

DOI:

## ОЦЕНКА РИСКОВОГО ПОТЕНЦИАЛА: ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И КРАТНОМАСШТАБНОЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

Сакрутина Е.А.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,*

*Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65*

*consoft@ipu.ru*

*Аннотация: Цифровизация технологических процессов осуществляется в рамках концепции Industry 4.0, предполагающей широкое применение методов математического моделирования и прогнозной аналитики. В работе предлагается подход к оценки рискового потенциала на основе применения фрактального анализа и кратко-масштабного вейвлет-преобразования.*

Ключевые слова: атомная электростанция, критическая информационная инфраструктура, рисковый потенциал, система верхнего блочного уровня, кратко-масштабное вейвлет-преобразование.

### Введение

Критическая информационная инфраструктура (КИИ) включает объекты, которые важны для поддержания жизненно важных функций общества, здоровья, безопасности, охраны и благосостояния граждан [1]. К значимым объектам КИИ (ЗОКИИ) относятся объекты критической информационной инфраструктуры, отказ которых может повлиять на здоровье, безопасность и благосостояние граждан. 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.

Следствием несанкционированного доступа к информационно-технологической инфраструктуре (ИТИ) ЗОКИИ, а также компьютерных атак на ИТИ, которые привели к выходу технологических параметров ИТИ за установленные технологические пределы, может явиться развитие нештатных ситуаций с тяжелыми и даже катастрофическими последствиями. Для реализации мер по защите ЗОКИИ необходимо разработать систему, реализующую ряд задач, в том числе мониторинг угроз безопасности, основанный на процедурах идентификации и управления рисками [2-11].

Развитие автоматизации ЗОКИИ, нарушения работоспособности которых приводят к большим экономическим и экологическим потерям, включает совершенствование автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), реализующих значительно более сложные алгоритмы управления и анализа данных с использованием сложных программно-технических комплексов [12, 13].

Между АСУ ТП и «традиционными» корпоративными информационными системами имеется множество отличий начиная от используемого оборудования и условий в которых оно функционирует, до назначения. В корпоративных системах основным защищаемым ресурсом является информация, а основной целью является обеспечение на всех этапах жизненного цикла ее конфиденциальности, то в АСУ ТП объектом защиты является технологический процесс, и основная цель состоит в обеспечении его непрерывности и целостности (в том числе и передаваемой между подсистемами АСУ ТП информации). Стоит отметить, что поле потенциальных рисков и угроз для АСУ ТП расширяется рисками потенциального ущерба инфраструктуре, окружающей среде. В связи с вышеизложенным, говорят о необходимости обеспечения «кибербезопасности» АСУ ТП, и «компьютерные» угрозы, направленные на технологический процесс через интеллектуальные устройства системы, рассматриваются в первую очередь.

В настоящее время наметилась тенденция к представлению для распределенных АСУ ТП той или иной связи с корпоративной сетью. В случае отступлений от политики и программ защищенности систем АСУ ТП эта связь сильно упрощает задачу злоумышленника. АСУ ТП используются повсеместно: от крупных производственных объектов до систем «умный дом». Какие-то из объектов КИИ для злоумышленников более интересны, другие – менее, но в последнее время из-за возрастающего количества обнаруженных и опубликованных уязвимостей в АСУ ТП, а также распространением «специального» вредоносного программного обеспечения, невозможно считать свою систему безопасной.

Организации, работающие в области атомной энергетики, для повышения безопасности и надежности атомных электростанций (АЭС) заинтересованы в использовании как методов обнаружения и диагностики аномалий в технологическом процессе и неисправностей оборудования,

так и кибератак [14-16]. Разработка моделей оценки рискового потенциала на основе интеллектуального анализа данных с использованием фрактального анализа и кратно-масштабного вейвлет-преобразования является одним из перспективных направлений работ.

## 1 Информационная задача «IT-TEI» и проблема неполной оценки параметров

В состав энергоблоков АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 (рис. 1) входят радиоактивный (реактор, 4 циркуляционные петли охлаждения с парогенераторами) и нерадиоактивный (парогенераторы, паропроводы, паровые турбины, сепараторы-пароперегреватели, питательные насосы и трубопроводы, деаэраторы и регенеративные подогреватели) контуры.

Одной из первых систем управления для энергоблоков АЭС, в которой был заложен при проектировании глубокий уровень защиты от несанкционированного доступа, была система верхнего блочного уровня (СВБУ) АСУ ТП АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000, разработанная и внедренная ИПУ РАН [12, 13]. СВБУ функционирует в режимах:

- нормальной эксплуатации;
- с нарушением нормальной эксплуатации, но без нарушения технологических пределов и условий безопасной эксплуатации.

