

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНОГО ОБЪЕКТА

М. В. Тюрин, С. А. Фомин, О. В. Прокофьев

Состав элементов технически сложного объекта (ТСО) характеризуется значительным разнообразием, которое выражается различными по физической природе параметрами контролируемых величин, изменяющимися с разной динамикой. Выбор адекватной модели прогнозирования, позволяющей с заданной вероятностью определить предстоящий выход контролируемого параметра к границам заданного диапазона, является задачей по предупреждению достижения ТСО предаварийного и аварийного состояний.

В данной статье поставлена и решена задача синтеза моделей прогнозирования состояния ТСО, предназначенных для реализации в условиях информационной среды системы мониторинга и контроля (СМиК). В качестве естественного аппарата синтеза информационно-структурных моделей использован аппарат UML-моделирования, обеспечивающий процедуру сквозного синтеза от анализа и структурирования первичной измерительной информации до процедуры генерации структур баз данных и программного кода на языках высокого уровня в соответствии с архитектурой аппаратных средств. На рис. 1 представлена *Mind Mapping Diagram* (MMD-диаграмма) СМиК, отражающая глобальную иерархию типов, включающих физические объекты, а также элементы аппаратно-программного комплекса СМиК.

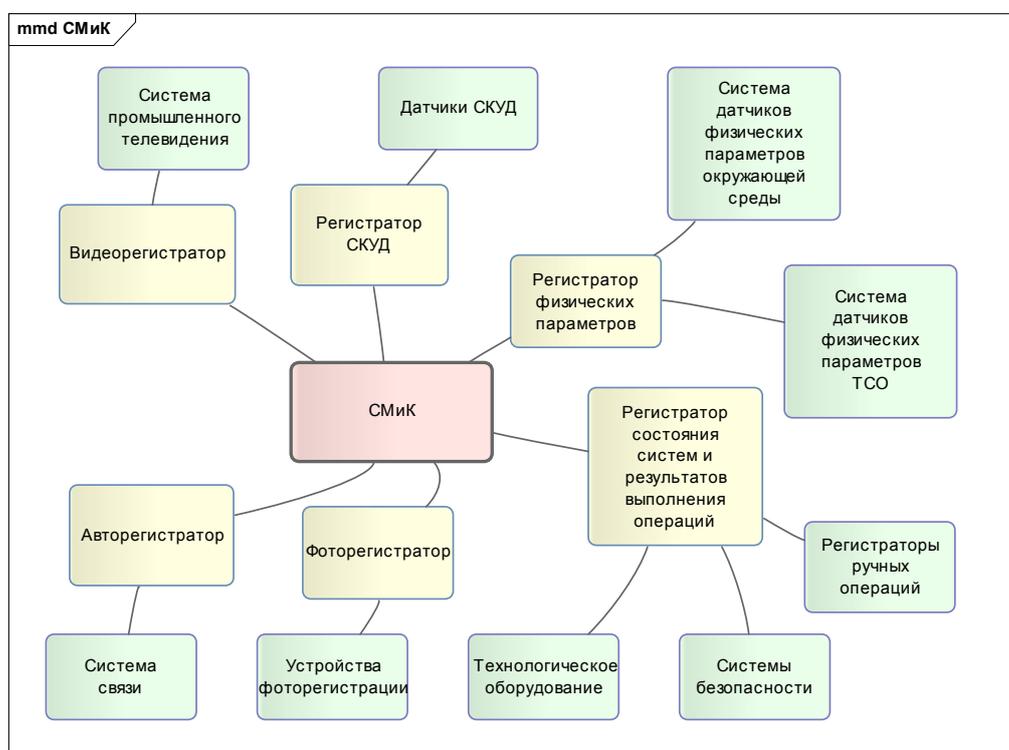


Рис. 1. Mind Mapping Diagram «СМиК»

Рассмотрим алгоритм парно-доминантного выбора математической модели [1–3]. Каждая модель m_i , входящая в $A_{\{K1\}}^B$, характеризуется вектором признаков $Q_{<n>}(n)$, который в частном случае описывается упорядоченной последовательностью элементов

$$Q_{\langle S \rangle}^{(i)} = \langle n^*, \sigma_{\text{BP}}^{2*}, \sigma_0^{2*}, \sigma_{\text{НГ}}^{2*}, AI^* \rangle_i, \quad (1)$$

