

СЕКЦИЯ 11: УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ДРУГИМИ ОБЪЕКТАМИ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ

АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ РИСКОВОГО ПОТЕНЦИАЛА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ АЭС

Абдулова Е.А.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д.65*

consoft@ipu.ru

Аннотация: В рамках расчетной задачи «Расчет ТЭП» предложен метод прогнозирования показателей (даже в случае отсутствия или недостоверности ряда входных сигналов, связанных с их расчетом) на примере прогноза температуры питательной воды за ПВД5, а также оценка рискового потенциала в части этого показателя.

Ключевые слова: рисковый потенциал, кратно-масштабное вейвлет-преобразование, условия устойчивости, прогнозирующие модели, технологический процесс.

Введение

Свойства критической информационной инфраструктуры (КИИ) [1] требуют рассмотрения ее связи с физической инфраструктурой объекта. Необходимо рассматривать взаимодействие КИИ с физической инфраструктурой объекта, которое проявляется в различных формах, от необходимости удовлетворять строгим ограничениям в реальном времени до понимания того, как сам объект влияет на компоненты информационно-технологической инфраструктуры и наоборот. Компьютерные атаки на инфраструктуру значимых объектов КИИ (ЗОКИИ), к которым могут привести к тому, что параметры технологического процесса выйдут за установленные технологические пределы, и могут вызвать нештатные ситуации с серьезными последствиями. В связи с тем, что использование компьютерных сетей в настоящее время стало одним из основных элементов ЗОКИИ, вмешательство в функционирование этих сетей может иметь серьезные последствия для состояния объектов КИИ. В связи с этим основной задачей в данной области является создание системы мониторинга угроз безопасности, основанной на процессах идентификации и управления рисками [2-5] и прогнозирования хода технологических процессов, в том числе на основе интеллектуального анализа данных.

Эволюцию автоматизации ЗОКИИ можно характеризовать как тенденцию развития систем автоматизированного управления технологическими процессами (АСУ ТП) с учетом новых разработок в области критической инфраструктуры и ее автоматизации [6-8]. Для АСУ ТП, который применяются от крупных производственных и энергетических объектов до систем умного дома, защищаемым ресурсом является технологический процесс, и основной целью является гарантия его непрерывности и целостности.

В настоящее время растет интерес к использованию методов диагностики состояния оборудования и хода технологического процесса для обнаружения вторжений в системы, важные для безопасности для повышения кибербезопасности атомных электростанций (АЭС) [9, 10], которые относятся к критической инфраструктуре.

В настоящей работе рассмотрена прогнозирующая виртуальная модель температуры питательной воды за пароперегревателем высокого давления 5 (ПВД5), являющейся одной из характеристик работы энергоблока и вычисляемой в рамках одной из задач системы верхнего блочного уровня АСУ ТП АЭС.

1 Объект управления и проблема частичной оценки показателей технологического процесса

Системная архитектура системы верхнего блочного уровня (СВБУ) АЭС [6, 7] (предназначенной для управления энергоблоками АЭС с реакторами ВВЭР-1000, типовая тепловая схема которых представлена на рис. 1) и внутренние функции безопасности гарантируют устойчивость к кибератакам и обнаружение нарушений безопасности до того, как они приведут к отказу технологического оборудования и нарушению функций системы.

Прикладное программное обеспечение СВБУ включает информационную задачу «Расчет ТЭП» (ТЭП) с алгоритмами, основанными на интеллектуальном анализе данных [11] и моделями прогнозирования рискового потенциала [12]. Задача ТЭП [13, 14] является сильно связанной и отсутствие и/или недостоверность входных сигналов может привести к недоступности вычислений для 25-50% выходных параметров, связанных с недоступным и/или недостоверным сигналом. Это приводит к тому, что недостоверность хотя бы одного из входных сигналов сводится к исключению из расчета параметров, связанных с этим сигналом [16]. В случае отсутствия или недостоверности хотя бы одного их важнейших параметров энергоблока (расходы питательной воды в парогенераторы (ПГ) 1-4, температура питательной воды ПГ 1-4, мощность генератора (активная)) расчет технико-экономических показателей блокируется. На рис. 2 показан пример вывода в видеокadres неполных результатов вычислений (пурпурные поля показывают поле расчетных значений, для которых не были доступны все входные сигналы).

Проблема неполного расчета технико-экономических показателей (ТЭП) в случае недоступности или замены некоторых сигналов, не относящихся к важным параметрам энергоблока, может быть решена на основе метода построения мгновенных моделей (виртуальных моделей) [11] или моделей построенных на основе нейронных сетей [15], при условии, что входными векторами будут важные параметры энергоблока.

Прогнозирующая мгновенная модель параметров ТЭП позволит вычислить все показатели, даже при недоступности или неопределенности некоторых сигналов. Модель также оценивает рисковый потенциал выхода параметров за технологические пределы.