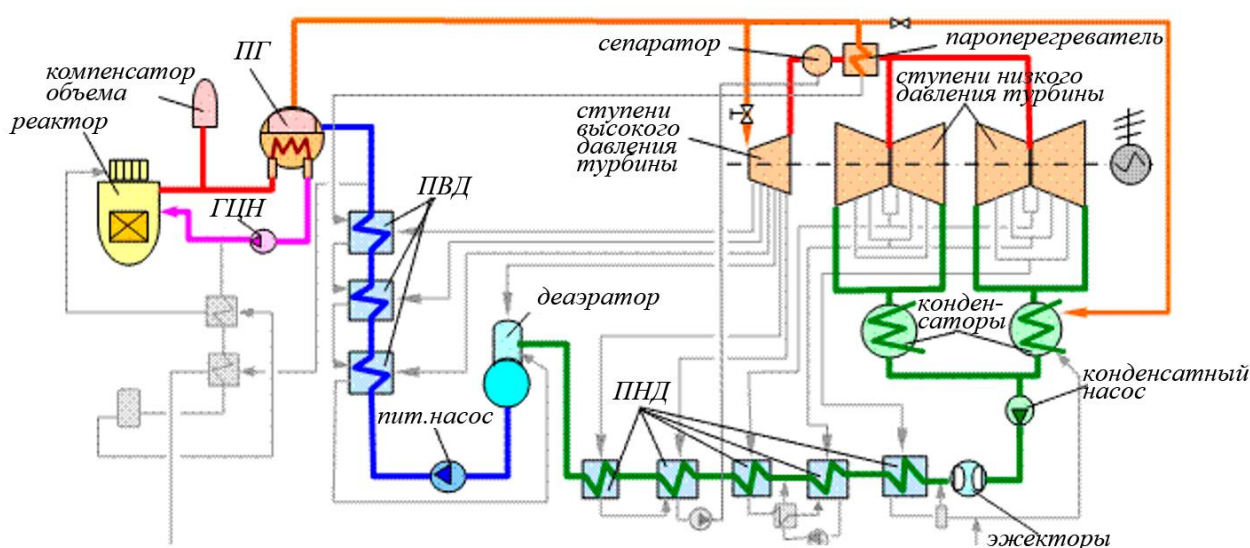


Рис. 1. Общая тепловая схема энергоблока АЭС.

В состав прикладного программного обеспечения входит информационная задача «Расчет технико-экономических показателей» («IT-TEI»), которая будет включать алгоритмы, основанные на интеллектуальном анализе данных [17] и моделях прогнозирования рискового потенциала [18].

Целью задачи «IT-TEI» является представление информации оперативному персоналу энергоблока для выявления аномалий в работе оборудования, а также разработке рекомендаций по улучшению управления энергоблоком. Усовершенствование «IT-TEI» связано с необходимостью предоставлять текущую информацию о состоянии энергоблока для предотвращения достижения технологическим процессом критических условий.

Эффективность работы энергоблока оценивается на основании расчетных показателей, которые можно отнести к следующим группам: обобщенные показатели энергоблока, параметры пара и состояния уплотнений цилиндров высокого давления турбины, параметры пароперегревателей турбины, параметры подогревателей высокого и низкого давления, показатели конденсаторов турбины, показателей питательного турбонасоса. Расчет данных показателей ведется в рамках информационной задачи «IT-TEI» (ТЭП) [19] и отображаются на рабочих местах операторов реакторного и турбинного отделения, а также начальника смены блока.

В вычислении выходных параметров задачи «IT-TEI», характеризующих текущее состояние энергоблока, участвует значительное количество входных дискретных и аналоговых сигналов. Данное обстоятельство приводит к тому, что недостоверность хотя бы одного из входных сигналов приводит к исключению из расчета параметров, связанных с этим сигналом (например, недостоверность расхода продувочной воды объединенной линии штуцеров нижней образ корпуса, штуцеров «карманов» коллектора любого из 4х парогенераторов приведет к исключению из расчета 49% выходных параметров задачи). 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. Проблему неполной оценки параметров ТЭП в случаях отсутствия/недостовренности или подмены ряда сигналов, не относящихся к указанной выше категории, можно решить на основе методологии создания виртуальных моделей [17], при условии, что входными векторами будут важные параметры энергоблока.

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 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.

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 Таблице 1 приведены коэффициенты корреляции между  $T_m(t)$  (см. рис. 2), расходом и температурой питательной воды в  $i$ -м ПГ, а также мощностью генератора (активной) в момент времени  $t - j$  ( $F_{ПГi}^{t-j}$ ,  $T_{ПГi}^{t-j}$  и  $N^{t-j}$  соответственно), где  $i = \overline{1,4}$ ,  $j = \overline{1,4}$ .

