

DOI: 10.25728/mlsd.2023.3393

**АНАЛИЗ АППРОКСИМИРУЮЩИХ И ДЕТАЛИЗИРУЮЩИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ
ВЕЙВЛЕТ-РАЗЛОЖЕНИЯ В АЛГОРИТМЕ ПРОГНОЗА РИСКОВОГО ПОТЕНЦИАЛА****Абдулова Е.А.***Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*
consoft@ipu.ru

Аннотация. Статья посвящена проблемам информационной задачи СВБУ «Расчет и анализ технико-экономических показателей» и построению для этой задачи мгновенных прогнозирующих моделей на основе критических параметров энергоблока. В статье также рассмотрен модифицированный алгоритм оценки рисков потенциала технологического процесса.

Ключевые слова: мгновенная прогнозирующая модель, кластеризация, рисковый потенциал, технико-экономические показатели, энергоблок.

Введение

Современный этап развития промышленности был бы невозможен без широкого применения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), выполняющих управляющие, информационные и вспомогательные функции. Критически важные объекты атомной промышленности не являются исключением. Система верхнего блочного уровня АСУ ТП (СВБУ) на атомных электростанциях представляет собой систему автоматического сбора, хранения и представления информации о текущем состоянии объектов технического контроля (ОТК) [1, 2] и автоматического дистанционного формирования команд управления механизмами ОТК по алгоритмам АСУ ТП [3] предназначена для реализации вспомогательных функций, передачи команд оператора для управления техническими процессами и техническим оборудованием, контроля состояний АСУ ТП, интеграции информации об энергетическом оборудовании из системы АСУ ТП, контроля и управление энергоблоком. Одной из информационных задач, решаемых СВБУ, является задача расчета технико-экономических показателей (ЗИ-ТЭП) [4].

Многие атомные электростанции, включая гибридные, для анализа эффективности используют простые технико-экономические показатели использования ресурсов [5, 6]. Теоретически эффективность энергоблока, связанная с любым аспектом эксплуатации энергоблока, имеет определенную степень экономических последствий [7].

Расчет и анализ технико-экономических показателей (ТЭП) является одной из информационных задач АСУ ТП [1, 3]. Основными задачами этой задачи являются: автоматическое получение ТЭП, характеризующих фактические показатели работы энергоблока и его отдельных компонентов; автоматический расчет типовых ТЭП для энергоблока и его отдельных компонентов; информация о тепловых показателях работы энергоблока для различных уровней управления; автоматический расчет типовых ТЭП для энергоблока и его отдельных компонентов. В соответствии с этими целями был разработан типовой алгоритм расчета ТЭП электростанций с реакторами ВВЭР-1000 [8, 9].

Для расчета выходных параметров информационной задачи ТЭП, характеризующих текущее состояние энергоблока, требуется большое количество дискретных и аналоговых входных сигналов. Поэтому недостоверность хотя бы одного из входных сигналов приводит к исключению из расчета параметра, связанного с этим сигналом. Расчет технико-экономических показателей блокируется, если хотя бы один из важнейших параметров производственного блока (расход питательной воды парогенераторов (ПГ) 1-4, температура питательной воды ПГ 1-4, мощность генератора (активная)) отсутствует или недостоверен. Проблема неполной оценки параметров ЗИ-ТЭП при отсутствии/недостоверности или подмене некоторых сигналов, не попадающих в вышеуказанные категории может быть решена, если входными векторами задачи являются важными параметрами энергоблока, на основе мгновенных прогнозирующих моделей [10] или модели на основе нейронных

сетей [11-13]. Следует отметить, что временные ряды сигналов датчиков генерируются сложными и плохо изученными нелинейными явлениями и несанкционированным вмешательством в работу систем, которые вызывают нестабильности различного характера в ходе технологического процесса.

Прогнозирующие модели позволяют проводить мониторинг эффективности функционирования энергоблока и определять рисковый потенциал технологического процесса, а в совокупности определять вероятность выхода технологического процесса за технологические пределы.

