

УДК 629.78

Д.Н. Гула, кандидат
технических наук
А.В. Спесивцев, доктор
технических наук, доцент

НЕЧЕТКО-ВОЗМОЖНОСТНЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В статье представлен нечетко-возможностный подход к прогнозированию технического состояния объектов наземно-космической инфраструктуры (ОНКИ). Данный подход, в отличие от общепринятых математических моделей, позволяет осуществлять прогноз технического состояния ОНКИ с использованием знаний и опыта экспертов (экспертный опрос).

Ключевые слова: нечетко-возможностный подход; прогнозирование; техническое состояние; объекты наземно-космической инфраструктуры.

В настоящее время характерными требованиями, предъявляемыми к процессам применения современных систем контроля и управления сложными ОНКИ, являются:

- оперативность и достоверность оценивания состояния данных объектов;
- своевременность и обоснованность принятия решений, связанных с наилучшим использованием возможностей ОНКИ в конкретных условиях обстановки.

Следует отметить, что существующие и проектируемые ОНКИ являются, как правило, сложными многофункциональными системами, созданными на базе использования новых информационных технологий. Поэтому процессы применения таких объектов по целевому назначению, реализуемые в рамках соответствующих систем управления ОНКИ, сопровождаются появлением огромных потоков разнородной информации и отличаются как по физической природе измеряемых и контролируемых параметров, так и по составу источников информации о компонентах вектора технических состояний ОНКИ.

Современные сложные объекты (СЛО) функционируют в условиях, задаваемых, как правило, конечным множеством количественных и неколичественных (вербальных) переменных и соответствующих ограничений. Примерами СЛО могут служить практически все существующие объекты, входящие в состав транспортно-логистических, космических, экономических, производственных, сельскохозяйственных и др. систем. Задачи оценивания состояния СЛО формулируются и описываются либо вербально на профессиональном языке данной отрасли знаний, либо формально с использованием различных классов моделей [1-4; 8-9].

Широкое применение на практике при оценивании состояний СЛО нашли методы и модели, базирующиеся на использовании экспертных знаний (ЭКЗ). При этом под ЭКЗ понимаются явные и неявные знания субъекта, накопленные в процессе его практической деятельности в конкретной предметной области и позволяющие ему выступать в качестве «интеллектуальной измерительно-диагностической системы» на различных этапах жизненного цикла СЛО [2].

Неявные знания (англ. *tacit knowledge*) – это знания субъекта, которые не могут быть формализованы в виде слов или алгоритмов и переданы другим субъектам. В состав неявных знаний ученые-психологи включают в том числе и такие свойства человеческого мышления, как интуиция, секреты мастерства, умения, навыки и опыт. На практике эффективность использования неявных экспертных знаний наиболее ярко проявляется в ситуациях, когда лицу, принимающему решения (ЛПР), необходимо обоснованно и своевременно формировать соответствующие управляющие воздействия при недостаточности, неполноте и противоречивости информации о текущей обстановке в условиях существенных временных ограничений.

Качество оценивания состояния СЛО непосредственно влияет на эффективность, оперативность и обоснованность принятия решений, связанных с функционированием СЛО [3]. При оценивании указанных состояний СЛО остро встают вопросы интерпретации неколичественных (неизмеряемых, вербальных) компонент информации количественными категориями [1; 4; 8]. В таких условиях оценивание фактического состояния СЛО представляется важнейшей задачей, требующей научно обосно-

ванного подхода к выбору методов интеграции (обобщения) количественной и нечисленной информации о текущем состоянии объекта в условиях неопределенности.

Нечетко-возможностный подход к построению математических моделей изучаемого явления

Задачи выработки и принятия решений о состоянии СЛО справедливо относят к неструктурированным или слабоструктурированным [1-4; 8].

Исследования показывают [3; 4], что процесс подготовки исходных данных о состоянии СЛО должен быть в достаточной степени формализован, чтобы на основе собранной информации представлялась возможность получения количественных оценок состояния СЛО, например, с использованием системы продукционных правил или нечетко-возможностной модели (НВМ) [1; 2], дополненными критериями отнесения его состояния к определенному классу.