Таблица 1. Коэффициенты корреляции

	$F_{ПГ1}^{t-1}$	$F_{ПГ1}^{t-2}$	$F_{ПГ1}^{t-3}$	$F_{ПГ1}^{t-4}$	$F_{ПГ2}^{t-1}$	$F_{ПГ2}^{t-2}$	$F_{ПГ2}^{t-3}$	$F_{ПГ2}^{t-4}$	$F_{ПГ3}^{t-1}$	$F_{ПГ3}^{t-2}$	$F_{ПГ3}^{t-3}$	$F_{ПГ3}^{t-4}$	$F_{ПГ4}^{t-1}$	$F_{ПГ4}^{t-2}$	$F_{ПГ4}^{t-3}$	$F_{ПГ4}^{t-4}$
$T_m(t)$	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
	$T_{ПГ1}^t$	$T_{ПГ1}^{t-1}$	$T_{ПГ1}^{t-2}$	$T_{ПГ1}^{t-3}$	$T_{ПГ2}^t$	$T_{ПГ2}^{t-1}$	$T_{ПГ2}^{t-2}$	$T_{ПГ2}^{t-3}$	$T_{ПГ3}^t$	$T_{ПГ3}^{t-1}$	$T_{ПГ3}^{t-2}$	$T_{ПГ3}^{t-3}$	$T_{ПГ4}^t$	$T_{ПГ4}^{t-1}$	$T_{ПГ4}^{t-2}$	$T_{ПГ4}^{t-3}$
$T_m(t)$	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												

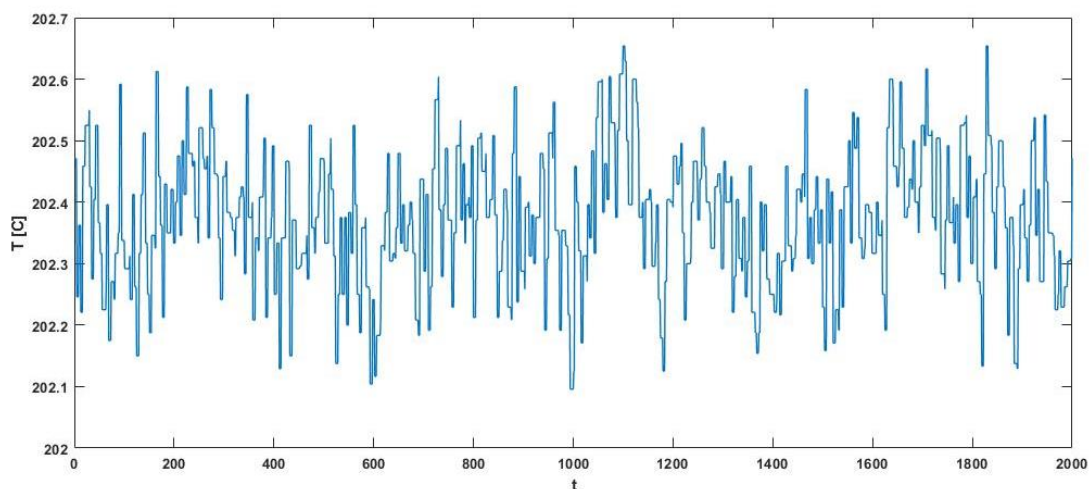


Рис. 2. Температура питательной воды за ПВД5  $T_m(t)$ .

Разрабатываемая прогнозирующая модель, в части информационной задачи «IT-ТЕИ», даже в случае отсутствия/недостовренности части измерений позволяет в реальном масштабе времени получать оценки параметров работы энергоблока. На основе полученных оценок можно определить рискованный потенциал [18] выхода технологического процесса за технологические пределы.

## 2 Фрактальный анализ технологического процесса

Применение фрактального анализа технологического процесса позволит диагностировать характер измерений параметров в течение времени. Временные ряды сигналов с датчиков порождаются как

сложными и малоизученными нелинейными явлениями, так и несанкционированным вмешательством в работу систем, которые приводят к развитию неустойчивостей разной природы в технологическом процессе.

Жесткие требования, предъявляемые к методикам и алгоритмам, используемых в системах поддержки операторов, порождают необходимость повышения надежности и контроля безопасности эксплуатации энергоблока. В таком случае приобретает особую актуальность разработка методов определения неустойчивости функционирования энергоблока. В настоящее время для анализа динамики сложных систем нашли применение представления фрактальной геометрии [21], которые показывают структуру протекающих процессов. Поэтому, дополнительным диагностическим фактором, характеризующим состояние физической системы локально и в целом, может являться критерий фрактальности. Стоит отметить, что для задач идентификации (определение типа поведения) и прогнозирования протекания различных процессов может использоваться фрактальная характеристика размерности временных рядов [22, 23]. Для исследования фрактальных свойств динамики процессов используют показатель Херста ( $H \in [0,1]$ ), связанный с фрактальной размерностью  $D$  соотношением:

$$D = 2 - H,$$

$$H = \frac{\log\left(\frac{R}{S}\right)}{\log(aN)},$$

$$R = \max_{1 \leq k \leq N} \sum_{i=1}^k \left( V_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N V_j \right) - \min_{1 \leq k \leq N} \sum_{i=1}^k \left( V_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N V_j \right),$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( V_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N V_j \right)^2},$$

где  $N$  – число периодов наблюдений,  $a > 0$  – положительное число,  $R$  – размах накопленного отклонения,  $S$  – стандартное отклонение.

