

P13-2015-47

Ю. Н. Пепельшев¹, Ц. Цогтсайхан^{1,2}, Г. А. Ососков¹

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕРНОГО
АНАЛИЗА И АВТОРЕГРЕССИОННЫХ
НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ
ШУМОВ РЕАКТОРА ИБР-2М**

Направлено в «Труды XXV международного симпозиума
по ядерной электронике и компьютерингу — NEC'2015»,
Черногория, Будва, 28 сентября – 2 октября 2015 г.

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Институт физики и технологии МАН, Монголия

E-mail: pepel@nf.jinr.ru, tsolmon@nf.jinr.ru

Пепельшев Ю. Н., Цогтсайхан Ц., Ососков Г. А.

P13-2015-47

Использование методов кластерного анализа и авторегрессионных нейронных сетей для диагностики шумов реактора ИБР-2М

Методологии распознавания образов и искусственных нейронных сетей широко используются в диагностике состояния реактора по шумам мощности. Особенно это актуально для импульсного реактора периодического действия ИБР-2М (Дубна), чувствительность которого к возмущениям реактивности в 40 раз выше, чем у стационарных реакторов с урановым топливом. Показано, что в процессе работы реактора структура шумов мощности последовательно разделяется на четыре устойчивых кластера. Отмечено, что переходная область в шумах мощности связана с асимптотическим усилением вибраций лопастей подвижных отражателей при прогреве конструкции модулятора реактивности после подъема мощности. При исследовании медленных процессов нелинейная авторегрессионная нейронная сеть с погрешностью $\sim 5\%$ позволяет предсказывать изменение реактивности, связанное с колебаниями расхода натрия на интервале времени до 2 сут.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2015

Pepelyshev Yu. N., Tsogtsaikhan Ts., Ososkov G. A.

P13-2015-47

Application of Cluster Analysis and Autoregressive Neural Networks for the Noise Diagnostics of IBR-2M Reactor

The pattern recognition methodologies and artificial neural networks were used widely for the reactor noise diagnostics. It is very important for the pulsed reactor of periodic operation IBR-2M (Dubna) which has a high sensitivity to reactivity fluctuations (40 times higher than stationary reactors with a uranium fuel). It is shown that the power noise is subsequently divided into four stable clusters. The noise transition region is formed by asymptotically increasing vibration of the moving reflectors in the process of their heating after maximum power is reached. The study of slow processes shows that the nonlinear autoregressive neural network predicts an error of $\sim 5\%$. NAR model allows predicting changes in reactivity caused by the fluctuation of liquid sodium flow rate up to two days of reactor operation.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2015

ВВЕДЕНИЕ

В работе представлены основные результаты исследования динамики шумов энергии импульсов и медленных колебаний расхода натрия через активную зону (АЗ) ИБР-2М с использованием техники кластерного анализа и нейронных сетей. Шумы мощности ИБР-2М обусловлены работой различных технологических систем реактора, таких как системы охлаждения активной зоны, вращающегося модулятора реактивности и т. п. Полные шумы мощности из-за высокой чувствительности реактора к шумам реактивности достигают $\pm 22\%$. Эти шумы влияют на управление реактором, процесс стабилизации мощности и т. п., т. е. непосредственно на безопасность эксплуатации реактора. Целью работы является исследование динамики шумов энергии импульсов и возможности предсказания колебаний расхода натрия через активную зону.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ РЕАКТОРА ИБР-2М И ИСХОДНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Реактор ИБР-2М эксплуатируется в Дубне (Россия) с проектной средней мощностью 2 МВт и 1830 МВт в импульсе. Емкость активной зоны ИБР-2М составляет 69 тепловыделяющих сборок. Топливом служат таблетки втулочного типа, выполненные из PuO_2 , а теплоносителем в реакторе — жидкий натрий, прокачиваемый через АЗ двумя электроиндукционными насосами. Мимо одной из граней активной зоны проходят две вращающиеся соосно, но с разной скоростью лопасти — основной и дополнительный подвижные отражатели (ОПО и ДПО) модулятора реактивности. Ротор ОПО представляет собой лопасть с тремя зубьями и противовесом, а ДПО — лопасть с двумя зубьями. Уровень реактивности ИБР-2М регулируется органами СУЗ, представляющими собой перемещаемые вольфрамовые блоки в матрице стационарных стальных отражателей. На рис. 1 показан поперечный разрез активной зоны ИБР-2М. Для формирования спектра тепловых нейтронов активная зона окружена водяными замедлителями.