где n^* – минимальное количество точек, необходимое для получения удовлетворительного результата прогнозирования; σ_{BP}^{2*} – максимальное значение дисперсии временного ряда, при котором данная модель позволяет получить удовлетворительный результат прогнозирования; σ_0^{2*} – максимальное значение дисперсии гауссовских ошибок измерений значений прогнозируемого параметра, при которых модель позволяет получить удовлетворительный результат прогнозирования; $\sigma_{\text{НГ}}^{2*}$ – максимальное для данной модели значение дисперсии негауссовских ошибок измерений значений прогнозируемого параметра; AI^* – показатель, характеризующий возможность применения априорной информации для прогнозирования с помощью данной модели.

Каждый y_j , предъявляемый для прогнозирования, также характеризуется упорядоченной последовательностью элементов

$$Z_{\langle S \rangle}^{(i)} = \langle n, \sigma_{\text{BP}}^2, \sigma_0^2, \sigma_{\text{НГ}}^2, AI \rangle_i, \quad (2)$$

где n – количество точек; σ_{BP}^2 – величина дисперсии; σ_0^2 – величина дисперсии гауссовских ошибок измерений; $\sigma_{\text{НГ}}^2$ – величина дисперсии негауссовских ошибок измерений; AI – показатель, характеризующий наличие априорной информации.

Структура σ^R и правило π_R определяют парно-доминантный механизм выбора

$$M_{\sigma^R}^{\pi_R} = \langle \sigma^R, \pi_R \rangle, \quad (3)$$

который дает возможность сформировать множество $M_{\{K2\}}$, необходимое для дальнейшего выбора наилучшей модели.

Рассмотрим комплексный алгоритм выбора математической модели для прогнозирования технического состояния элементов ТСО.

Парно-доминантный механизм выбора, описываемый выражением (3), дает возможность сформировать множество $M_{\{K2\}}$, необходимое для работы критериально-экстремизационного механизма выбора. Структура σ^R парно-доминантного механизма выбора допускает удобную графовую интерпретацию и может быть представлена в виде дерева решений. Такого рода структура, представленная в виде дерева последовательных решений при нечетком задании векторов $Q_{\langle S \rangle}^{(i)}$ и $Z_{\langle S \rangle}^{(i)}$, по сути дела, является формой представления продукционной базы знаний нечеткого логического регулятора, реализованного по схеме нечеткого компенсатора без обратной связи.

Рассмотрим дерево решений G_R , изображенное на рис. 2. В качестве вершин дерева решений служат варианты моделей для прогнозирования технического состояния, содержащиеся в базе моделей $A_{\{K1\}}^B$. В качестве корней дерева решений служат те минимально необходимые характеристики каждой, входящей в базу моделей, модели

$$Q_{\langle S \rangle}^{(i)} = \langle n^*, \sigma_{\text{BP}}^{2*}, \sigma_0^{2*}, \sigma_{\text{НГ}}^{2*}, AI^* \rangle_i,$$

которые необходимы для удовлетворительной работы этих моделей.

Кроме вершин и корней, дерево решений содержит логические элементы «И» и «ИЛИ». Эти логические элементы необходимы для реализации поэлементного сравнения вектора $Q_{\langle S \rangle}^{(i)} = \langle n^*, \sigma_{\text{BP}}^{2*}, \sigma_0^{2*}, \sigma_{\text{НГ}}^{2*}, AI^* \rangle_i$, характеризующего каждую модель из базы моделей и вектора $Z_{\langle S \rangle}^{(j)} = \langle n, \sigma_{\text{BP}}^2, \sigma_0^2, \sigma_{\text{НГ}}^2, AI \rangle_j$, характеризующего прогнозируемый временной ряд, $\langle \sigma_0^{2*}, \sigma_{\text{НГ}}^{2*}, AI^* \rangle_i$, характеризующего каждую модель из базы моделей и вектора $Z_{\langle S \rangle}^{(j)} = \langle n, \sigma_{\text{BP}}^2, \sigma_0^2, \sigma_{\text{НГ}}^2, AI \rangle_j$, характеризующего прогнозируемый временной ряд.