Показатель Херста используется для поиска во временных рядах смещений и позволяет классифицировать временные ряды по степени случайности:

- $H < 0,5$  – корреляция положительна, т.е. процесс персистентный (сохраняющий тенденцию);
- $H > 0,5$  – корреляция отрицательна, т.е. процесс антиперсистентный (отсутствие устойчивости);
- $H \approx 0,5$  – некоррелированность измерений, т.е. процесс характеризуется неопределенностью поведения.

Для процесса, представленного на рис. 2 получена зависимость нормированного размаха от объема выборки (см. рис. 3). Для данного процесса показатель Херста  $H = 0,79931$ , т.е. данный процесс персистентный, обладает эффектом долговременной памяти, и соответственно, тенденция к росту значения сигнала означает в среднем тенденцию к увеличению в будущем.

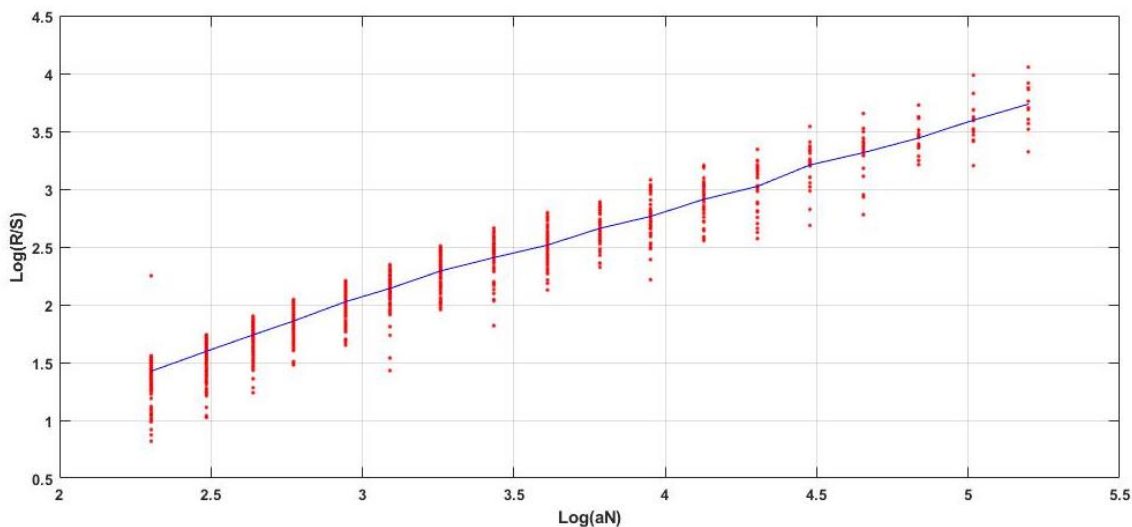


Рис. 3. Зависимость нормированного размаха от объема выборки.

### 3 Виртуальная модель и условия ее устойчивости

Запишем в момент времени  $t$  виртуальную мгновенную модель в стандартизованном масштабе:

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

где  $\hat{x} = \frac{x-M[x]}{\sigma_x}$  – вектор входов виртуальной модели,  $\hat{y} = \frac{y-M[y]}{\sigma_y}$  – прогноз выхода объекта в момент времени  $t$ ,  $M[\hat{x}] = M[\hat{y}] = 0$ ,  $\sigma_{\hat{x}} = \sigma_{\hat{y}} = 1$ ,  $m$  – глубина памяти по выходу,  $r_s$  – глубина памяти по входу ( $R = \max_{s=1,S} r_s$ ),  $S$  – 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 не в порядке хронологического убывания.

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

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

$$(3) \quad \hat{y}(t) = \sum_{i=1}^m \hat{a}_i \hat{y}(t-i) + \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{r_s} \hat{b}_{s,j} \hat{x}(t-j)_s,$$

где  $\psi_{l,k}(t)$  – вейвлет-функции;  $\varphi_{L,k}(t)$  – масштабирующие функции;  $L$  – глубина кратно-масштабного разложения ( $1 \leq L \leq L_{max}$ , где  $L_{max} = \lfloor \log_2 N^* \rfloor$ , и  $N^*$  – мощность множества состояний системы в базе данных);  $l$  – уровень детализации анализа;  $c_{L,k}$  – масштабирующие (аппроксимирующие) коэффициенты,  $d_{l,k}$  детализирующие коэффициенты. На рис. 4 представлено разложение  $T_m(t)$  по материнским вейвлетам (вейвлетам Хаара) с глубиной разложения  $L = 5$ . На рис. 5 показано графическое представление детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения с глубиной разложения  $L = 5$  для  $T_m(t)$ .