Исследовались последовательности значений амплитуды импульсов мощности и значений расхода натрия через АЗ. Амплитуда импульсов измерялась с помощью трех независимых детекторов, окружающих активную зону. Измерения проводились в одном из типичных реакторных циклов в 2013 г. с расходом натрия через активную зону, равным $100 \text{ м}^3/\text{ч}$. Продолжительность измерений составляла 10,5 сут, начиная с момента вывода реактора на

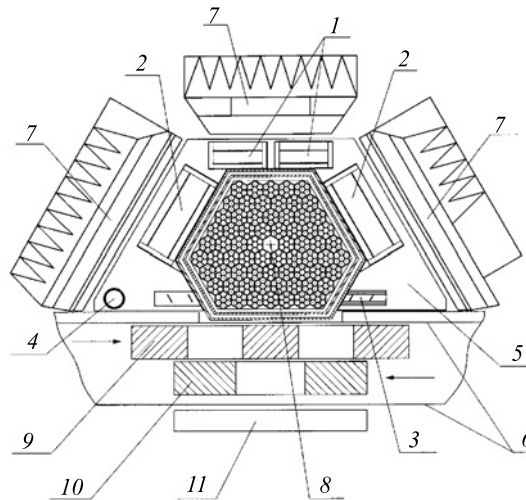


Рис. 1. Поперечный разрез активной зоны реактора ИБР-2М: 1 — блоки аварийной защиты; 2 — компенсирующие блоки; 3 — блок промежуточного регулятора; 4 — стержень автоматического регулятора; 5 — матрица стационарного отражателя; 6 — кожух подвижного отражателя; 7 — водяные гребенчатые замедлители; 8 — внешний нейтронный источник; 9 — ОПО; 10 — ДПО; 11 — водяной плоский замедлитель

мощность 2 МВт и кончая останом реактора в конце цикла. Зарегистрированный временной ряд длительностью $\sim 10^7$ последовательных значений амплитуды импульсов обрабатывался с помощью процедур статистического анализа [1]. Основным элементом статистического анализа являлся разброс значений, а объектом кластерного анализа — спектральная плотность колебаний энергии импульсов.

Исходный временной ряд в задаче прогнозирования колебаний расхода натрия представлял собой массив последовательных значений расхода натрия, регистрируемый через 0,1 с в течение 4 сут. Указанная выборка значений расхода натрия представляла собой основу для прогнозирования.

Ниже приведены методики обработки и анализа результатов шумов энергии импульсов и колебания расхода натрия через активную зону.

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ШУМОВ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСОВ

Для исследования структуры шумов мощности использовался кластерный анализ на основе иерархических алгоритмов как наиболее гибкий из существующих методов кластерного анализа. Выбранный метод позволяет детально исследовать структуру различий между объектами и изменения в их структуре. Изменение спектральной плотности колебаний энергии импульсов ИБР-2М за рабочий цикл от момента выхода на мощность 2 МВт

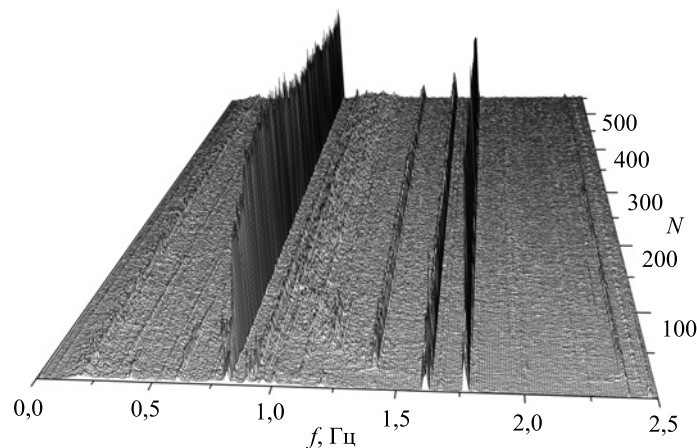


Рис. 2. Изменение спектральной плотности колебаний энергии импульсов ИБР-2М за цикл от момента выхода на среднюю мощность 2 МВт до начала снижения мощности. Длительность измерений 10,5 сут. Представлено 552 спектра

до начала снижения приведено на рис. 2. Как видно из рис. 2, в спектре колебаний энергии импульсов имеется несколько пиков большой интенсивности. Эти пики обусловлены осевыми вибрациями лопастей подвижных отражателей [2].