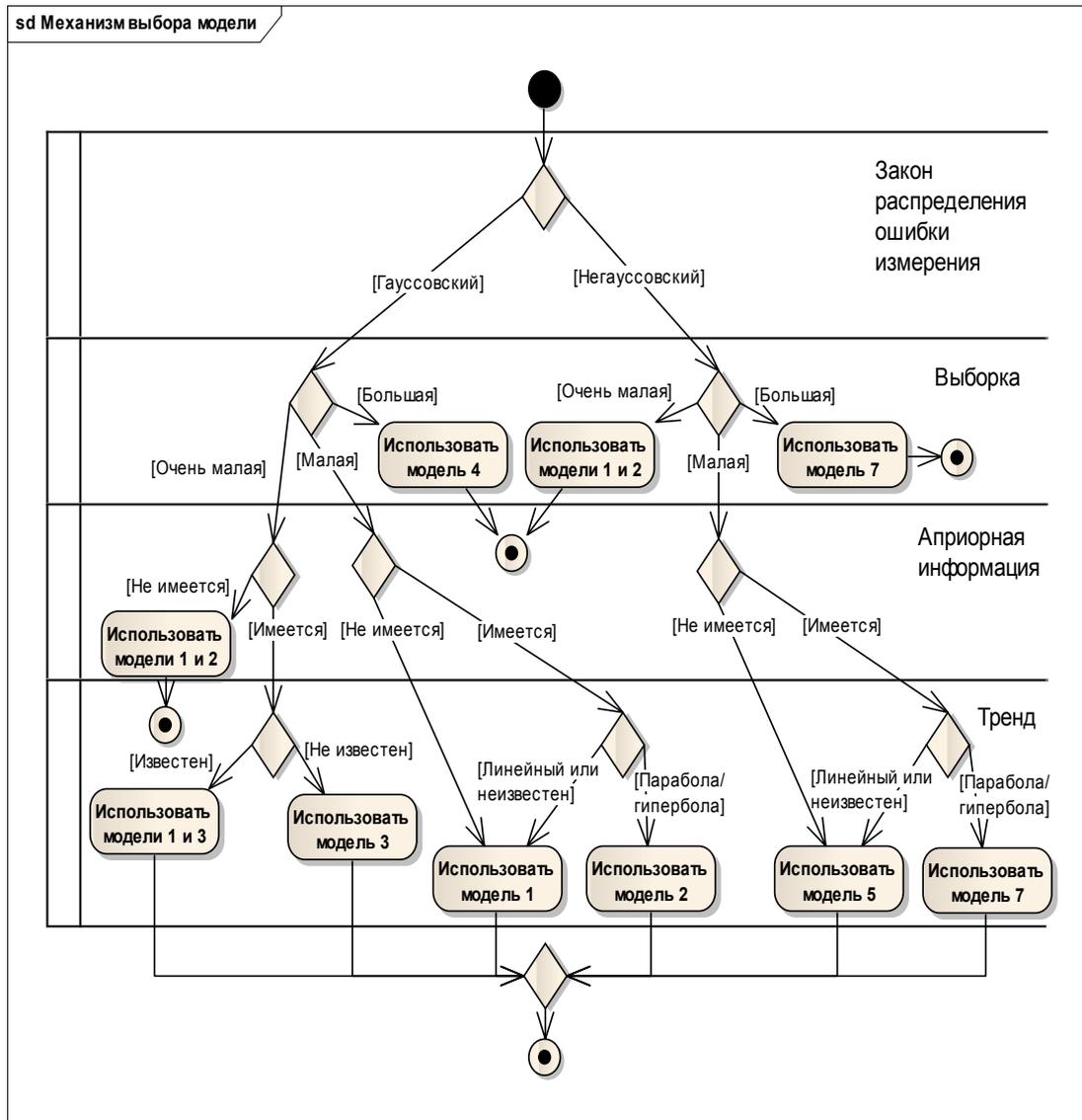


Рис. 2. Дерево решений, представляющее структуру алгоритма выбора модели

В табл. 1 представлена структура парно-доминантного алгоритма выбора, реализующего механизм построения базы знаний нечеткого компенсатора без обратной связи.