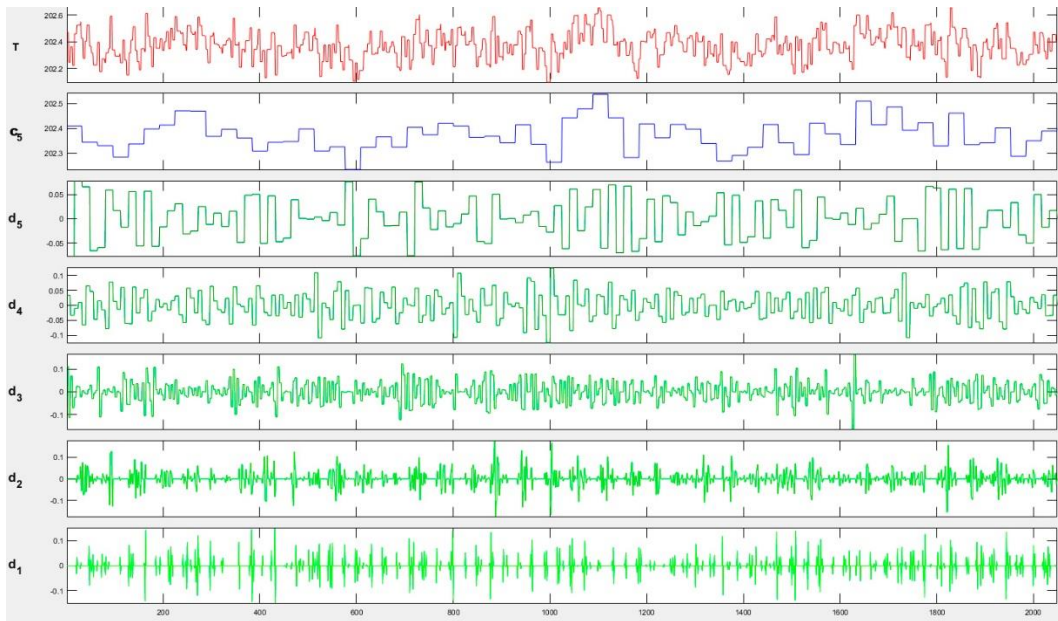


Рис. 4. Графическое представление коэффициентов вейвлет-разложения для  $T_m(t)$ .

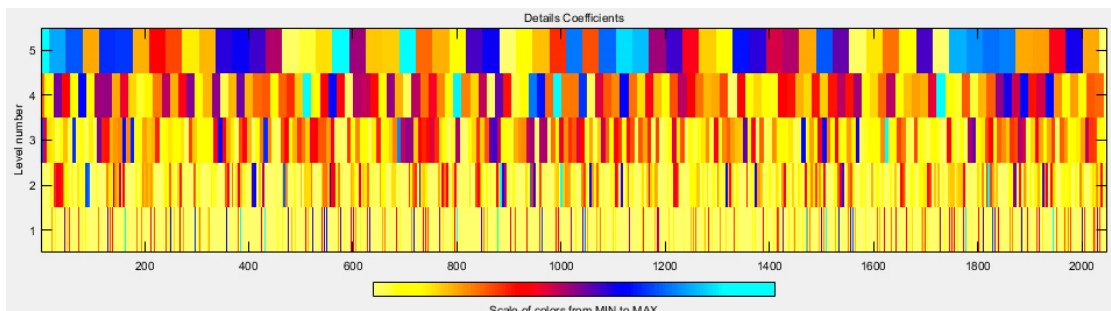


Рис. 5. Детализирующие коэффициенты  $T_m(t)$ .

Условия устойчивости рассматриваемой виртуальной модели имеют вид [24], представленный далее в пунктах 3.1-3.4.

### 3.1 Условие устойчивости при $m > R$

Если соотношение между глубиной выходной памяти и глубиной входной памяти имеет вид  $m > R$ , то условие устойчивости для аппроксимирующей части для  $\forall k = \overline{1, N}$ :

$$(4) \quad \begin{aligned} & \left| \frac{\hat{a}_1 c_{L,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-1)}{2c_{L,k}^{\hat{y}}(t)} \right| < 1, \\ & \left| \frac{\hat{a}_2 c_{L,k}^{\hat{y}}(t-2) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,2} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-2)}{\hat{a}_1 c_{L,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-1)} \right| < 1, \\ & \dots, \\ & \left| \frac{\hat{a}_{p+1} c_{L,k}^{\hat{y}}(t-p-1)}{\hat{a}_p c_{L,k}^{\hat{y}}(t-p) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,p} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-p)} \right| < 1, \\ & \left| \frac{\hat{a}_{p+2} c_{L,k}^{\hat{y}}(t-p-2)}{\hat{a}_{p+1} c_{L,k}^{\hat{y}}(t-p-1)} \right| < 1, \\ & \dots, \\ & \left| \frac{2\hat{a}_m c_{L,k}^{\hat{y}}(t-m)}{\hat{a}_{m-1} c_{L,k}^{\hat{y}}(t-m+1)} \right| < 1; \end{aligned}$$