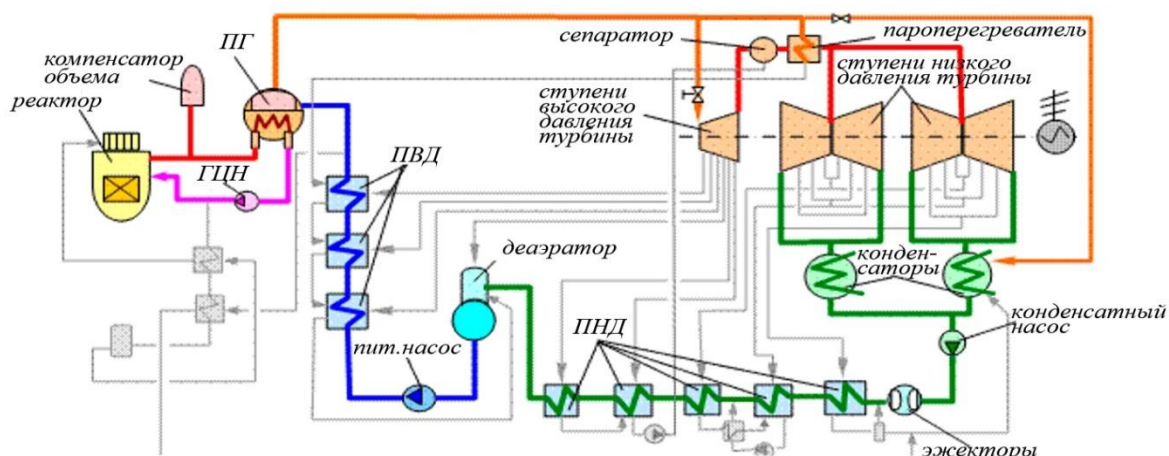


Рис. 1. Типовая тепловая схема АЭС с реактором типа ВВЭР-1000

X HPR		N _{EL} 829_5			
HPR analysis					
No	Parameter	Units	Value actual	Value standard	Changes in efficiency kJ/kWh
1	Feedwater temperature after HPR -5A	C	191.2	169.7	0.000
2	Feedwater temperature after HPR -5B	C	192.0	169.7	0.000
3	Feedwater temperature after HPR -6A	C	209.9	187.4	0.000
4	Feedwater temperature after HPR -6B	C	210.8	187.4	0.000
5	Steam temperature to HPR -5A	C	179.7	181.8	0.000
6	Steam temperature to HPR -5B	C	179.7	181.7	0.000
7	Steam temperature to HPR -6A	C	196.4	144.9	0.000
8	Steam temperature to HPR -6B	C	196.0	202.0	0.000
9	Changes in efficiency				0.000
10	Feedwater flow before HPR -A	t/h	1595		
11	Feedwater flow before HPR -B	t/h	2214		
12	Feedwater temperature after A-bypass	C	210.8		
13	Feedwater temperature after B-bypass	C	151.2		
14	Feedwater temperature	C	215.9	208.6	
15	HPR -A working hours	h	0.250		
16	HPR -B working hours	h	0.250		

Рис. 2. Пример представления неполного расчета показателей на видеокadre “HPR analysis”

2 Общий вид прогнозирующей мгновенной модели

Пусть прогнозирующая мгновенная модель в стандартизованном масштабе [17] задана следующим образом:

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

где $\hat{y} = (y - M[y]) / \sigma_y$ – прогноз выхода объекта в момент времени t , $\hat{x} = (x - M[x]) / \sigma_x$ – вектор входов мгновенной модели, $M[\hat{y}] = M[\hat{x}] = 0$, $\sigma_{\hat{y}} = \sigma_{\hat{x}} = 1$, m – глубина памяти по выходу модели, r_s – глубина памяти по входу модели ($R = \max_{s=1,S} r_s$), s – размерность вектора входов, $\hat{a}_i, \hat{b}_{s,j}$ – стандартизованные коэффициенты (настраиваемые коэффициенты для каждого момента времени), $\hat{x}(t-j)_s$, и соответствующие им $\hat{y}(t-i)$ выбираются из базы данных объекта не в хронологическом порядке.

Текущий входной вектор и прогнозируемый выход представим в виде кратно-масштабного вейвлет-преобразования:

$$\hat{x}(t) = \sum_{k=1}^N c_{L,k}^{\hat{x}}(t) \varphi_{L,k}(t) + \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^N d_{l,k}^{\hat{x}}(t) \psi_{l,k}(t) \quad (2)$$

$$\hat{y}(t) = \sum_{k=1}^N c_{L,k}^{\hat{y}}(t) \varphi_{L,k}(t) + \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^N d_{l,k}^{\hat{y}}(t) \psi_{l,k}(t) \quad (3)$$

где: L – глубина кратно-масштабного разложение ($1 \leq L \leq L_{max}$, где $L_{max} = \log_2 N^*$, и N^* – мощность множества состояний в базе данных); $\psi_{l,k}(t)$ –вейвлет-функции; $\varphi_{L,k}(t)$ – масштабирующие функции; l – уровень детализации анализа; $c_{L,k}$ и $d_{l,k}$ – масштабирующие и детализирующие коэффициенты соответственно.

Условия устойчивости в общем виде для представленной прогнозирующей мгновенной модели представлены в [16, 17].