1. Алгоритм оценки рискового потенциала

В основу мгновенных прогнозирующих моделей положены стандартизованные модели вида [14]:

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^m \hat{a}_i \hat{y}(t-i) + \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{r_s} \hat{b}_{s,j} \hat{x}(t-j)_s, \quad (1)$$

где \hat{y} – прогноз выхода модели в момент времени t , x – входы модели, m – глубина памяти модели по выходной переменной, r_s – глубина памяти модели по входам ($R = \max_{s=1,S} r_s$), S – размерность вектора входов, \hat{a}_i , $\hat{b}_{s,j}$ – настроечные коэффициенты модели, $\hat{x}(t-j)_s$ и соответствующие им $\hat{y}(t-i)$ выбираются из базы данных энергоблока не в хронологическом порядке.

На рис. 1 представлен модифицированный алгоритм оценки рискового потенциала.



Рис. 1. Модифицированный алгоритм прогноза рискового потенциала

В Таблице 1 приведены показатели Херста для измеряемых параметров прогнозной модели температуры питательной воды за подогревателем высокого давления (T_{HPH}) вида (1) на основе базы данных технологического процесса со структурой определенной в [14] на основе корреляционного анализа и информационных мер зависимости [15, 16]. Показатели Херста рассчитаны на основе R/S анализа, где R – нормированный размах вариации, а S – стандартное отклонение. На рис. 2 приведен пример зависимости нормированного размаха от объема выборки для T_{HPH} . Анализ показатели

Херста для измеряемых параметров прогнозной модели на основе [10, 17] позволяет сделать вывод, что изменения параметров прогнозной модели относятся к персистентным процессам, обладающим эффектом долговременной памяти.

Таблица 1. Показатели Херста для измеряемых параметров прогнозирующей модели

T_{HPH}	Изменяемые параметры мгновенной прогнозирующей модели				
	T_1	T_2	T_3	T_4	N
0.843	0.823	0.821	0.791	0.715	0.843

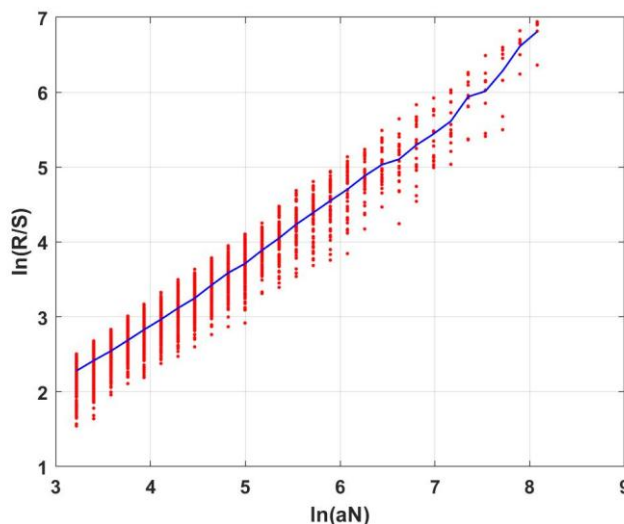


Рис. 2. Зависимость нормированного размаха от объема выборки для T_{HPH}

В работах [18, 19] приводится сравнение с указанием преимуществ и недостатков наиболее встречающиеся алгоритмы кластеризации. Применение кластеризации в алгоритме прогноза рискованного потенциала в общем виде сводится к этапам представленным на рис. 3.

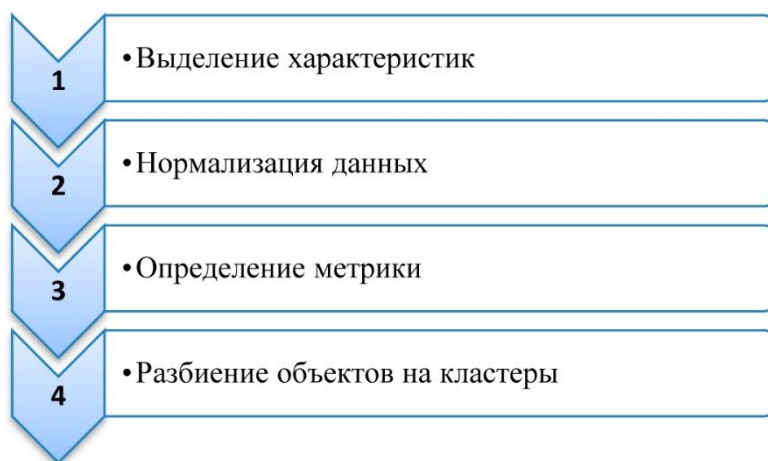


Рис. 3. Этапы кластеризации

2. Мгновенная прогнозирующая модель

В работе [14] представлена прогнозирующая модель для одного из важных параметров информационной задачи – температуры питательной воды за подогревателем высокого давления, зависящая только от критических параметров энергоблока:

$$Y_{predictive}(t) = T_{HPH}(t) = \sum_{j=1}^4 (b_j T_1(t-j) + b_{j+4} T_2(t-j) + b_{j+8} T_3(t-j) + b_{j+12} T_4(t-j) + b_{j+16} N_a(t-j)) \quad (2)$$