Задача кластерного анализа в данном случае есть классификация большого объема данных по шумовому состоянию ИБР-2М. Анализу подлежала последовательность спектральной плотности колебаний энергии импульсов. Каждая спектральная плотность оценивалась в интервале времени ~ 28 мин и представляла собой точку в многомерном евклидовом пространстве. Выбран-

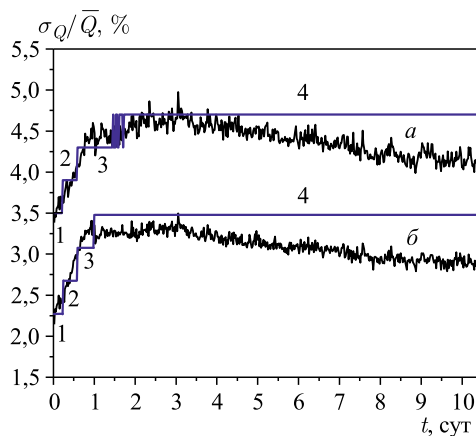


Рис. 3. Изменение величины относительного среднеквадратического отклонения полных (*a*) и связанных с осевыми вибрациями лопастей подвижных отражателей (*б*) колебаний энергии импульсов. Сплошными линиями показан переход шумового состояния реактора из одного кластера в другой. Цифрами отмечены номера кластеров

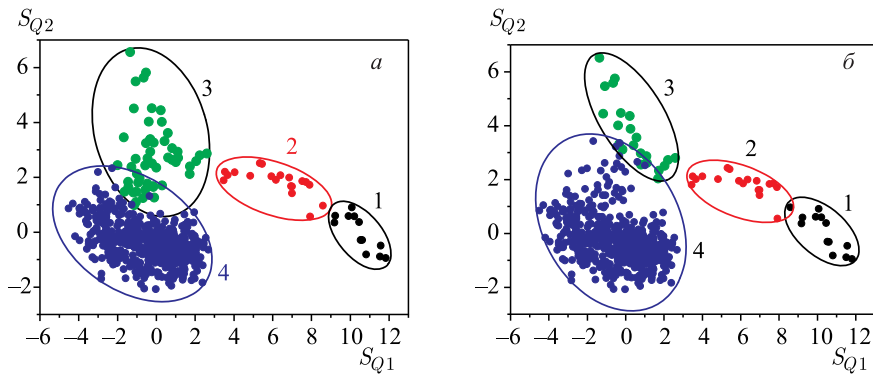


Рис. 4. Структура кластеров, сжатая из 256-мерного в 2-мерное пространство по полным колебаниям энергии импульсов (а) и по колебаниям, обусловленным осевыми колебаниями лопастей подвижных отражателей (б)

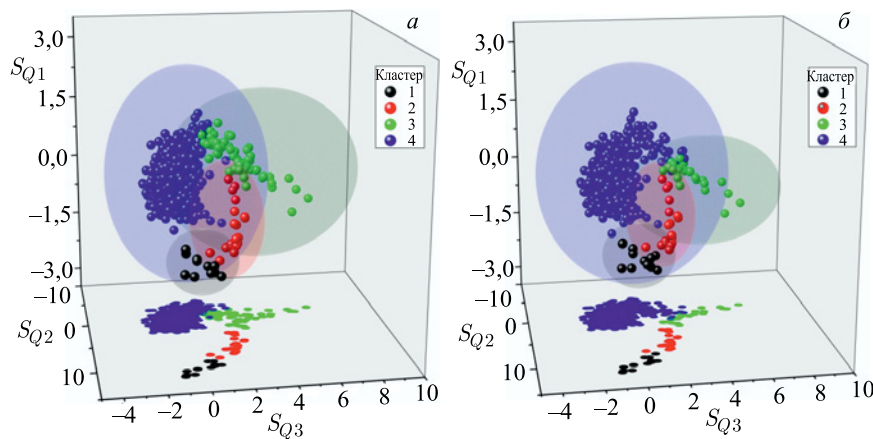


Рис. 5. Структура кластеров, сжатая из 256-мерного в 3-мерное пространство по полным колебаниям энергии импульсов (а) и по колебаниям, обусловленным осевыми колебаниями лопастей подвижных отражателей (б)