3 Прогнозирующая виртуальная модель температуры питательной воды за ПВД5

Рассмотрим один из важных показателей ТЭП – температуру питательной воды за подогревателем высокого давления 5 (ПВД5), который подогревает питательную воду для дальнейшей подачи через систему питательной воды в парогенераторы (ПГ) реакторной установки во всех режимах нормальной эксплуатации. Данный показатель характеризует работу системы регенеративного подогрева энергоблока. Температура питательной воды за ПВД5 является расчетным параметром, зависящим от многих параметров, которые не входят в состав важнейших параметров энергоблока и в случае их недостоверности расчет ТЭП не ведется. В связи с тем, что снижение температуры питательной воды приводит к снижению давления в парогенераторах, что ведет к уменьшению расхода пара на турбину и снижению выработки электроэнергии, данный параметр требует постоянного мониторинга.

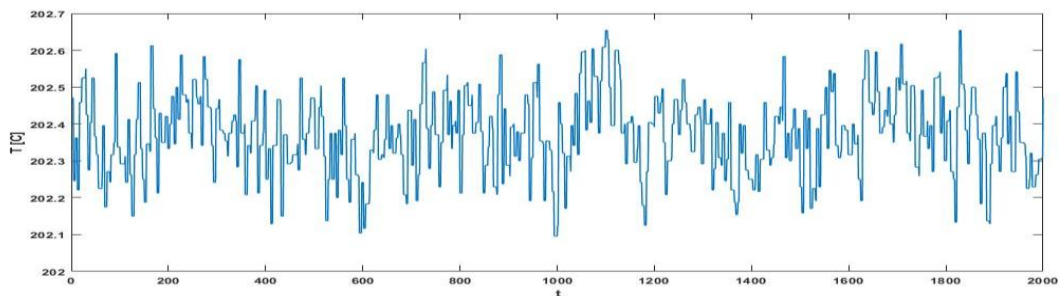


Рис. 3. Температура питательной воды за ПВД5 $T_m(t)$

Для поддержания расчетов температуры питательной воды за ПВД5 $T_m(t)$ в случае отсутствия или недостоверности параметров, не относящихся к важным, была разработана модель, основанная

на основе интеллектуального анализа данных с использованием корреляционного анализа и входами которой являются только важные параметры энергоблока (с учетом их предыстории). В F_{SG3}^{t-1} Таблице 1 приведены коэффициенты корреляции между $T_m(t)$ (см. рис. 3), расходом и температурой питательной воды в i -м ПГ, а также мощностью генератора (активной)) в момент времени $t-j$ (F_{SGi}^{t-j} , T_{SGi}^{t-j} и N^{t-j} соответственно), где $i = \overline{1,4}$, $j = \overline{1,4}$. Анализ данных Таблицы 1 позволяет сделать вывод, что для построения прогнозирующих моделей необходимо использовать температуры питательной воды в ПГ и активную мощность генератора.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции

	F_{SG1}^{t-1}	F_{SG1}^{t-2}	F_{SG1}^{t-3}	F_{SG1}^{t-4}	F_{SG2}^{t-1}	F_{SG2}^{t-2}	F_{SG2}^{t-3}	F_{SG2}^{t-4}		F_{SG3}^{t-2}	F_{SG3}^{t-3}	F_{SG3}^{t-4}	F_{SG4}^{t-1}	F_{SG4}^{t-2}	F_{SG4}^{t-3}	F_{SG4}^{t-4}
$T_m(t)$	0,081	0,093	0,105	0,135	0,047	0,092	0,113	0,156	0,064	0,082	0,098	0,122	0,078	0,102	0,133	0,152
	T_{SG1}^{t-1}	T_{SG1}^{t-2}	T_{SG1}^{t-3}	T_{SG1}^{t-4}	T_{SG2}^{t-1}	T_{SG2}^{t-2}	T_{SG2}^{t-3}	T_{SG2}^{t-4}	T_{SG3}^{t-1}	T_{SG3}^{t-2}	T_{SG3}^{t-3}	T_{SG3}^{t-4}	T_{SG4}^{t-1}	T_{SG4}^{t-2}	T_{SG4}^{t-3}	T_{SG4}^{t-4}
$T_m(t)$	0,23	0,269	0,315	0,357	0,263	0,34	0,414	0,484	0,171	0,192	0,213	0,249	0,212	0,248	0,282	0,313
	N^{t-1}	N^{t-2}	N^{t-3}	N^{t-4}												
$T_m(t)$	0,178	0,218	0,257	0,304												

Запишем в момент времени t с учетом предварительного анализа данных виртуальную мгновенную модель для температуры питательной воды за ПВД5 $T_m(t)$ в виде:

$$T_m(t) = \sum_{j=1}^4 [b_j T_1(t-j) + b_{j+4} T_2(t-j) + b_{j+8} T_3(t-j) + b_{j+12} T_4(t-j) + b_{j+16} N(t-j)], \quad (4)$$

где $T_i(t-j)$ – температура питательной воды в i -м ПГ и $N(t-j)$ – активная мощность генератора в момент времени $(t-j)$, b – настраиваемые коэффициенты. Данная модель с точки зрения условий устойчивости [17] относится к типу, когда глубина памяти по входу больше, чем глубина памяти по выходу.