Таблица 1

Структура парно-доминантного алгоритма выбора

Традиционные модели				Робастные модели			
Номер модели	Простые модели $L \leq 3$	Номер модели	Сложные модели $L > 3$	Номер модели	Простые модели $L \leq 3$	Номер модели	Сложные модели $L > 3$
1	МНК с фиксированным линейным трендом	4	Модель Бокса–Дженкинса	5	Модели с фиксированным линейным трендом	7	Устойчивая авто-регрессия
2	МНК с изменяемым типом тренда			6	Модель с изменяемым типом тренда		
3	Модифицированный метод максимального правдоподобия						

На дерево решений дуга от корней $n^*, \sigma_{BP}^{2*}, \sigma_0^{2*}, \sigma_{HG}^{2*}, A_L^*$ проводится к вершине $m^{(i)}$, если $Q_{\langle S \rangle}^{(i)} \geq Z_{\langle S \rangle}^{(j)}$, т.е.

$$n_{(i)}^* \leq n_{(j)}, \sigma_{BP(i)}^{2*} \geq \sigma_{BP(j)}^{2*}, \sigma_{0(i)}^{2*} \geq \sigma_{0(j)}^{2*}, \sigma_{HG(i)}^{2*} \geq \sigma_{HG(j)}^{2*}, A_{L(i)}^* \leq A_{L(j)}^*.$$

Формирование множества $M_{\{K2\}}$ происходит с использованием дерева решений, по правилу \mathcal{P}_R , реализующему выбор модели в результате поэлементного сравнения векторов $Q_{\langle S \rangle}^{(i)}$ и $Z_{\langle S \rangle}^{(j)}$. Согласно правилу \mathcal{P}_R на графе G_R активизируется подграф, вершины которого являются вариантами моделей из базы моделей $A_{\{K1\}}^B$, а в качестве корней служат только те корни графа G_R , которые удовлетворяют соотношению $Q_{\langle S \rangle}^{(i)} \geq Z_{\langle S \rangle}^{(j)}$. Далее в результате работы критериально-экстремизационного механизма выбора $M_{\sigma^{KЭ}}^{\pi_{KЭ}} = \langle \sigma^{KЭ}, \pi_{KЭ} \rangle$ или $M_{\sigma^{KЭ}}^{\pi_{Пар}} = \langle \sigma^{KЭ}, \pi_{Пар} \rangle$ происходит формирование множества эффективных решений. В этом случае задача выбора наилучшей для заданного временного ряда модели может быть сведена к многокритериальной задаче дискретной оптимизации, сформулированной на основании критериев отдельных моделей.

Нахождение компромиссного решения может быть сведено к решению следующей задачи:

$$z^K = \arg \min_{z \in A^b} \max_{i \in I} g_i \omega_i(m). \quad (4)$$

Таким образом, решением задачи выбора модели для прогнозирования состояния элементов ТСО является такая модель, у которой максимальное взвешенное отклонение от оптимума на множестве моделей является минимальным. В случае неединственности решения (2) к множеству решений $m^K \in M^K$ может быть применен дополнительный критерий

$$\sum_{i \in I} g_i \omega_i(m) \rightarrow \min_{m^K \in M^K}. \quad (5)$$

Для нахождения компромиссного решения в постановке (3)–(4) может быть применена методика последовательного анализа и отсеивания вариантов.

В ряде случаев, когда множество решений m^K не единственно, целесообразно допустить все такие модели к применению с объединением результатов частных моделей в единый синтезированный прогноз [4].

Таким образом, синтезированные информационно-структурные модели состояния ТСО описывают возможные варианты решения задачи идентификации состояний ТСО в условиях информационной среды интеллектуальных СМиК ТСО на аппаратно-программном уровне.