Наиболее перспективным направлением в извлечении, представлении и формализации явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния СЛО является моделирование, суть которого состоит в дальнейшем развитии принципа нечетко-возможностного подхода (по Заде-Мамдани) применительно к представлению СЛО с использованием элементов теории нечетких множеств и нечеткой логики.

Существующая и широко используемая на практике классическая коммутативная диаграмма реализации процесса выработки и принятия решения о состоянии СЛО на основе технологии накопления и обработки данных (*экстенционал* – по Д. Поспелову [8]) приведена на рисунке 1а [5], а разработанная в [1; 2] коммутативная диаграмма на основе явных и неявных экспертных знаний – выделенная цветом – представлена на рисунке 1б (*интенционал* – по Д. Поспелову [8]).

На рисунке 1 обозначены: T – множество моментов времени t , в которых наблюдается объект; U, Y – множество входных U и выходных Y воздействий соответственно; X – множество состояний объекта, характеризующее в каждый момент времени $t \in T$ набором переменных $x_k, k = 1, \dots, n$; Y/Ξ – фактор-множество состояний СЛО; S – пространство

шкал измерения входных и выходных воздействий; R – множество возможных корректировок решений о состоянии СЛО посредством отображений ψ и ξ ; g – оператор выходов, описывающий механизм (формулы, алгоритмы) формирования выходного воздействия Y ; η – оператор шкалирования всех входных и выходных переменных; χ – оператор взаимно-однозначного соответствия Y/Ξ со шкалой выходной переменной Y ; $\vartheta = \eta \circ \chi: Y/\Xi$ – композиция отношений в задаче диагностирования состояний СЛО.

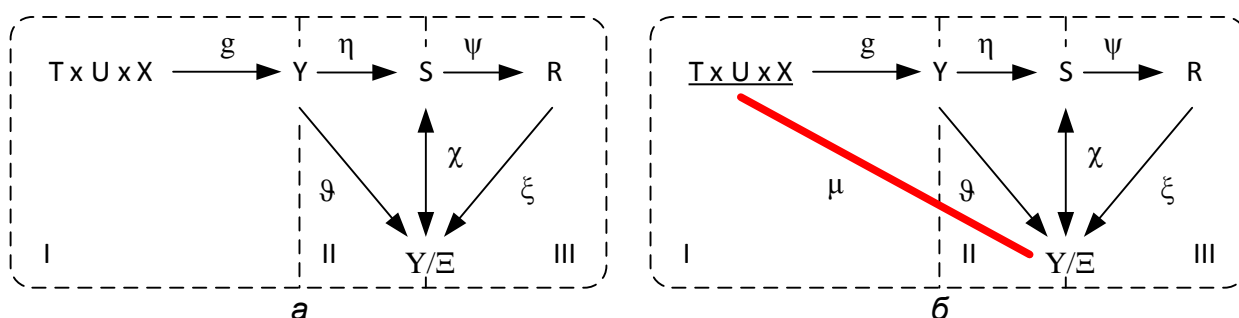


Рисунок 1 – Технологии реализации процессов выработки и принятия решений на основе: а - данных и б – экспертных знаний (выделено цветом)

Проведем модификацию, введя следующий новый элемент μ - оператор принятия решения экспертом при оценивании состояний СЛО. В указанной ситуации раскрытие неопределенности состояний СЛО на основе явных и неявных экспертных знаний позволяет конструктивно сформировать следующее отображение:

$$\mu: T \times U \times Y \rightarrow Y/\Xi.$$

Для формирования этого отображения предложена коммутативная схема (рисунок 2) [2], представляющая последовательность взаимосвязанных процессов извлечения, представления и формализации явных и неявных экспертных знаний.

Метазнания $MZ^{\exists}(q, t, \mu)$ эксперта включают профессиональные явные $Z_{\text{пр}}^{\exists}(q, t, \mu)$ и неявные $Z_{\text{н}}^{\exists}(q, t, \mu)$ знания о состоянии конкретного СЛО, где $q \in Q$ – множество уровней компетенций и эрудиции по решаемым задачам.