ные методы кластеризации основаны на анализе расстояний между точками. Расстояние между i -й и k -й точками

$$d_{ik} = \left[\sum_{j=1}^p (x_{ij} - x_{ik})^2 \right]^{1/2} .$$

Размерность пространства составляла 256 координат по числу точек в спектре. Изменение величины среднеквадратических полных колебаний энергии

импульсов и колебаний, связанных с вибрациями лопастей подвижных отражателей, приведено на рис. 3. Структура кластеров, «сжатая» из 256-мерного в 2- и 3-мерное пространства, приведена на рис. 4, 5. Из рис. 3 видно, что спектральная плотность колебаний энергии импульсов разделяется на четыре кластера. Первые три кластера включают в себя спектры переходной области, длящейся 1,7 сут. Четвертый (основной) кластер соответствует установившемуся шумовому состоянию реактора. Это состояние начинается через 1,7 сут от начала работы реактора на мощности и продолжается до конца реакторного цикла. Интенсивность шумов в четвертом шумовом состоянии со временем меняется с тенденцией к уменьшению на $\sim 12\%$ к концу цикла. При этом уменьшение уровня шумов слабо влияет на их спектральный состав. Таким образом, через 1,7 сут шумы мощности в целом стабилизируются.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕДЛЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ РАСХОДА НАТРИЯ ЧЕРЕЗ АКТИВНУЮ ЗОНУ

На рис. 6 показана принципиальная схема системы охлаждения реактора ИБР-2М.

Изменение расхода натрия приводит к колебаниям реактивности и, соответственно, мощности. Колебания реактивности $\rho_G(t)$ при изменении расхода от G_0 до $G(t)$ в момент времени t можно представить в виде $\rho_G(t) = dK/dG [G(t) - G_0]$, где $dK/dG = \left. \frac{\Delta K}{\Delta G} \right|_{W,T=\text{const}}$ — расходный коэффициент реактивности, т. е. изменение коэффициента размножения, отнесенное к изменению расхода натрия на входе в активную зону; $G(t)$, G_0 — текущее и среднее значения расхода натрия через АЗ соответственно. При медленном изменении мощности и расхода натрия в небольших пределах ($< 10\%$) значение расходного коэффициента реактивности можно принять равным асимптотически установившемуся: $-0,7 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}/\text{м}^3/\text{ч}$ [3, 4]. При исследовании медленных процессов изменения расхода натрия через АЗ использовался алгоритм создания нелинейной авторегрессионной сети [5]. Эта интеллектуальная система способна распознавать и прогнозировать закономерности временных рядов. Использование нейросетевой модели с обратной связью позволяет решать задачу прогнозирования на сильно зашумленных временных рядах, таких как расход натрия через активную зону ИБР-2М. В результате получаемый прогноз будет более точен по сравнению с применением обычного перцептрона [6].

Выход нейрона может быть записан в виде следующего уравнения:

$$y = g \left(b + \sum_i w_i x_i \right),$$

где g — функция активации; b — смещение (bias); w_i — весовой коэффициент, соответствующий i -му нейрону; x_i являются входами, а y пред-