При высокой динамике процессов увеличивается «цена» дополнительных наблюдений временного ряда для обеспечения приемлемого уровня надежности прогноза. Уменьшение объема выборки и переход к малым периодам упреждения прогнозируемого процесса внесут коррективы в базу моделей в табл. 1. В этом случае в структуре парно-доминантного алгоритма выбора классами моделей могут быть отражены модели аналитического и механического сглаживания. Первая группа моделей отражает развитие процессов с устойчивой тенденцией развития на всем периоде наблюдений или на отрезках аргумента – времени, а вторая группа моделей в наибольшей степени соответствует потребностям анализа менее устойчивых процессов, в которых наибольшей информационной ценностью обладают последние наблюдения.

В первом случае можно рассмотреть не только группу кривых роста и гибридные модели на их основе, но и модели на основе обобщенного метода наименьших квадратов, если присутствует явление гетероскедастичности остатков [5, 6]. Выявление этого свойства производится на основе критериев Спирмена, Гольдфельда-Квандта, Парка, Уайта, Глейзера и ряда других. Усложнение выбора модели может произойти в случае излома тренда, определяемого по критериям Чоу и Гуярати [7, 8]. При меняющейся структуре временного ряда кусочная аппроксимация тренда внесет коррективы в выбор набора данных для построения прогноза.

Во втором случае возможно эффективное применение методов взвешенной скользящей средней величины, экспоненциального сглаживания, гибридных моделей на их основе, адаптивных моделей Брауна, Хольта-Уинтерса и др.

Дополнительные классификационные признаки и объекты базы моделей позволят распространить описанный принцип выбора модели для построения достаточно надежного прогноза наиболее быстро протекающих процессов.

Список литературы

1. Структурный подход к анализу состояний сложных систем / М. В. Тюрин, А. Б. Щербань, В. В. Соловьев, Е. Н. Мурашкина // Современные информационные технологии. – 2011. – № 14. – С. 72–76.
2. Тюрин, М. В. Синтез информационно-структурных моделей состояния технически сложных объектов наземной инфраструктуры / М. В. Тюрин // Современные информационные технологии. – 2012. – № 15. – С. 16–19.
3. Тюрин, М. В. Математические модели состояния систем мониторинга и контроля технически сложных объектов наземной инфраструктуры / М. В. Тюрин // Современные информационные технологии. – 2012. – № 15. – С. 11–15.
4. Дмитриенко, А. Г. Идентификация закономерностей в дисперсии остаточного компонента временного ряда / А. Г. Дмитриенко, О. В. Прокофьев, А. Е. Савочкин // Современные информационные технологии. – 2013. – № 18 (18). – С. 59–63.
5. Математическое обеспечение автоматизированной информационной подсистемы проверки стабильности структуры временного ряда / М. Ю. Михеев, О. В. Прокофьев, И. Ю. Семочкина, А. Е. Савочкин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Сер. Технические науки. Информационная технология. – 2014. – № 1 (3). – С. 193–203.
6. Прокофьев, О. В. Алгоритмическая модификация теста Чоу для автоматизированной проверки гипотезы о структурной стабильности тренда / О. В. Прокофьев, А. Е. Савочкин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2014. – № 3 (19). – С. 183–188.
7. Yurkov, N. K. Characteristic features of the control of complex systems utilizing conceptual models / N. K. Yurkov // MEASUREMENT TECHNIQUES. – 2004. – Apr. – Vol. 47, № 4. – P. 339–342.
8. Yurkov, N. K. Synthesis of a conceptual model of a subject domain. Characteristic features of modeling complex systems / N. K. Yurkov // MEASUREMENT TECHNIQUES. – 2004. – Feb. – Vol. 47, № 2. – P. 128–133.