Прогнозирующая мгновенная модель (4) в стандартизованном масштабе имеет вид:

$$T_m(t) = \sum_{j=1}^4 [\hat{b}_j T_1(t-j) + \hat{b}_{j+4} T_2(t-j) + \hat{b}_{j+8} T_3(t-j) + \hat{b}_{j+12} T_4(t-j) + \hat{b}_{j+16} N(t-j)], \quad (5)$$

где T_m эквивалентный \hat{y} , T_1, T_2, T_3, T_4, N эквивалентные \hat{x} в соотношении (1), представляются в

в форме (2)-(3) и не выбираются из базы данных в хронологическом порядке, $m=0$ – глубина памяти по выходу модели, $r_s=4$ – глубина памяти по входу модели, $s=5$ – размерность вектора входных данных, \hat{b}_j – стандартизованные коэффициенты (настраиваемые коэффициенты для каждого момента времени).

Прогнозирующая виртуальная модель будет иметь структуру (1), но принципиальное отличие данной модели от модели, основанной на рекуррентном методе наименьших квадратов, заключается в формировании на каждом такте новой (мгновенной) модели на основе постоянно дополняемой базы данных объекта. Мгновенная модель строится на основе входов модели $T_i(t-j)$ и $N(t-j)$, выбранных не в порядке хронологического убывания, а по критерию минимума расстояния. Для определения необходимого количества входных векторов на тестовой выборке воспользуемся рядом оценок точности и адекватности прогноза. В Таблице 2 приведены варианты количества входных векторов, на основе которых строились виртуальные прогнозирующие модели, для которых рассчитаны показатели точности: MAPE, MAE, MSE, максимальная и минимальная абсолютные ошибки, а также приведено среднее время расчета 1 такта. На рис. 4 приведено сравнение, построенных моделей по среднему времени расчета 1 цикла и MSE.

На рис. 5 приведено сравнение прогноза температуры питательной воды за ПВД5 $T_m(t)$ по моделям на основе: рекуррентного метода наименьших квадратов (**YrLMS**), мгновенных моделей на основе 251 векторов (**Yas251**), 28 векторов (**Yas28**) и 21 векторов (**Yas21**) с реальным значением этого параметра (**Y**). Прогнозы, построенные на основе рекуррентного метода наименьших квадратов (**YrLMS**) и мгновенной модели на основе 251 векторов (**Yas251**) близки, но слабо отражают

динамику процесса. Наиболее близким к реальному значению (Y) является прогноз по мгновенной модели на основе минимального количества для этой модели векторов (Y_{as21}), который хорошо отслеживает динамику процесса, но требует большого времени для расчета. Мгновенная модель на основе 28 векторов (Y_{as28}) обеспечивает прогноз, хорошо отслеживающий динамику процесса и для получения этого прогноза, требуется приемлемое время в условиях данной задачи.

Таблица 2. Сравнение мгновенных моделей

Число векторов в модели	Среднее время расчета t , с	MAPE	MAE	MSE	Максимальная абсолютная ошибка, С	Минимальная абсолютная ошибка, С
251	0,717	0,032%	0,0646	0,0067	0,3136	0,000181
157	0,719	0,031%	0,0630	0,0063	0,3214	0,000187
124	0,729	0,030%	0,0608	0,0059	0,2981	0,000044
98	0,711	0,029%	0,0589	0,0055	0,2776	0,000338
54	0,689	0,025%	0,0506	0,0040	0,2023	0,000280
43	0,7074	0,022%	0,0453	0,0033	0,2041	0,000219
38	0,7002	0,021%	0,0419	0,0028	0,1768	0,000089
37	0,7332	0,020%	0,0410	0,0027	0,1760	0,000308
32	0,8446	0,017%	0,0346	0,0020	0,1732	0,000165
31	0,887	0,016%	0,0333	0,0019	0,1670	0,000015
30	0,917	0,016%	0,0314	0,0018	0,1714	0,000037
29	1,0548	0,015%	0,0304	0,0017	0,1710	0,000025
28	1,295	0,013%	0,0278	0,00133	0,1790	0,000028
27	1,647	0,012%	0,0255	0,0012	0,1555	0,000041
26	2,035	0,011%	0,0236	0,0010	0,1430	0,000037
25	2,413	0,010%	0,0208	0,0008	0,1272	0,000026
24	5,087	0,009%	0,0180	0,0006	0,1095	0,000033
23	7,423	0,007%	0,0149	0,0005	0,0940	0,000001
22	9,771	0,005%	0,0097	0,0002	0,0797	0,000021
21	10,722	0,003%	0,0062	0,0001	0,06937	0,000002