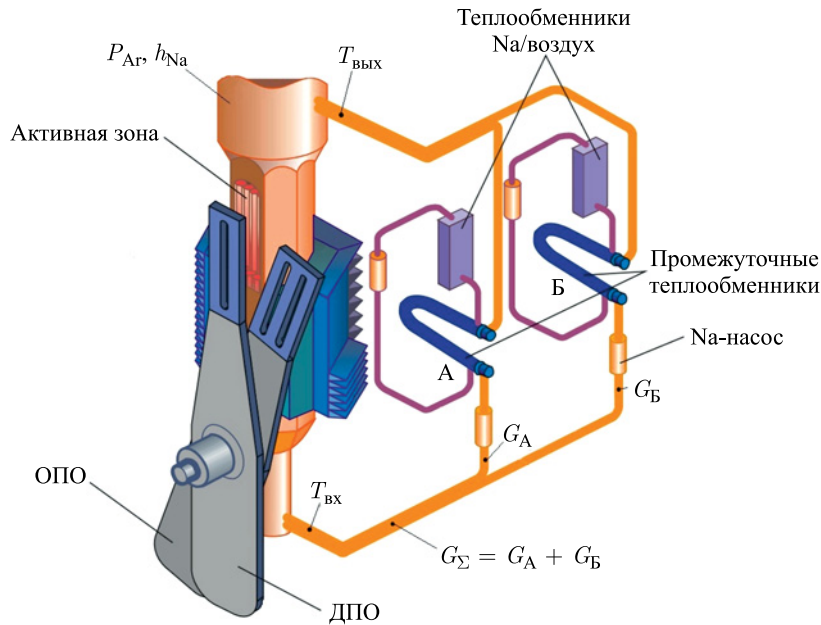


Рис. 6. Принципиальная схема системы охлаждения реактора ИБР-2М. Показаны примерные места расположения измерительных датчиков: давления аргона (P_{Ar}), уровня натрия (h_{Na}), расхода натрия (G_{Σ}) через АЗ, расхода натрия первого контура в петлях А (G_A) и Б (G_B), температуры натрия на выходе ($T_{вых}$) и входе в АЗ ($T_{вх}$)

ставляет собой выход [7–9]. В общем случае нелинейная авторегрессионная сеть (nonlinear autoregressive neural network — NAR) описывается рекуррентным уравнением

$$\hat{G}(t) = f(G(t-1) + G(t-2) + \dots + G(t-d)),$$

где $G(t)$ — входной сигнал (расход натрия через АЗ); $\hat{G}(t)$ — выходной сигнал (прогнозируемый расход натрия); f — нелинейное преобразование; d — число задержек по входному сигналу. На рис. 7 приведена архитектура используемой нелинейной авторегрессионной сети.

В приведенной модели прогнозировалось изменение расхода натрия за 2 сут с использованием значений предыдущих 2 сут. В качестве алгоритма обучения применен метод нелинейной оптимизации: алгоритм Левенберга–Марквардта (Levenberg–Marquardt) [10, 11]. На рис. 8 приведены результаты прогнозирования расхода натрия и зависимость между экспериментальными и прогнозируемыми данными. Корреляционная связь между ними оценивалась как сильная ($R = 0,98$). Спектральная плотность экспериментальных и прогнозируемых колебаний расхода натрия на входе в АЗ показаны на рис. 9. Спектральный состав и амплитуды колебаний расхода натрия практически совпадают.