для детализирующей части для  $\forall k = \overline{1, N}, l = \overline{1, L}$ :

$$(5) \quad \begin{aligned} & \left| \frac{\hat{a}_1 d_{l,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-1)}{2d_{l,k}^{\hat{y}}(t)} \right| < 1, \\ & \left| \frac{\hat{a}_2 d_{l,k}^{\hat{y}}(t-2) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,2} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-2)}{\hat{a}_1 d_{l,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-1)} \right| < 1, \\ & \dots, \\ & \left| \frac{\hat{a}_{p+1} d_{l,k}^{\hat{y}}(t-p-1)}{\hat{a}_p d_{l,k}^{\hat{y}}(t-p) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,p} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-p)} \right| < 1, \\ & \left| \frac{\hat{a}_{p+2} d_{l,k}^{\hat{y}}(t-p-2)}{\hat{a}_{p+1} d_{l,k}^{\hat{y}}(t-p-1)} \right| < 1, \\ & \dots, \\ & \left| \frac{2\hat{a}_m d_{l,k}^{\hat{y}}(t-m)}{\hat{a}_{m-1} d_{l,k}^{\hat{y}}(t-m+1)} \right| < 1. \end{aligned}$$

### 3.2 Условие устойчивости при $m < R$

Если соотношение между глубиной выходной памяти и глубиной входной памяти имеет вид  $m < R$ , то условие устойчивости для аппроксимирующей части для  $\forall k = \overline{1, N}$ :

$$(6) \quad \begin{aligned} & \left| \frac{\hat{a}_1 c_{L,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-1)}{2c_{L,k}^{\hat{y}}(t)} \right| < 1, \\ & \left| \frac{\hat{a}_2 c_{L,k}^{\hat{y}}(t-2) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,2} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-2)}{\hat{a}_1 c_{L,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-1)} \right| < 1, \\ & \dots, \\ & \left| \frac{\sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m+1} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-m-1)}{\hat{a}_m c_{L,k}^{\hat{y}}(t-m) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-m)} \right| < 1, \\ & \left| \frac{\sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m+2} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-m-2)}{\sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m+1} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-m-1)} \right| < 1, \\ & \dots, \\ & \left| \frac{2 \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,p} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-p)}{\sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,p-1} c_{L,k}^{\hat{x}_s}(t-p+1)} \right| < 1, \end{aligned}$$

а для детализирующей части для  $\forall k = \overline{1, N}, l = \overline{1, L}$ :

$$(7) \quad \begin{aligned} & \left| \frac{\hat{a}_1 d_{l,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-1)}{2d_{l,k}^{\hat{y}}(t)} \right| < 1, \\ & \left| \frac{\hat{a}_2 d_{l,k}^{\hat{y}}(t-2) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,2} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-2)}{\hat{a}_1 d_{l,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} d_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-1)} \right| < 1, \\ & \dots, \end{aligned}$$

$$\left| -\frac{\sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m+1} \hat{d}_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-m-1)}{\hat{a}_m \hat{d}_{l,k}^{\hat{y}}(t-m) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m} \hat{d}_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-m)} \right| < \mathbf{1},$$

$$\left| -\frac{\sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m+2} \hat{d}_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-m-2)}{\sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m+1} \hat{d}_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-m-1)} \right| < \mathbf{1},$$

...

$$\left| -\frac{2(\hat{a}_m \hat{d}_{l,k}^{\hat{y}}(t-m) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m} \hat{d}_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-m))}{\hat{a}_{m-1} \hat{d}_{l,k}^{\hat{y}}(t-m+1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m-1} \hat{d}_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-m+1)} \right| < \mathbf{1}.$$

### 3.3 Условие устойчивости при $m=R \neq 1$

Если соотношение между глубиной выходной памяти и глубиной входной памяти имеет вид  $m = R \neq 1$ , то условие устойчивости для аппроксимирующей части для  $\forall k = \overline{1, N}$ :

$$(8) \quad \left| \frac{\hat{a}_1 \hat{c}_{l,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} \hat{c}_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-1)}{2 \hat{c}_{l,k}^{\hat{y}}(t)} \right| < \mathbf{1},$$

$$\left| -\frac{\hat{a}_2 \hat{c}_{l,k}^{\hat{y}}(t-2) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,2} \hat{c}_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-2)}{\hat{a}_1 \hat{c}_{l,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} \hat{c}_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-1)} \right| < \mathbf{1},$$

...

$$\left| -\frac{2(\hat{a}_m \hat{c}_{l,k}^{\hat{y}}(t-m) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m} \hat{c}_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-m))}{\hat{a}_{m-1} \hat{c}_{l,k}^{\hat{y}}(t-m+1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m-1} \hat{c}_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-m+1)} \right| < \mathbf{1},$$

а для детализирующей части для  $\forall k = \overline{1, N}, l = \overline{1, L}$ :

$$(9) \quad \left| \frac{\hat{a}_1 \hat{d}_{l,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} \hat{d}_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-1)}{2 \hat{d}_{l,k}^{\hat{y}}(t)} \right| < \mathbf{1},$$

$$\left| -\frac{\hat{a}_2 \hat{d}_{l,k}^{\hat{y}}(t-2) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,2} \hat{d}_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-2)}{\hat{a}_1 \hat{d}_{l,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} \hat{d}_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-1)} \right| < \mathbf{1},$$

...