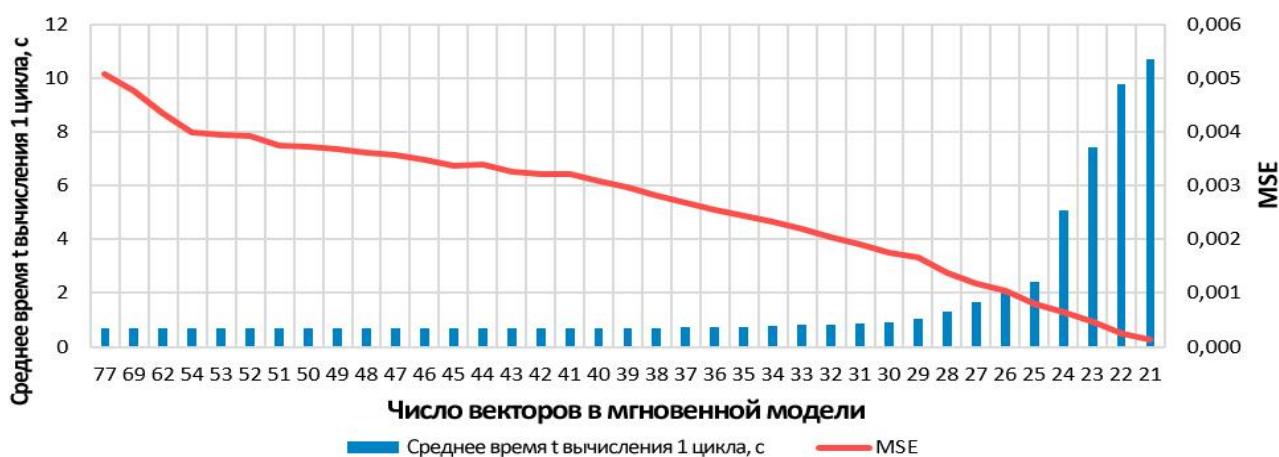


Рис. 4. Сравнение прогнозирующих мгновенных моделей по среднему времени расчета 1 цикла и MSE



Рис. 5. Сравнение прогноза по мгновенным моделям в зависимости от числа отображенных векторов

4 Условия устойчивости и рисковый потенциал

Для прогнозирующей мгновенной модели (5), условия устойчивости согласно [16] (случай $m < R$) для аппроксимирующей части будут иметь вид (6) - (9):

$$\left| \frac{v(t-1)}{2c_{L,k}^{\hat{T}_m}(t)} \right| < 1, \quad (6)$$

$$\left| -\frac{v(t-2)}{v(t-1)} \right| < 1, \quad (7)$$

$$\left| -\frac{v(t-3)}{v(t-2)} \right| < 1, \quad (8)$$

$$\left| -\frac{2v(t-4)}{v(t-3)} \right| < 1, \quad (9)$$

Где

$$\begin{aligned} v(t-1) &= \hat{b}_1 c_{L,k}^{T_1}(t-1) + \hat{b}_5 c_{L,k}^{T_2}(t-1) + \hat{b}_9 c_{L,k}^{T_3}(t-1) + \hat{b}_{13} c_{L,k}^{T_4}(t-1) + \hat{b}_{17} c_{L,k}^N(t-1), \\ v(t-2) &= -\left(\hat{b}_2 c_{L,k}^{T_1}(t-2) + \hat{b}_6 c_{L,k}^{T_2}(t-2) + \hat{b}_{10} c_{L,k}^{T_3}(t-2) + \hat{b}_{14} c_{L,k}^{T_4}(t-2) + \hat{b}_{18} c_{L,k}^N(t-2) \right), \\ v(t-3) &= -\left(\hat{b}_3 c_{L,k}^{T_1}(t-3) + \hat{b}_7 c_{L,k}^{T_2}(t-2) + \hat{b}_{11} c_{L,k}^{T_3}(t-3) + \hat{b}_{15} c_{L,k}^{T_4}(t-3) + \hat{b}_{19} c_{L,k}^N(t-3) \right), \\ v(t-4) &= -\left(\hat{b}_4 c_{L,k}^{T_1}(t-4) + \hat{b}_8 c_{L,k}^{T_2}(t-4) + \hat{b}_{12} c_{L,k}^{T_3}(t-4) + \hat{b}_{16} c_{L,k}^{T_4}(t-4) + \hat{b}_{20} c_{L,k}^N(t-4) \right), \end{aligned}$$

а для детализирующей части (10)-(13):

$$\left| \frac{w(t-1)}{2d_{l,k}^{\hat{T}_m}(t)} \right| < 1, \quad (10)$$

$$\left| -\frac{w(t-2)}{w(t-1)} \right| < 1, \quad (11)$$

$$\left| -\frac{w(t-3)}{w(t-2)} \right| < 1, \quad (12)$$

$$\left| -\frac{2w(t-4)}{w(t-3)} \right| < 1, \quad (13)$$

Где

$$\begin{aligned} w(t-1) &= \hat{b}_1 d_{i,k}^{T_1}(t-1) + \hat{b}_5 d_{i,k}^{T_2}(t-1) + \hat{b}_9 d_{i,k}^{T_3}(t-1) + \hat{b}_{13} d_{i,k}^{T_4}(t-1) + \hat{b}_{17} d_{i,k}^N(t-1), \\ w(t-2) &= -\left(\hat{b}_2 d_{i,k}^{T_1}(t-2) + \hat{b}_6 d_{i,k}^{T_2}(t-2) + \hat{b}_{10} d_{i,k}^{T_3}(t-2) + \hat{b}_{14} d_{i,k}^{T_4}(t-2) + \hat{b}_{18} d_{i,k}^N(t-2) \right), \\ w(t-3) &= -\left(\hat{b}_3 d_{i,k}^{T_1}(t-3) + \hat{b}_7 d_{i,k}^{T_2}(t-2) + \hat{b}_{11} d_{i,k}^{T_3}(t-3) + \hat{b}_{15} d_{i,k}^{T_4}(t-3) + \hat{b}_{19} d_{i,k}^N(t-3) \right), \\ w(t-4) &= -\left(\hat{b}_4 d_{i,k}^{T_1}(t-4) + \hat{b}_8 d_{i,k}^{T_2}(t-4) + \hat{b}_{12} d_{i,k}^{T_3}(t-4) + \hat{b}_{16} d_{i,k}^{T_4}(t-4) + \hat{b}_{20} d_{i,k}^N(t-4) \right). \end{aligned}$$

На рис. 6 (а)-(d) и рис. 7 (а)-(d) представлены условия устойчивости для аппроксимирующей части (6)-(9) и детализирующей части (10)-(13) в прогнозный момент времени, соответствующий вычислительному циклу 4, для прогнозирующей мгновенной модели температуры питательной воды за ПВД5 (5), основанной на 28 векторах (**Yas28**). На рис. 8 представлены результаты прогноза $T_m(t)$ и оценки рискового потенциала на основе алгоритма [16] с применением вербально-числовой шкалы Харрингтона [18].