При этом само отображение μ , как следует из рисунка 2, может быть представлено композицией перечисленных отображений:

$$\mu = g_1 \circ g_2 \circ g_3,$$

где g_1 – извлечение множества характеристик (параметров) состояния конкретного СЛО $Z_K^{\exists}(q, t, \mu)$ из метазнаний $MZ^{\exists}(q, t, \mu)$ эксперта, включающих профессиональные явные $Z_{\text{пр}}^{\exists}(q, t, \mu)$ знания, состоящие в умении эксперта разобраться в проблеме, провести постановку задачи, неявные знания $Z_H^{\exists}(q, t, \mu)$, навыки, опыт, интуиция, а также знания в сопредельных предметных областях $Z_{\text{сопр}}^{\exists}(q, t, \mu)$; g_2 – представление характеристик $Z_K^{\exists}(q, t, \mu)$ в виде лингвистических переменных и формирование факторного пространства $Z_{\text{фп}}^{\exists}(q, t, \mu)$, в котором эксперт принимает решение о состоянии СЛО для конкретной задачи; g_3 – формализация явных и неявных экспертных знаний.

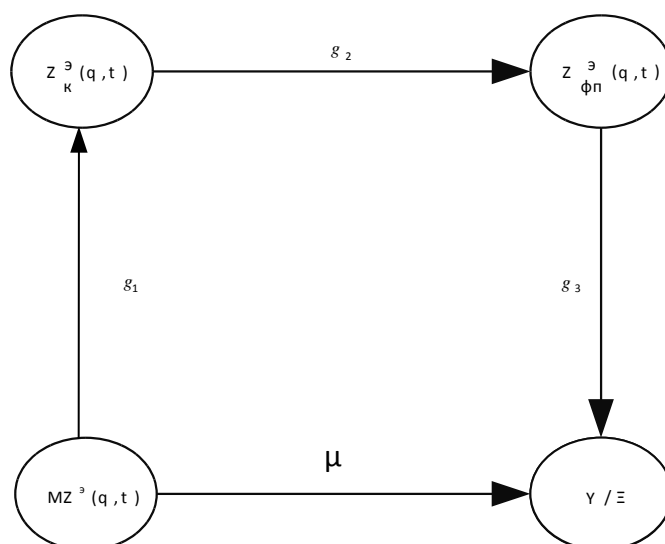


Рисунок 2 – Коммутативная схема процессов извлечения, представления и формализации явных и неявных экспертных метазнаний

При этом g_3 предусматривает построение моделей формализованного представления явных и неявных экспертных знаний о состоянии СЛО, в том числе и в виде полиномиального выражения с использованием методов теории планирования экспериментов на множестве нечетких продукционных правил факторного пространства $Z_{\text{фп}}^{\exists}(q, t, \mu)$ с диагностированием на фактор-множестве Y/Ξ классов состояний СЛО, элементы которого в ходе распознавания должны быть отнесены к одному из множества классов Y/Ξ .

Таким образом, на концептуальном уровне описания обобщенная структура и содержание решаемых задач, связанных с разработкой моделей и методов извлечения, представления, формализации и структуризации явных и неявных экспертных знаний для оценивания состояния СЛО, могут быть представлены в следующем виде:

$$\langle X, \Phi_z, E_{znp}, F_z, M_z, MZ^{\exists}(q, t, \mu), Z_{np}^{\exists}(q, t, \mu), Z_H^{\exists}(q, t, \mu), Z_{сопр}^{\exists}(q, t, \mu), K, T/\Xi \rangle,$$

где Φ_z – множество методов извлечения знаний; E_{znp} – множество методов представления знаний; F_z – множество методов и алгоритмов формализации знаний; M_z – множество условий, необходимых для выполнения всех операций при построении моделей; K – множество показателей качества решения задач оценивания состояния СЛО; T/Ξ – фактор-множество классов состояния СЛО, к одному из которых следует отнести результат определения.

Примеры построения нечетко-возможностных моделей состояния ОНКИ.

Пример 1. Решение задачи оценивания состояния ОНКИ рассматривалось как возможность возникновения дефектов металлооблицовки стартового комплекса после пуска ракет космического назначения (РКН) [6; 8]. При этом в результате содержательных бесед с экспертами были выделены наиболее существенные переменные, которые составили факторное пространство для создания НВМ:

X_1 – количество циклов работы (количество пусков РКН), целые числа;

X_2 – конструктивная схема закрепления листов металлооблицовки (качественная переменная: «–1» – болтовая, «+1» – сварная);

X_3 – толщина листов металлооблицовки, мм;

X_4 – марка стали листов металлооблицовки (качественная переменная: «–1» – Ст3, «+1» – Ст45);

X_5 – совокупная характеристика РКН (качественная переменная: «–1» – легкая, «+1» – тяжелая);

X_6 – совокупная характеристика, определяющая климатические условия (качественная переменная: «–1» – лето, «+1» – зима);

Y – возможность (субъективная вероятность) возникновения дефекта листов металлооблицовки нулевой отметки стартового комплекса.

