксимированное поле в точке расположения запрещённого датчика с его реальным показанием (рис. 4).

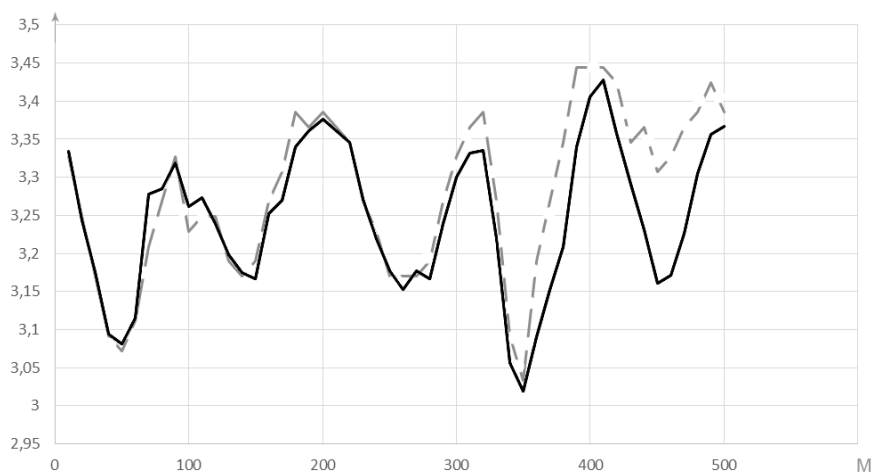


Рис. 4. Реальные (—) и восстановленные (- - -) показания запрещённой секции датчика

$$\text{Исследование зависимости относительной ошибки } \delta = \frac{\sqrt{(C - \varphi(x_0))^2}}{C} \cdot 100\% \text{ восста-}$$

новления показания секции датчика ДКЭВ от числа используемых срезов показало, что



при использовании для построения функций архива порядка 500-700 показаний, относительная ошибка снижается и далее практически не меняется. Очевидно, что при увеличении числа запрещённых секций погрешность восстановления увеличивается. Для РБМК при запрете двух секций с одного края ошибка восстановления составляет около 10%.

В РБМК, в отличие от ВВЭР, происходят существенные возмущения поля энерговыделения в результате активного перемещения органов регулирования и перегрузок топлива. В связи с этим возникает вопрос о том, насколько это существенно влияет на формирование естественных функций. Рассматривалась следующая ситуация. По архиву состояний был выбран ДКЭВ, рядом с которым перемещались органы регулирования, в соседней с ним ячейке перегружали ТВС. Рассматривались по 400 временных срезов до и после возмущения. Исследование показало, что сильнее всего при этом изменяется первая естественная функция  $\psi_1(x)$  (рис. 5).

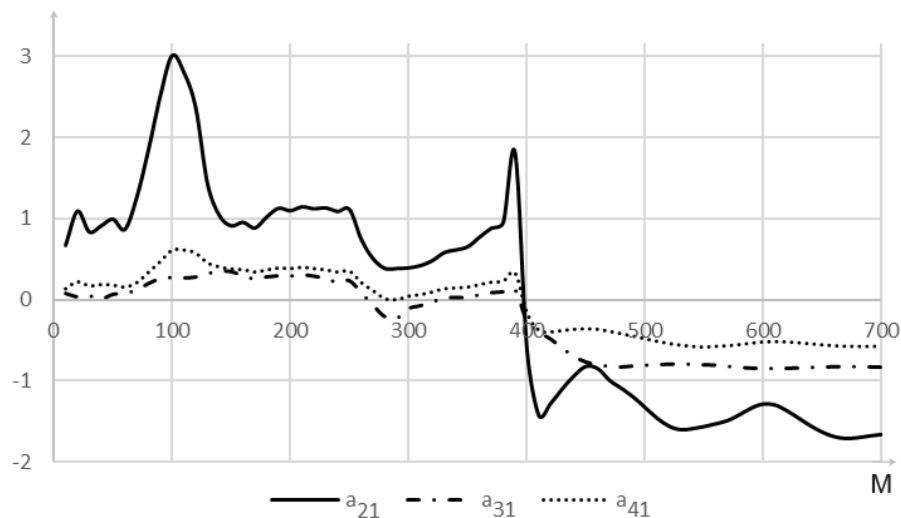


Рис. 5. Зависимость коэффициентов смещения функции  $\psi_1(x)$  от числа временных срезов

На рис. 5 видно, что в районе рассматриваемого среза 400 резко меняются коэффициенты при гармониках. Однако можно заметить, что все три коэффициента меняют свой знак. Значит, естественная функция в среднем тоже лишь меняет знак и при аппроксимации будет иметь противоположный по знаку коэффициент.

Таким образом, можно сделать вывод, что даже при сильных изменениях в окрестности датчика, таких, как движение органов регулирования или перегрузка ТВС, естественные функции значительно не меняются. Значит, практически для всех случаев достаточно иметь архив из нескольких сот показаний датчика для получения естественных функций, которыми можно будет достаточно точно аппроксимировать высотное энерговыделение при частичной потере измерительной информации.

**Заключение.** При частичной потере измерительной информации для восстановления высотного распределения плотности потока нейтронов предпочтительнее использовать естественные функции (функции приближенного канонического разложения). Такой выбор базиса позволяет восстанавливать поле меньшим числом функций с меньшей на порядок ошибкой восстановления, чем при наборе гармонических функций. Эффект снижения ошибки достигается потому, что при построении нового базиса используется информация о возможном высотном распределении плотности потока нейтронов в процессе эксплуатации реактора. Более того, на примере решения данной задачи, по сути, предложен подход к контролю энерговыделения, заключающийся в том, что алгоритм контроля адаптируется в процессе работы реактора.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Андрущечко С.А., Афров А.М., Васильев Б.Ю. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. М.: Логос, 2010.
2. Абрамов М.А., Авдеев В.И., Адамов Е.О. и др. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК / Под общей ред. Черкашова Ю.М. М.: ГУП НИКИЭТ, 2006.
3. Пугачев В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления, 2 изд. М.: Физматлит, 1960.
4. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989.
5. Загребаяев А. М., Насонова В. А., Овсянникова Н. В. Математическое моделирование ядерного реактора при случайных возмущениях технологических параметров: Монография. М.: НИЯУ МИФИ, 2011.