Анализ данных показал, что для расчета рискового потенциала состояния объекта в части температуры питательной воды за ПВД5 целесообразно использовать глубину кратно-масштабного разложение $L=1$, которая применительно к модели (5) дает адекватную картину развития технологического процесса. Результаты моделирования показали, что предсказанные значения прогнозирующей мгновенной модели хорошо согласуются с экспериментальными данными.

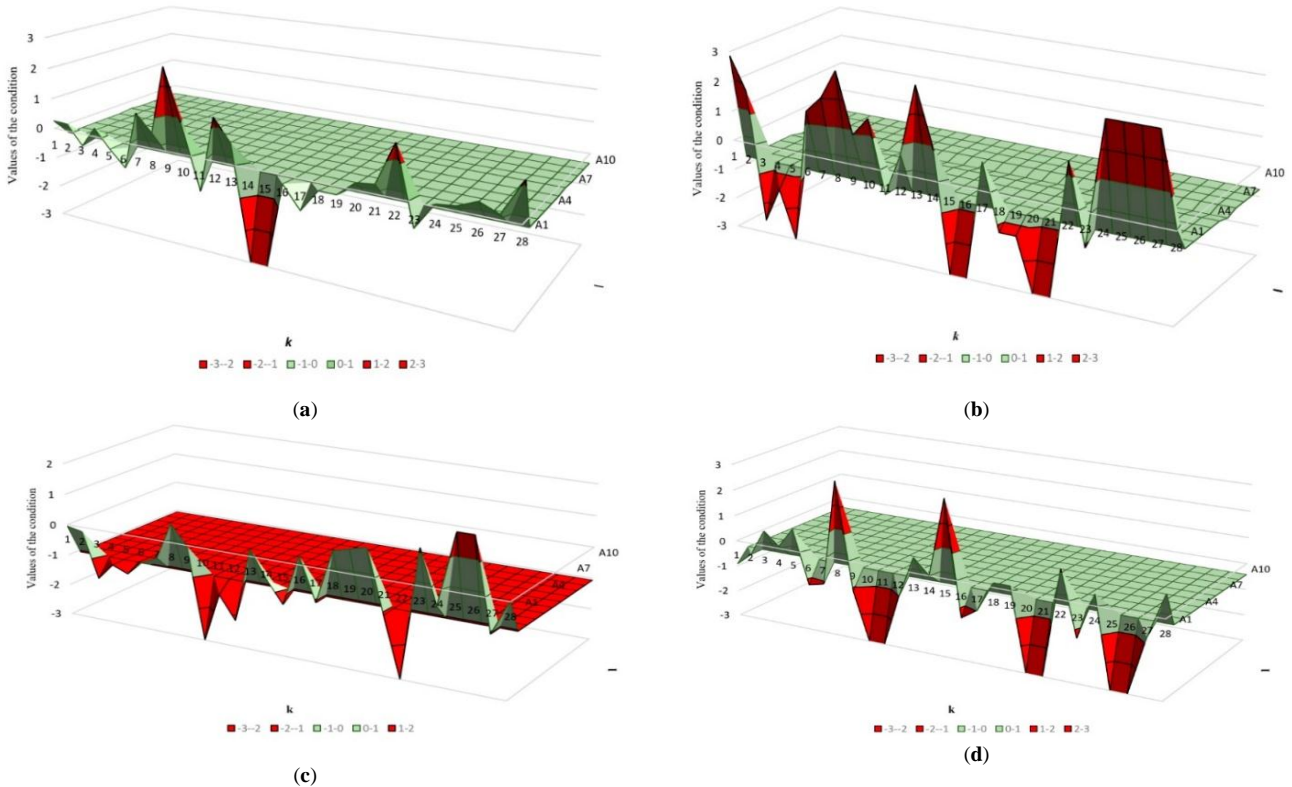


Рис. 6. Условия устойчивости для аппроксимирующей части