Тюрин Михаил Владимирович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8)
E-mail: preobrazovatel@niifi.ru

Фомин Сергей Анатольевич

главный специалист,
отдел промышленной безопасности и надзора
за природопользованием,
Центр эксплуатации объектов
наземной космической инфраструктуры
(107996, Россия, Москва, ул. Щепкина, 42)

Прокофьев Олег Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информатики, математики
и общегуманитарных наук,
Финансовый университет
при Правительстве Российской Федерации
(Пензенский филиал)
(440052, Россия, г. Пенза, ул. Калинина, 33Б)

Аннотация. Актуальность и цели. Первичные преобразователи сигналов, передающих информацию о состоянии технически сложного объекта (ТСО), отличаются разнообразием набора выходных величин, скоростей их изменения и динамических диапазонов

Tyurin Mikhail Vladimirovich

candidate of technical sciences,
senior staff scientist,
Scientific Research Institute of Physical Measurement
(440026, 8 Volodarsky street, Penza, Russia)

Fomin Sergey Anatol'evich

chief specialist,
department of industrial safety
and environmental supervision,
Center for exploitation
of ground-based space infrastructure
(107996, 42 Shchepkina street, Moscow, Russia)

Prokof'ev Oleg Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of computer science, mathematics
and humanities sciences,
Financial University under the Government
of the Russian Federation (Penza branch)
(440052, 33b Kalinina street, Penza, Russia)

Abstract. Background. Primary signal transducers, that convey information about the state of technically complex object (TCO), differ in variety of set of output quantities, of change speeds and of dynamic value ranges. There is the need for formulation of the adaptive se-

значений. Возникает необходимость разработки адаптивной методики выбора «наилучшей» модели временного ряда для прогнозирования состояния отдельного элемента системы. В процессе выбора должна быть учтена возможность программно-аппаратной реализации в условиях информационной среды системы мониторинга и контроля. Оценка будущего состояния элемента имеет значение для предупреждения аварийных ситуаций и штатных режимов эксплуатации ТСО. *Материалы и методы.* Применен парно-доминантный механизм выбора модели временного ряда. Использована методология UML-моделирования, обеспечивающая переход от анализа и структурирования первичной измерительной информации до процедуры генерации структур баз данных и программного кода. Процедура окончательного выбора «наилучшей» модели была сформулирована как многокритериальная задача дискретной оптимизации. *Результаты.* Построено комплексное описание информационной среды системы мониторинга и контроля ТСО на основе MMD-диаграммы физических объектов. Предложен алгоритм парно-доминантного выбора математической модели временного ряда на основе дерева решений. Разработаны дополнительные ограничения для случая возникновения неединственного решения о выборе. Даны рекомендации по выбору модели в условиях малых выборок наблюдений временного ряда. *Выводы.* Выбор наилучшей модели временного ряда для прогнозирования состояния ТСО возможен на основе дерева решений, реализующего парно-доминантный алгоритм выбора. При необходимости коротких выборок наблюдений временного ряда набор моделей корректируется.

Ключевые слова: прогнозирование состояния, технически сложный объект, система мониторинга и контроля, предупреждение аварийных ситуаций.

УДК 629.78.05

Тюрин, М. В.

Разработка моделей прогнозирования состояния элементов технически сложного объекта / М. В. Тюрин, С. А. Фомин, О. В. Прокофьев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 73–78.

lection procedure of the best model of time series to predict the state of the system element. The selection process should take into account the possibility of software and hardware implementation in terms of the information environment monitoring and control system. The assessment of the future element state is important for the prevention of accidents and emergency situation of technically complex object. *Materials and methods.* The paired-dominant choice of the time series model was applied. UML-modeling methodology was used, which provides the transition from the analysis and structuring of the primary measurement data till the generation procedure of database structures and of program code. The procedure of definitive choice of the "best" model was formulated as the multicriterial task of discrete optimization. *Results.* The complex description of information environment of monitoring and control system of TCO was built based on the diagram MMD of physical objects. The algorithm of the paired-dominant choice of the mathematical model of the time series has been proposed on the basis of decision tree. Additional limitations were designed for the case of occurrence of ambiguous decision about the choice. Recommendations for choosing model in the conditions of small samples of observations of the time series were made. *Conclusions.* Choosing the best time series model to predict the state of the TCO is possible on the basis of a decision tree implementing the algorithm of the paired-dominant choice. When short samples of the time series observations are necessary, the models set is corrected.

Key words: predictive modeling of the state, technically complex object, monitoring and control system, prevention of accidents and emergency situation.