где температуры питательной воды в парогенераторах ($T_m(t-j)$, $m = \overline{1,4}$ – номер парогенератора и активной мощности генератора N_a), которые выбираются не в хронологическом порядке, $(t-j)$ –

момент времени, j – глубина предыстории. На рис. 4 представлен вариант выбора 28 векторов (V_k , k – номер в базе данных) из технологического архива для формирования текущей мгновенной модели.

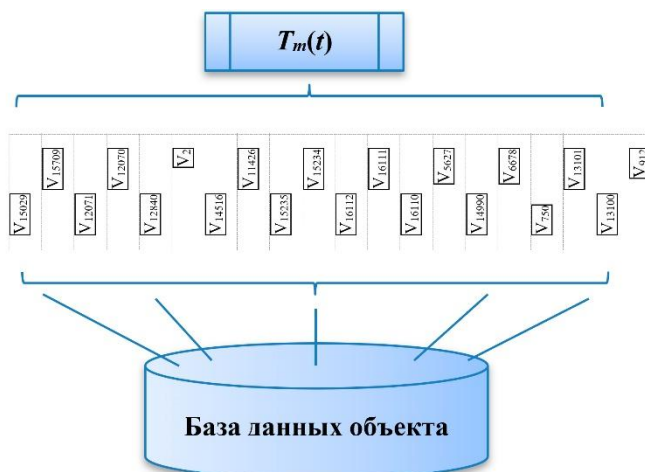


Рис. 4. Пример выборки векторов близких в смысле метрики состояний

В таблице 2 приведены результаты выборки 28 векторов с характеристиками, соответствующими структуре модели, для построения мгновенной прогнозной модели, полученной в результате кластеризации с использованием метрики манхэттенское расстояние. Данные вектора имели минимальные расстояния до точки с характеристиками, приведенными в Таблице 3.

Таблица 2. Выборка данных из базы технологического процесса и значение метрики [20]