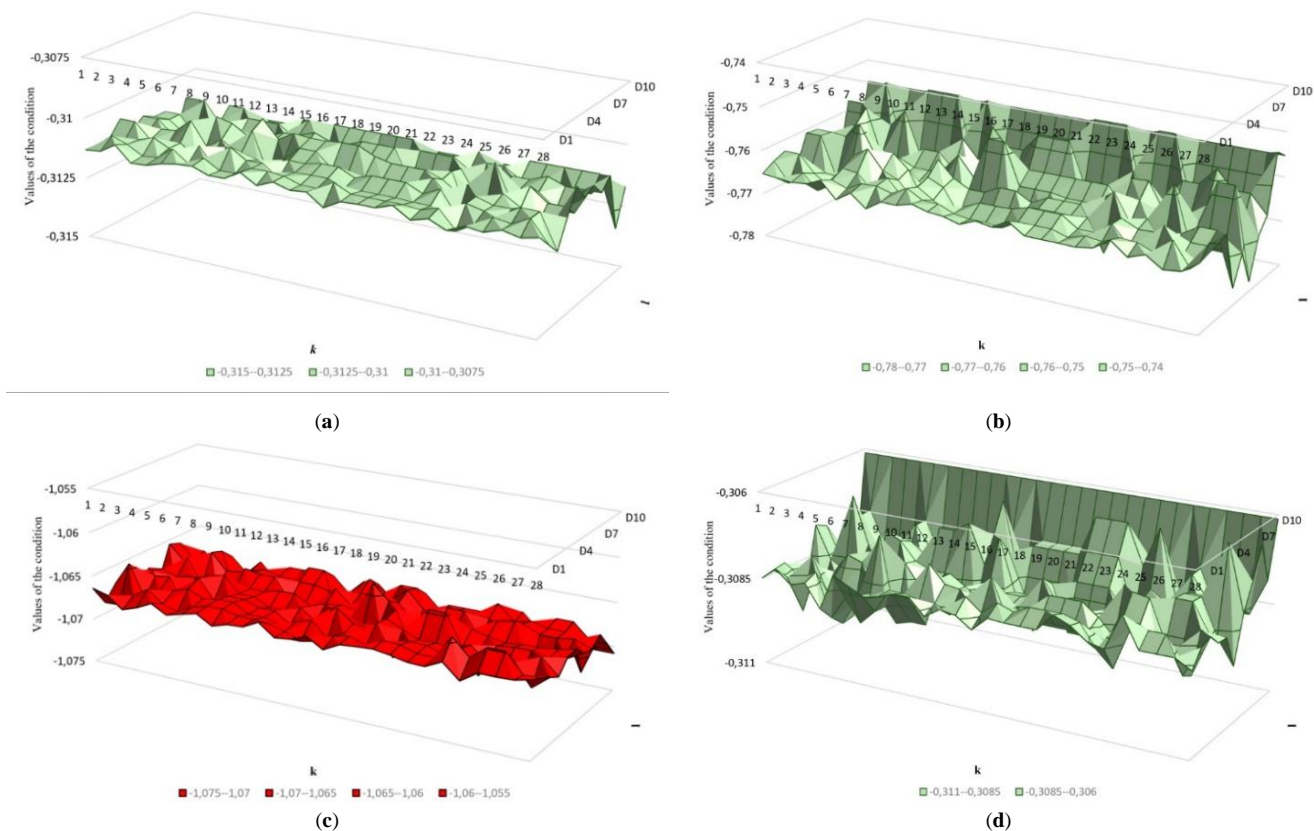


Рис. 7. Условия устойчивости для детализирующей части

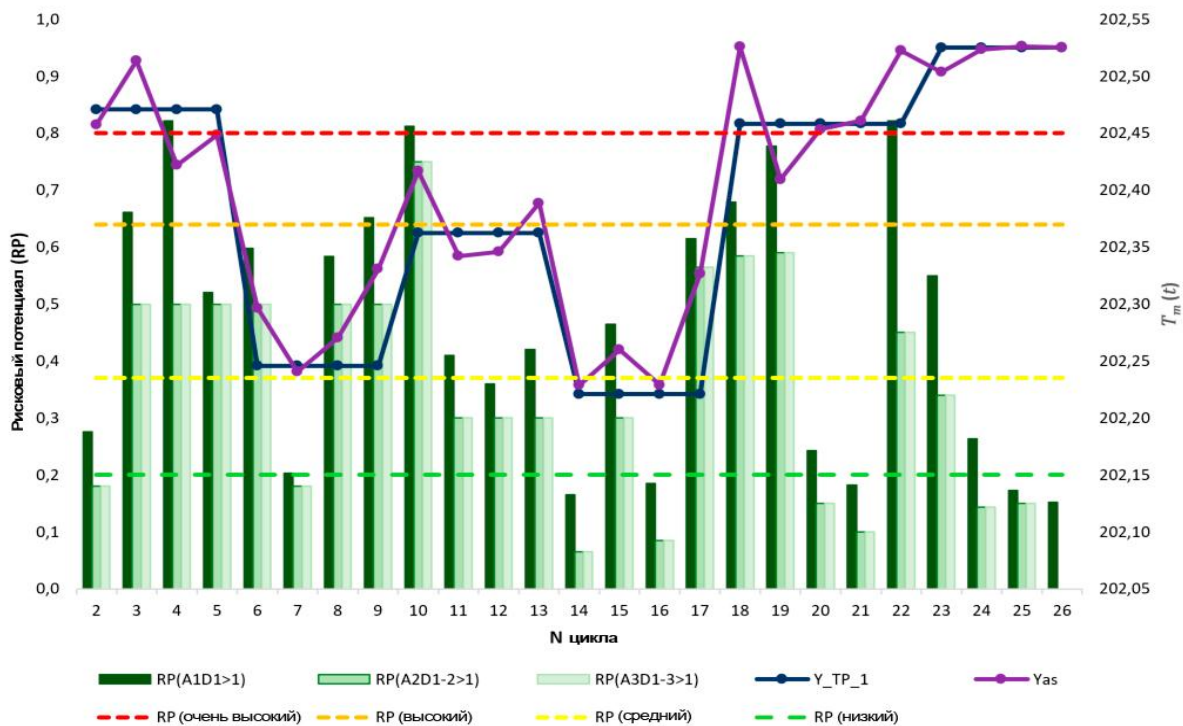


Рис. 8. Температура питательной воды за ПВД5 $T_m(t)$ и рисковый потенциал

Заключение

Расширение информационной задачи «Расчет ТЭП» основано на интеллектуальном анализе данных, фрактальном анализе, кратно-масштабном вейвлет-преобразовании и моделях прогнозирования рискового потенциала. Этот подход позволяет определить рисковый потенциал выхода критических параметров технологического процесса за эксплуатационные пределы.