Эксперт на основе своих явных и неявных профессиональных знаний заполнял специальную опросную матрицу [1; 2], строки которой представляли нечеткие продукционные правила имплицативного типа «если ..., то ...». Эксперт оценивал предъявляемые ситуации (строки опросной матрицы) вербальными оценками Y по шкале возможностей «низкая» – «ниже средней» – «средняя» – «выше средней» – «высокая». Такими операциями осуществлялось извлечение и представление явных и неявных экспертных знаний.

Затем следовала процедура «арифметизации» вербальных мнений эксперта по шкале Y как лингвистической переменной, для которой априорно устанавливалось графическое соответствие переходов от лингвистических оценок к количественным значениям. Такая процедура обеспечивала переход от теории нечетких множеств к операции формализации экспертных знаний аналитическим выражением методами теории планирования экспериментов [1; 6-9].

В результате обработки экспертной информации было получено полиномиальное выражение, адекватно описывающее явление возникновения дефектов в металлооблицовке нулевой отметки стартового комплекса в качестве показателя изменения ее состояния при любом способе закрепления в выбранном факторном пространстве:

$$Y = 0,412 + 0,073x_1 + 0,059x_2 - 0,026x_3 + 0,105x_5 + 0,026x_6 + 0,035x_1x_4 - 0,045x_2x_5 - 0,026x_3x_4 - 0,021x_4x_6 - 0,035x_1x_2x_6 + 0,026x_1x_3x_5 + 0,04x_2x_3x_4. \quad (1)$$

Используя аналитическое выражение (1) как модель, были получены следующие результаты.

Во-первых, проведенный численный эксперимент позволил оценить силу влияния соответствующего фактора на зависимую переменную Y в присутствии влияния всех остальных переменных факторного пространства и показать, что по мере увеличения срока эксплуатации металлооблицовки их воздействие изменяется. Так, например, существенно усиливается негативное воздействие X_1 – количество пусков РКН. Такой вывод не нов, новым является количественная оценка такого влияния.

Во-вторых, пуски РКН тяжелого класса вместе с увеличением частоты пусков способны привести к существенному росту повреждений металлооблицовки со всеми вытекающими последствиями, что существенно увеличивает риск возникновения дефектов. Вместе с тем удалось убедительно доказать, что замена сварной схемы закрепления на болтовую существенно повышает ресурс металлооблицовки даже при пуске РКН тяжелого класса (таблица 1) [6].

Таблица 1 – Количественная оценка влияния факторов

Космодром	Количество пусков	Конструктивная схема закрепления листов металлооблицовки	Толщина листа металлооблицовки, м	Марка стали листов металлооблицовки	Совокупная характеристика РКН	Совокупная характеристика, определяющая климатические условия	Рассчитанная возможность возникновения дефекта	Принадлежность к терму
Плесецк	5	Сварная	0,02	Ст3	РН «Союз»	Зима	0,484	С-ВС
Плесецк	7	Сварная	0,02	Ст3	РН «Союз-2» – РБ «Фрегат»	Зима	0,519	С-ВС
Плесецк	1	Болтовая	0,02	Ст3	Ангара А-1	Лето	0,242	Н-НС
Плесецк	2	Болтовая	0,02	Ст3	Ангара А-5	Зима	0,305	НС
Байконур	1	Сварная	0,02	Ст3	Протон	Лето	0,564	ВС

Пример 2. Оценивание технического состояния химических источников тока [7].

Принятая система оценивания технического состояния (ТС) химических источников тока (ХИТ) космодрома «Плесецк» осуществлялась на основе выборочного контроля, который предусматривал проведение испытаний с разрушением приборов, что приводило к большим временным и экономическим затратам.

Задача состояла в том, чтобы создать экспресс-методику неразрушающего оценивания технического состояния ХИТ в условиях существенной неопределенности на базе экспертных знаний.