N_{base}	$T_1(t-1)$	$T_2(t-1)$	$T_3(t-1)$	$T_4(t-1)$	$N(t-1)$	$T_1(t-2)$	$T_2(t-2)$	$T_3(t-2)$	$T_4(t-2)$	$N(t-2)$	$T_1(t-3)$	$T_2(t-3)$	$T_3(t-3)$	$T_4(t-3)$	$N(t-3)$	$T_1(t-4)$	$T_2(t-4)$	$T_3(t-4)$	$T_4(t-4)$	$N(t-4)$	$T_{\text{min}}(t)$	r
3	223,125	223,438	227,188	230,625	1013,61	223,125	223,438	227,188	230,625	1013,61	223	223,375	227,188	230,125	1011,01	223	223,375	227,188	230,125	1012,96	203,4	230,125
13100	223,125	223,312	227,188	230,375	1012,96	223,125	223,312	227,188	230,375	1012,96	223	223,375	227,188	230	1012,96	223	223,375	227,188	230	1012,96	203,312	234,215
16324	223	223,312	227,062	230,5	1012,96	223,25	223,312	227,25	230,5	1012,96	223,125	223,375	227,312	230,125	1012,96	223,062	223,375	227,25	230,125	1012,96	203,346	234,742
16111	223	223,312	227,25	230,312	1013,61	223	223,312	227,25	230,312	1013,61	223	223,375	227,188	230,125	1013,61	223	223,375	227,188	230,125	1013,61	203,271	234,756
12071	223	223,312	227,125	230,375	1013,61	223	223,312	227,125	230,375	1013,61	223	223,375	227,125	230,125	1013,61	223	223,375	227,25	230,125	1013,61	203,2	234,828
13101	222,875	223,375	227,188	230,375	1012,96	223,125	223,312	227,188	230,375	1012,96	223,125	223,312	227,188	230,375	1012,96	223	223,375	227,188	230	1012,96	203,312	234,965
14928	223	223,438	227,125	230,125	1013,61	223,062	223,375	227,188	230,25	1013,61	223,062	223,375	227,188	230,25	1013,61	223,062	223,375	227,188	230,25	1013,61	203,329	235,009
12070	223	223,312	227,125	230,375	1013,61	223	223,375	227,125	230,125	1013,61	223	223,375	227,25	230,125	1013,61	223	223,375	227,25	230,125	1013,61	203,2	235,014
16112	223	223,312	227,25	230,312	1013,61	223	223,312	227,25	230,312	1013,61	223	223,312	227,25	230,312	1013,61	223	223,375	227,188	230,125	1013,61	203,271	235,068
16110	223	223,312	227,25	230,312	1013,61	223	223,375	227,188	230,125	1013,61	223	223,375	227,188	230,125	1013,61	223,062	223,312	227,25	230,188	1013,61	203,271	235,068
13551	223	223,375	227,062	230	1014,26	223	223,312	227,25	230,25	1014,26	223	223,312	227,25	230,25	1011,66	223	223,312	227,25	230,25	1011,66	203,413	235,515
2	223,125	223,438	227,188	230,625	1013,61	223	223,375	227,188	230,125	1011,01	223	223,375	227,188	230,125	1012,96	223	223,375	227,188	230,125	1012,96	203,237	235,526
15235	223	223,312	227,125	230,125	1012,31	223	223,312	227,125	230,125	1012,96	223	223,375	227,125	230,062	1012,96	223	223,375	227,125	230,062	1012,96	203,258	235,921
14516	222,875	223,188	226,938	230,062	1012,96	223,062	223,312	227,125	230,125	1012,96	223,062	223,312	227,125	230,125	1012,96	223,062	223,312	227,125	230,125	1012,96	203,238	235,978
912	223,062	223,375	227,188	229,938	1012,31	223,062	223,375	227,188	230,125	1012,31	223	223,375	227,25	230,125	1012,31	223	223,375	227,25	230,125	1012,31	203,325	236,313
15234	223	223,312	227,125	230,125	1012,96	223	223,375	227,125	230,062	1012,96	223	223,375	227,125	230,062	1012,96	223	223,375	227,125	230,062	1014,26	203,258	236,571
6678	222,938	223,312	227,062	230,5	1015,56	222,938	223,312	227,062	230,5	1012,31	222,938	223,375	227,062	230,062	1012,31	223,062	223,375	227,188	230,062	1012,31	203,283	236,82
15029	223	223,375	227,062	230,062	1011,01	223	223,312	227,125	230,125	1011,01	223	223,312	227,125	230,125	1011,01	223	223,312	227,125	230,125	1012,96	203,188	237,48
750	223	223,25	227,188	230,125	1011,01	223	223,375	227,25	230,188	1011,01	223	223,375	227,25	230,188	1010,36	223	223,375	227,25	230,188	1012,96	203,3	237,825
14990	223	223,375	226,938	230	1011,66	223	223,375	227,125	230,062	1010,36	223	223,375	227,125	230,062	1010,36	223	223,375	227,125	230,062	1012,96	203,275	238,103
5627	223	223,375	227,062	230,375	1016,21	223	223,375	227,25	230,125	1011,01	223	223,375	227,25	230,125	1011,01	223	223,375	227,25	230,125	1011,66	203,271	238,192
14929	223	223,438	227,125	230,125	1009,71	223	223,438	227,125	230,125	1013,61	223,062	223,375	227,188	230,25	1013,61	223,062	223,375	227,188	230,25	1013,61	203,35	239,075
8052	222,875	223,375	227	230,5	1011,66	223	223,375	227,188	230	1011,66	223	223,375	227,188	230	1007,76	223	223,375	227,188	230	1013,61	203,337	239,427
11426	223,125	223,375	227,312	230,062	1011,01	223,125	223,375	227,312	230,062	1016,86	223,125	223,375	227,312	230,062	1012,31	223	223,375	227,125	230,062	1012,31	203,25	239,887
1413	223	223,375	227,062	230,25	1009,71	223	223,375	227,062	230,25	1009,71	223	223,375	227,125	230,375	1011,66	223,062	223,375	227,25	230,188	1011,66	203,471	241,824
15709	223	223,312	227,125	230	1009,71	223	223,312	227,125	230,062	1009,71	223	223,312	227,125	230,062	1009,71	223	223,312	227,125	230,062	1013,61	203,2	242,143
12840	222,938	223,375	227,188	230	1018,17	223	223,438	227,062	230,312	1009,71	223,062	223,375	227,125	230,125	1011,66	223,062	223,375	227,125	230,125	1011,66	203,233	242,391
14930	223	223,25	227,125	230,25	1009,71	223	223,438	227,125	230,125	1009,71	223	223,438	227,125	230,125	1013,61	223,062	223,375	227,188	230,25	1013,61	203,35	242,977