$$\left| -\frac{2(\hat{a}_m \hat{d}_{l,k}^{\hat{y}}(t-m) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m} \hat{d}_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-m))}{\hat{a}_{m-1} \hat{d}_{l,k}^{\hat{y}}(t-m+1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,m-1} \hat{d}_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-m+1)} \right| < \mathbf{1}.$$

### 3.4 Условие устойчивости при $m=R=1$

Если соотношение между глубиной выходной памяти и глубиной входной памяти имеет вид  $m = R = 1$ , то условие устойчивости для аппроксимирующей части для  $\forall k = \overline{1, N}$ :

$$(10) \quad \left| \frac{\hat{a}_1 \hat{d}_{l,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} \hat{d}_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-1)}{2 \hat{d}_{l,k}^{\hat{y}}(t)} \right| < \mathbf{1},$$

а для детализирующей части для  $\forall k = \overline{1, N}, l = \overline{1, L}$ :

$$(11) \quad \left| \frac{\hat{a}_1 \hat{d}_{l,k}^{\hat{y}}(t-1) + \sum_{s=1}^S \hat{b}_{s,1} \hat{d}_{l,k}^{\hat{x}_s}(t-1)}{\hat{d}_{l,k}^{\hat{y}}(t)} \right| < \mathbf{1}.$$

## 4 Алгоритм оценки рискового потенциала

Алгоритм построения модели прогнозирования и оценки рискового потенциала (RP) состоит из следующих этапов:

- 1) построение прогноза состояния объекта,
- 2) проверка состояния объекта по условиям устойчивости,
- 3) оценка рискового потенциала.

На этапе 1 проводится анализ и отбраковка данных, строится математическая модель, проводится анализ достаточного количества векторов входов модели. При построении математической модели прогноза требуется проведение корреляционного анализа данных для определения временных сдвигов параметров модели. На основе проведенного анализа строится математическая модель прогноза состояния объекта. По тестовой выборке проводится определение достаточного количества векторов входов для модели. Прогноз выхода виртуальной модели (1) в следующий момент времени определяется на основе метода наименьших квадратов. Стоит отметить, что полученные оценки прогнозного значения, в соответствии с теоремой Гаусса-Маркова, являются наилучшими в смысле среднеквадратической ошибки в любой момент времени.

Для определения достаточного количества векторов входов модели необходимо для текущего входного вектора  $x_N$  определить область векторов входов из базы данных, допустимо близких к нему (по критерию минимума расстояния между точками  $S$ -мерного пространства). На основе проведения

вычислительного эксперимента на тестовой выборке для построения прогноза в зависимости от разного количества векторов входов определяется достаточное количество векторов входов, отбираемых из базы данных. Проводится сравнение показателей точности прогноза моделей с разным количеством векторов по критериям  $MAE \rightarrow \min$  и  $MSE \rightarrow \min$ , а также минимальной и максимальной ошибки прогноза на тестовой выборке.

Этап 2 заключается в проверке выполнения условий устойчивости (см. раздел 3) для объекта. На основе модели состояния объекта (1-3) вычисляются условия устойчивости для аппроксимирующей (4, 6, 8, 10) и детализирующей (5, 7, 9, 11) частей.

На этапе 3 проводится оценка рискового потенциала путем:

- 1) вычисления вероятности устойчивости состояния объекта  $P$  в прогнозируемый момент времени на основе кратномасштабного вейвлет-преобразования:

$$P = \begin{cases} 1 & \text{все условия устойчивости выполняются,} \\ 0 & \text{не выполняется ни одно условие устойчивости,} \\ P_i & \text{условия устойчивости выполняются частично.} \end{cases}$$

- 2) определения рискового потенциала в зависимости от вероятности устойчивости состояния объекта в прогнозируемый момент времени с использованием вербально-числовой шкалы Харрингтона [25]:

$$RP = \begin{cases} \text{очень высокий} & \text{if } P \in [0; 0, 2], \\ \text{высокий} & \text{if } P \in (0, 2; 0, 37], \\ \text{средний} & \text{if } P \in (0, 37; 0, 64], \\ \text{низкий} & \text{if } P \in (0, 64; 0, 8], \\ \text{очень низкий} & \text{if } P \in (0, 8; 1]. \end{cases}$$

## Заключение

Расширение информационной задачи «ИТ-ТЕИ» на основе интеллектуального анализа данных [17, 19], фрактального анализа, кратномасштабного вейвлет-преобразования, а также прогнозирующих моделей рискового потенциала не только предоставит оперативному персоналу АЭС информацию о работе энергоблока АЭС, но и позволит определить вероятность того, что критические параметры процесса выходят за технологические пределы, даже в случае несанкционированного вмешательства в работу систем, которые приводят к развитию нестабильности различной природы в технологическом процессе.

Разработанный алгоритм оценки рискового потенциала проходил тестирование в рамках информационной задачи «ИТ-ТЕИ» в СВБУ АСУ ТП АЭС для случая неполной оценки параметров, а также выявления аномалий в технологическом процессе.