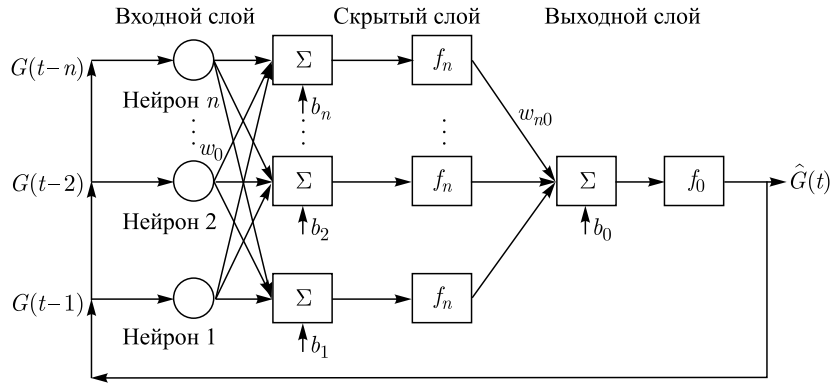


Рис. 7. Структурная схема сети NAR

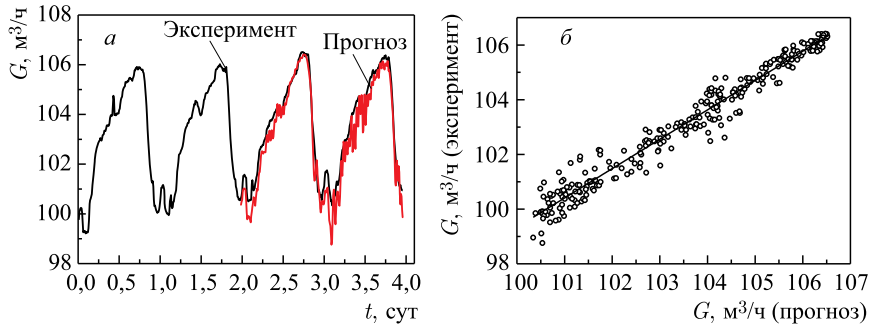


Рис. 8. Прогноз изменения расхода натрия через АЗ ИБР-2М и зависимость между экспериментальными и прогнозируемыми данными (а). Приведена линейная аппроксимация (б)

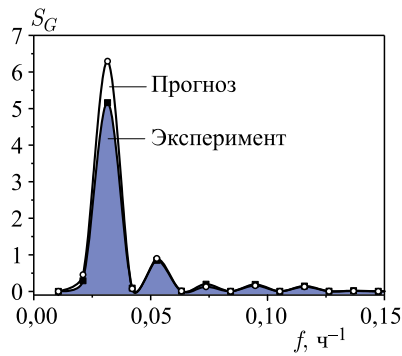


Рис. 9. Спектральные плотности колебаний расхода натрия через АЗ (S_G), f — частота: ■ — эксперимент; ○ — прогноз

ВЫВОД

В результате кластерного анализа показано, что шумы энергии импульсов последовательно разделяются на четыре устойчивые структуры (кластеры). Первые два кластера наблюдаются в диапазоне 0–14 ч после выхода на мощность. Затем через 1,2 сут переходная область заканчивается, и в целом через 1,7 сут после выхода на мощность шумовое состояние реактора стабилизируется. Переходная область реакторных шумов, вероятнее всего, связана с появлением изгибных деформаций подвижных отражателей в процессе их прогрева после выхода на мощность.

В результате моделирования расхода натрия с помощью нелинейной авторегрессионной нейронной сети было показано, что с погрешностью $\sim 5\%$ можно предсказывать изменение расхода на довольно больших интервалах времени вплоть до 2 сут.

Показано, что в задаче шумовой диагностики ИБР-2М применение авторегрессионных нейронных сетей и иерархических процедур кластерного анализа позволяет получить более детальную информацию, чем с помощью стандартных методов анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д., Цогтсайхан Ц.* Статистический анализ флуктуаций энергий импульсов реактора ИБР-2М. Сообщ. ОИЯИ Р13-2012-131. Дубна, 2012.
2. *Ананьев В. Д. и др.* Энергетический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Сообщ. ОИЯИ Р13-2012-42. Дубна, 2012.
3. *Ананьев В. Д. и др.* Физический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Сообщ. ОИЯИ Р13-2012-41. Дубна, 2012.
4. *Ананьев В. Д. и др.* Физический пуск импульсного исследовательского реактора ИБР-2. Сообщ. ОИЯИ Р13-12482. Дубна, 1979.
5. *Ljung L.* System Identification: Theory for the User. 2nd ed. Prentice Hall PTR, 1998.
6. *Giles L. C., Lawrence S., Ah Chung Tsoi.* Noisy Time Series Prediction Using Recurrent Neural Networks and Grammatical Inference // Machine Learning. 2001. V. 44. P. 161–183.
7. *Anil K. Jain, Jian Chang Mao, Mohiuddin K. M.* Artificial Neural Networks: A Tutorial // IEEE Computer. 1996. V. 29, No. 3. P. 31–44.
8. *Ахтеров А. В., Кирильченко А. А.* Основы теоретической робототехники. Искусственные нейронные сети (обзор). М.: ИМП им. М. В. Келдыша РАН, 2008.
9. *Haykin S.* Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2nd ed. Prentice Hall, 1998.
10. *Levenberg K.* A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares // Quart. Appl. Math. 1944. V. 2. P. 164–168.
11. *Marquardt D.* An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters // SIAM J. Appl. Math. 1963. V. 11. P. 431–441.

Получено 8 июня 2015 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 13.08.2015.

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

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,87. Тираж 245 экз. Заказ № 58613.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/