На рис. 5 представлено сравнение работы мгновенной прогнозирующей модели и расчетного показателя, полученного на основе текущих достоверных величин в соответствии с типовым алгоритмом расчета ТЭП, основанным на балансовых соотношениях [8, 9]. Стоит отметить, что критические параметры работы ТЭП, которые входят в структуру мгновенной прогнозирующей модели, не являются входными данными для алгоритма ТЭП, основанного на балансовых соотношениях.

Таблица 3. Входные данные для построения выборки

$T_1(t-1)$	$T_2(t-1)$	$T_3(t-1)$	$T_4(t-1)$	$N(t-1)$	$T_1(t-2)$	$T_2(t-2)$	$T_3(t-2)$	$T_4(t-2)$	$N(t-2)$	$T_1(t-3)$	$T_2(t-3)$	$T_3(t-3)$	$T_4(t-3)$	$N(t-3)$	$T_1(t-4)$	$T_2(t-4)$	$T_3(t-4)$	$T_4(t-4)$	$N(t-4)$	$T_{imp}(t)$
223,125	223,438	227,188	230,625	1013,61	223,125	223,438	227,188	230,625	1013,61	223	223,375	227,188	230,125	1011,01	223	223,375	227,188	230,125	1012,96	203,4

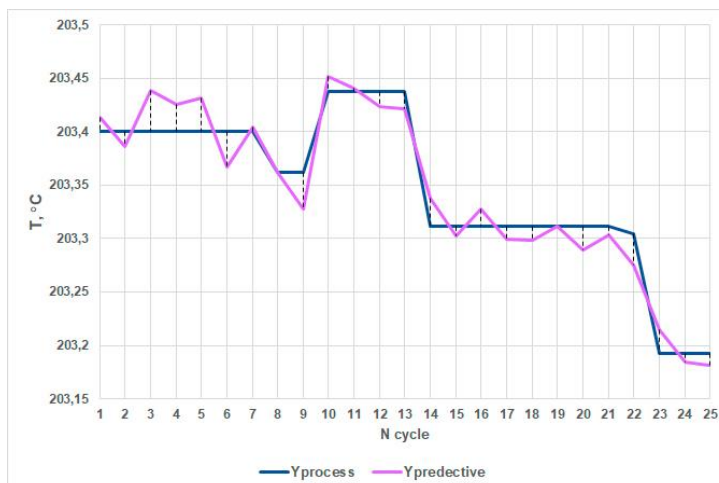


Рис. 5. Сравнение прогнозируемой и реальной величин

3. Анализ аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения

На рис. 6 представлена выборка из базы данных объекта (а) и их детализирующих коэффициентов при разложении временного ряда выходного параметра модели по вейвлетам Хаара до уровня $L = 12$. Анализ статистических характеристик коэффициентов детализации и аппроксимации для входных и выходных векторов модели показал, что плотность распределения вероятностей мгновенных значений коэффициентов детализации и аппроксимации хорошо описываются гауссовским законом для 1го и 2го уровней разложения. В [21] на рис. 7-22 представлены гистограммы детализирующих коэффициентов параметров модели (2).

Применение модификации алгоритма оценки рискового потенциала (рис. 1) позволило улучшить качество прогнозирующих моделей вида (1) и соответственно повысить точность оценки рискового потенциала протекающего процесса (рис. 7).

4. Заключение

Мониторинг состояния энергоблока АЭС на основе мгновенных прогнозирующих моделей (1) позволяет выявлять изменения различного характера в протекающих процессах, оценивать рисковый потенциал процессов, несмотря на наличие недостоверных или подмененных сигналов. Разработанный подход внедряется в комплекс информационных задач систем верхнего уровня объектов критической инфраструктуры [1, 2], а также может быть применен в оценке защищенности энергоблоков АЭС [22].