Рассмотренный подход работает даже в случае несанкционированном вмешательстве в работу систем, которое приводит к развитию неустойчивости различной природы в технологическом процессе на АЭС.

В работе рассмотрена прогнозирующая мгновенная модель температуры питательной воды за ПВД5, которая является важным расчетным показателем «Расчет ТЭП». Для рассмотренных моделей была проведена обратная верификация путем оценки адекватности прогнозирующих мгновенных моделей на основе ретроспективных данных. Разработанный алгоритм оценки рисков потенциала на основе мгновенной модели прогноза температуры питательной воды за ПВД5 прошел тестирование в рамках информационной задачи «Расчет ТЭП» с целью возможности выявления аномалий в технологическом процессе и дал положительные результаты.

Литература

1. *Bullock J.A., Haddow G.D., Coppola D.P.* Introduction to Homeland Security. Chapter 8 “Cybersecurity and critical infrastructure protection”. – Elsevier, 2021. – P.425-497.
2. *Maglaras L.A., Kim K.H., Janicke H., Ferrag M.A., Rallis S., Fragkou P., Maglaras A., Cruz T.J.* Cyber security of critical infrastructures. // *ICT Express*. Vol. 4. 2018, iss. 1. – P.42-45.
3. *Ahmad A., Maynard S.B., Desouza K.C., Kotsias J., Whitty M.T., Baskerville R.L.* How can organizations develop situation awareness for incident response: A case study of management practice // *Computers and Security*. Vol. 101:102122. 2021.
4. *Henriques de Gusmão A.P., Mendonça Silva M., Poletto T., Camara e Silva L., Cabral Seixas Costa A.P.* Cybersecurity risk analysis model using fault tree analysis and fuzzy decision theory // *International Journal of Information Management*. Vol. 43. 2018. – P.248-260.
5. *Herrera L.C., Maennel O.* A comprehensive instrument for identifying critical information infrastructure services // *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. Vol. 50. 2019. – P.50-61.
6. *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. № 5. – С.65-79.
7. *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)*, под общей редакцией С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркуна, -М.: ИПУ РАН, 2017. Т. 1. С. 101-107.
8. *Parekh M., Gao Y., Jockenhoovel-Bartfeld M., Waedt K.* Confluent modeling of heterogeneous safety and operational instrumentation and control systems // *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*. Vol. 6. 2020, iss. 3:031802.
9. *Lee S.H., Lee S.J., Park J., E.-chan Lee, Kang H.G.* Development of simulation-based testing environment for safety-critical software // *Nuclear Engineering and Technology*. Vol. 50. 2018, iss. 4. – P.570-581.
10. *Wahlström B.* Systemic thinking in support of safety management in nuclear power plants // *Safety Science*. Vol. 109. 2018. – P.201-218.
11. *Bakhtadze N., Sakrutina E.* Wavelet-based Identification and Control of Variable Structure Systems // *Proceedings of the IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2016)*. 2016. – P.1-6.
12. *Калашиников А.О., Сакрутина Е.А.* Модель оценки рисков потенциала объектов критической инфраструктуры атомных электростанций // *Труды 11-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018, Москва)*, под общей редакцией С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркуна, – М.: ИПУ РАН, 2018. Т. 2. – С.457-461.
13. *Jharko E.* Calculating Technical and Economical Indexes and Providing Normal NPP Operation // *IFAC-PapersOnLine*. Vol. 50. 2017, iss. 1. – P.15586-15591.
14. *Жарко Е.Ф., Сакрутина Е.А.* Оценка технико-экономических показателей и обеспечение нормальной эксплуатации атомной электростанции // *Труды 11-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018, Москва)*, под общей редакцией С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркуна, – М.: ИПУ РАН, 2018. Т. 2. – С.451-457.
15. *Chen J., Zhu Q., Su Y.* Predictive model of artificial neural network for disaster prevention // *Proceedings of the 2010 2nd IEEE Int. Conf. on Information Management and Engineering ICIME*. 2010. – P.365-369.
16. *Sakrutina E.* Assessing Risk Potential of Critical Infrastructure of NPP: Fractal Analysis and Multiple-Scale Wavelet Transform // *Proceedings 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. Piscataway: IEEE, 2020. – P.476-481.
17. *Sakrutina E.* Wavelet analysis based stability conditions of a prediction model // *Proceedings of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*. Vol. 1. 2019. – P.707-714.
18. *Harrington E.C.* The desirable function // *Industrial Quality Control*. Vol. 21. 1965, №10, – P.494-498.