Из более чем 20 эксперт выбрал следующие входные переменные:

X_1 – продолжительность срока службы, (количество циклов);

X_2 – фактическая величина электрической емкости ХИТ;

X_3 – величина сопротивления изоляции между электрическими цепями и корпусом батареи, электрическими цепями и цепями сигнализирующих устройств;

X_4 – величина разбаланса энергетических характеристик между аккумуляторами в батарее;

X_5 – состояние электрических цепей сигнализирующих датчиков;

X_6 – режим эксплуатации;

X_7 – наличие признаков разгерметизации (вздутие аккумуляторов, подтеки электролита), наличие признаков коррозии корпуса, нарушение лакокрасочного покрытия.

Выходная переменная: Y – обобщенный показатель технического состояния (ОПТС) ХИТ.

Полиномиальное уравнение для расчета текущего значения ОПТС, полученное по разработанной методике [1], приняло вид:

$$\begin{aligned}
 Y = & 0,416 + 0,0787x_1 + 0,131x_2 + 0,0313x_4 + 0,0102x_6 + 0,0948x_7 + \\
 & + 0,0154x_1x_4 - 0,0106x_1x_5 - 0,0257x_1x_6 + 0,0105x_2x_5 - 0,0106x_3x_5 + \\
 & + 0,0107x_4x_6 + 0,0105x_4x_7 - 0,0107x_1x_2x_7 + 0,0104x_1x_2x_6 - \\
 & - 0,011x_1x_2x_7 - 0,0106x_1x_3x_4 + 0,0154x_2x_4x_7 + 0,0209x_3x_4x_5 + \\
 & + 0,0101x_3x_5x_6 - 0,0107x_3x_5x_7.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Заключение

Разработанная технология построения математических моделей на основе нечетко-возможностного подхода к формализации явных и неявных экспертных знаний о состоянии ОНКИ дает возможность моделирования практически любой «сложной технической системы» при наличии высококвалифицированных специалистов, достаточно эффективно эксплуатирующих такие системы в реальных условиях «существенной неопределенности».

Предлагаемый подход к построению моделей ТС ОНКИ обладает еще несколькими преимуществами.

Во-первых, он дает существенную (на порядки) экономию времени и средств в силу рецептурной разработанности методики применения для решения инженерных практических или научных задач.

Во-вторых, использование экспертных знаний применительно к оцениванию ТС конкретного ОНКИ осуществляется экспертом в условиях технологических регламентов его функционирования, что сводит к минимуму степень риска выработки логико-лингвистической модели неправильного решения, а мониторинг в режиме реального времени способствует раннему обнаружению приближения к запредельным (предаварийным) состояниям.

В-третьих, фактически реализован наиболее общий подход к решению распознавания технического состояния сложных технологических процессов, объектов или явлений любой сложности в пространстве нечетких переменных.

Список использованных источников

1. Моделирование слабо формализованных систем на основе явных и неявных экспертных знаний / М.Б. Игнатъев [и др.]. СПб.: Политех-пресс, 2018. 430 с.
2. Спесивцев А.В. Эксперт как «интеллектуальная измерительно-диагностическая система» // Материалы XIII межд. конф. по мягким вычислениям и измерениям. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. Т. 2. С. 28-34.
3. Миронов А.Н. Теоретические основы и методы многомодельного прогнозирования долговечности сложных военно-технических систем космического назначения. СПб.: Изд-во МО РФ, 2000. 329 с.
4. Майданович О.В., Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Комплексная автоматизация мониторинга состояния космических средств на основе интеллектуальных информационных технологий // Информационные технологии: Приложение. 2011. №10. 38 с.
5. Теоретические основы и методы оптимизации анализа технического состояния сложных систем: монография / В.В. Мышко [и др.]. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. 303 с.
6. Гула Д.Н. Логико-лингвистическая модель прогнозирования изменения технического состояния металлооблицовки нулевой отметки стартового комплекса // Вооружение и экономика. 2019. № 4(50). С. 30-36.
7. Кунько А.Е. Оценивание технического состояния химических источников тока на основе неявных экспертных знаний // Информация и космос. 2010. № 4. С. 42-49.
8. Поспелов Д.А. Логико-лингвистические модели в системах управления. М.: Наука, 1981. 292 с.
9. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 168 с.