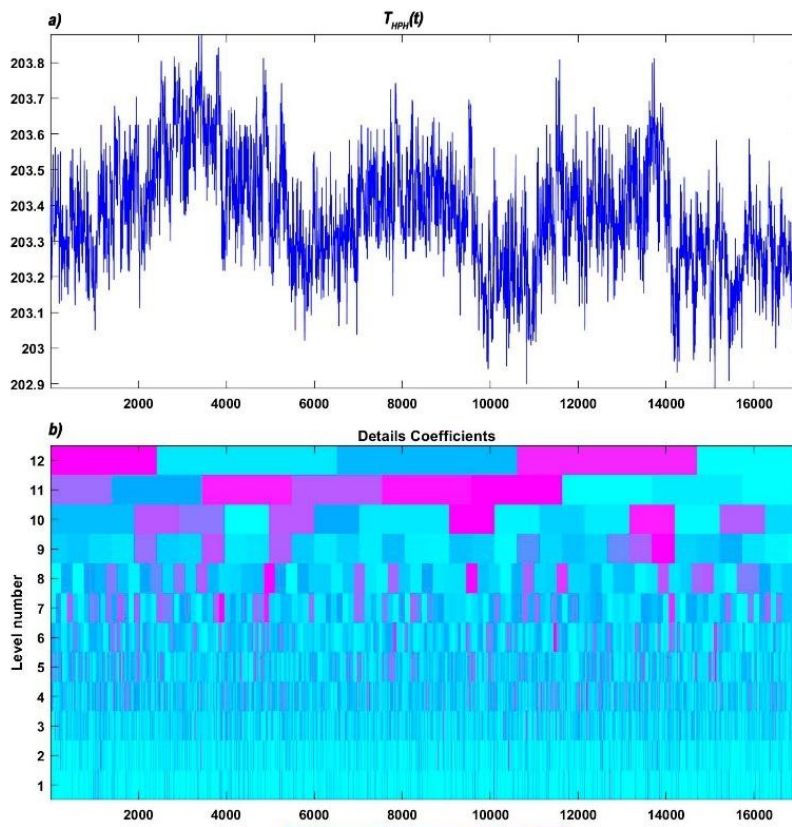


Рис. 6. Выходной параметр прогнозирующей модели $T_{НРН}(t)$ и его детализирующие коэффициенты при разложении по вейвлетам Хаара

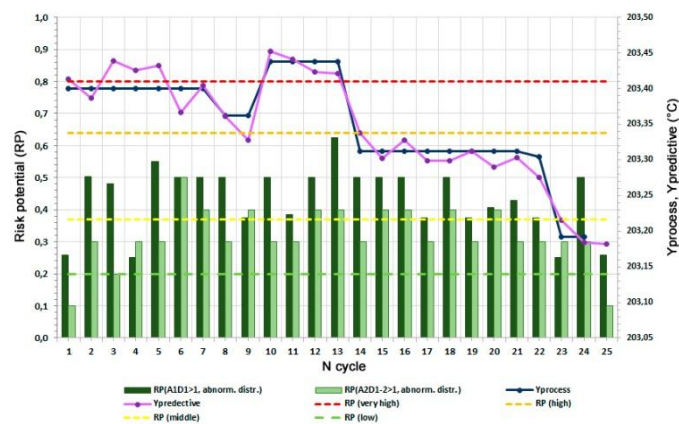


Рис. 7. Выход мгновенной прогнозирующей модели $T_{НРН}(t)$ и рискный потенциал

Литература

1. Бывайков М.Е., Жарко Е.Ф., Менгазетдинов Н.Э., Полетыкин А.Г., Прангишвили И.В., Промыслов В.Г. Опыт проектирования и внедрения системы верхнего блочного уровня АСУ ТП АЭС // Автоматика и телемеханика. – 2006. – Т. 5. – С. 65-79.
2. Полетыкин А.Г., Бывайков М.Е., Менгазетдинов Н.Э., Байбулатов А.А. Основные решения по созданию системы верхнего (блочного) уровня АСУ ТП АЭС // Ядерные измерительно-информационные технологии – 2004. – N 1. – С. 3–16.
3. Полетыкин А.Г., Жарко Е.Ф., Менгазетдинов Н.Э., Промыслов В.Г. Новое поколение систем верхнего уровня и концепция Industry 4.0 // Материалы 10-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2017, Москва). – М.: ИПУ РАН, 2017. – Т. 1. – С. 101–107.
4. Jharko E. Calculation of Technical end Economical Indeces for the “Kudankulam” NPP // IFAC Proceedings Volumes. – 2013.– Vol. 46(9). – P. 1085–1090.
5. Adamov E., Rachkov V. “Proryv” project: Inherent safety principles implementation in a new technology platform of the nuclear power industry // Nuclear engineering and design. – 2021. – Vol. 384:111444.