## Литература

1. Lopez J., Setola R., Wolthusen S.D. Critical Infrastructure Protection // Lecture Notes in Computer Science. Vol. 7130. 2012. – 357p.
2. Hamida Y., Amine B., Mostafa B. Toward resilience management in critical information infrastructure // Proceedings of the 5th World Congress on Information and Communication Technologies (WICT). 2015. – P.101-106.
3. Maglaras L.A., Kim K.-H., Janicke H., Ferrag M.A., Rallis S., Fragkou P., Maglaras A., Cruzg T.J. Cyber security of critical infrastructures // ICT Express. Vol. 4. 2018, issue 1. – P.42-45.
4. Erokhin S.D. Managing Security of Critical Information Infrastructure // Proceedings of 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). 2019. – P.1-4.
5. Cook A., Janicke H., Maglaras L., Smith R. An assessment of the application of IT security mechanisms to industrial control systems // International Journal of Internet Technology and Secured Transactions. Vol. 7. 2017, №2. – P.144-174.
6. Ahmad S., Sanagavarapu L.M., Pal R., Reddy Y.R. Rank Aggregation Approach for Identifying Critical Information Infrastructure // Proceedings of 2018 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI). 2018. – P.1328-1333.
7. Sengupta J., Ruj S., Bit S.D. A Comprehensive Survey on Attacks, Security Issues and Blockchain Solutions for IoT and IIoT // Journal of Network and Computer Applications. Vol. 149. 2020, Article 102481.



8. *De Gusmão A.P.H., Silva M.M., Poletto P., Silva L.C.E., Costa A.P.C.S.* Cybersecurity risk analysis model using fault tree analysis and fuzzy decision theory // *International Journal of Information Management*. Vol. 43. 2018. – P.248-260.
9. *Tsegaye T., Flowerday S.* Controls for Protecting Critical Information Infrastructure from Cyberattacks // *Proceedings of the 2014 World Congress on Internet Security (WorldCIS-2014)*. 2014. – P.24-29.
10. *Herrera L.-C., Maennel O.* A comprehensive instrument for identifying critical information infrastructure services // *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. Vol. 25. 2019. – P.50-61.
11. *Štoller J., Dvořák P.* Basic Types of Critical Infrastructure Objects // *Proceedings of 2019 International Conference on Military Technologies (ICMT)*. 2019. – P.1-7.
12. *Жарко Е.Ф., Полетыкин А.Г., Промыслов В.Г.* Опыт проектирования и внедрения системы верхнего блочного уровня АСУ ТП АЭС // *Автоматика и телемеханика*. 2006. №. 5. – С.65-79.
13. *Полетыкин А.Г., Жарко Е.Ф., Менгазетдинов Н.Э., Промыслов В.Г.* Проблемы оценки надежности и качества программного обеспечения в системах управления // *ИТ-Стандарт*. 2017, Т. 1, №1-1. – С.26-31.
14. *Hashemian H.M.* Aging management of instrumentation & control sensors in nuclear power plants // *Nuclear Engineering and Design*. Vol. 240. 2010, issue 11. – P.3781-3790.
15. *Ma J., Jiang J.* Applications of fault detection and diagnosis methods in nuclear power plants: A review // *Progress in Nuclear Energy*. Vol. 53. 2011, №3. – P.255-266.
16. *Wahlström B.* Systemic thinking in support of safety management in nuclear power plants // *Safety Science*. Vol. 109. 2018. – P.201-218.
17. *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.
18. *Калашиников А.О., Сакрутина Е.А.* Модель прогнозирования рискованного потенциала значимых объектов критической информационной инфраструктуры // *Информация и безопасность*. 2018. Т. 21, вып. 4. – С.465-470.
19. *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)*. – М.: ИПУ РАН, 2018. Т. 2. – С.451-457.
20. *Sakrutina E.A.* The process state identification methodology based on the associative search // *Proceedings of the IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2017)*. 2017. – P.1-5.
21. *Crownover R.M.*, Introduction to fractals and chaos. – Jones and Bartlett books in mathematics, Math Series; First Edition. 1995. – 306 p.
22. *Reyes-Marambio J., Moser F., Gana F., Severino B., Calderón-Muñoz W.R., Palma-Behnke R., Estevez P.A., Orchard M., Cortés M.* A fractal time thermal model for predicting the surface temperature of air-cooled cylindrical Li-ion cells based on experimental measurements // *Journal of Power Sources*. Vol. 306. 2016. – P.636-645.
23. *You X., Jia C., Li J., Zheng A., Li J.* A New Quantitive Predicting Model of Fracturing Fluid Flow-back: Based on Fractal Theory and Fuzzy Statistic Method // *Energy Procedia*. Vol. 158. 2019. – P.3696-3701.
24. *Сакрутина Е.А.* К вопросу устойчивости прогнозирующей модели на основе кратномасштабного вейвлет-преобразования // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2019. Т.23, №2. – С.109-123.
25. *Harrington E.C.* The desirable function // *Industrial Quality Control*. Vol. 21. 1965, №10, – P.494-498.