6. *Zhang T.* Techno-economic analysis of a nuclear-wind hybrid system with hydrogen storage // *Journal of Energy Storage*. – 2022 – Vol: 46:103807.
7. Technical Reports Series No. 437, Economic Performance Indicators for Nuclear Power Plants, IAEA. Vienna. 2006.
8. *Жарко Е.Ф.* Системы информационной поддержки операторов АЭС и задача ТЭП // *Материалы 10-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2017, Москва)*. М.: ИПУ РАН, 2017. – Т. 2. – С. 233–236.
9. *Jharko E.* Calculating Technical and Economical Indexes and Providing Normal NPP Operation // *IFAC-PapersOnLine*. – 2017. – Vol. 50(1). – P. 15586–15591.
10. *Sakrutina E.* Assessing Risk Potential of Critical Infrastructure of NPP: Fractal Analysis and Multiple-Scale Wavelet Transform // *2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. – Sochi, Russia, 2020. – P. 476–481.
11. *Chen J., Zhu Q., Su Y.* Predictive model of artificial neural network for disaster prevention // *Proc. of the 2010 2nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering*. – 2010. – P. 365–369.
12. *Ghenai C., Husein L.A., Al Nahlawi M., Hamid A.K., Bettayeb M.* Recent trends of digital twin technologies in the energy sector: A comprehensive review // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. – 2022. – Vol. 54:102837.
13. *Kuvayskova Y., Krashennnikov V., Subbotin A.* Forecasting the Technical State of an Object Based on the Composition of Machine Learning Methods // *2021 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*. – Samara, Russian Federation, 2021. – P. 1–5.
14. *Абдулова Е.А.* Модификация алгоритма оценки рисков потенциала процессов: детализирующие коэффициенты кратко-масштабного вейвлет-преобразования // *Труды 15-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2022)*. – М.: ИПУ РАН, 2022. – С. 1006–1012.
15. *Chernyshov K.R.* Applying Tsallis Divergence to Proteins Organization Prediction Problems // *IFAC-PapersOnLine*. – 2022. – Vol. 55(7). – P. 513–519.
16. *Chernyshov K.R.* Towards an Extension and Normalization of the Random Vector Anisotropy Magnitude // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2022. – Vol. 364. – P. 200–208.
17. *Crownover R.M.* Introduction to fractals and chaos. Jones and Bartlett books in mathematics, Math Series; First Edition. 1995.
18. *Tay M., Senturk A.* Energy-Aware Clustering Algorithms Used in Wireless Sensor Networks // *2019 Scientific Meeting on Electrical-Electronics & Biomedical Engineering and Computer Science (EBBT)*. – 2019. – P. 1–4.
19. *Al-Sulaifanie A.I., Al-Sulaifanie B.K., Biswas S.* Recent trends in clustering algorithms for wireless sensor networks: A comprehensive review // *Computer Communication*. – 2022. – Vol. 191. – P. 395–424.
20. *Abdulova E.* Modification of the Risk Potential Predicting Algorithm for Monitoring the State of the NPP Power Unit // *2023 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)*. – Sochi, Russian Federation, 2023. – P. 675-679.
21. *Abdulova E.* Estimating Risk Potential of Processes and Detailing Coefficients of Multiple-Scale Wavelet Transform // *2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. – Sochi, Russian Federation, 2022. – P. 722–727.
22. *Промыслов В.Г., Абдулова Е.А., Жарко Е.Ф., Исхаков А.Ю., Мещеряков Р.В., Полетыкин А.Г., Семенов К.В., Акимов Н.Н., Голубев П.А., Лепехин И.Ю.* Оценка риска и обеспечение кибербезопасности атомных электростанций // *Труды 15-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2022)*. – М.: ИПУ РАН, 2022. – С. 139–147.