Ю. А. Ивашкин, Структурно-параметрическое моделирование и идентификация аномальных ситуаций в сложных технологических системах, *Пробл. управл.*, 2004, выпуск 3, 39–43

УДК 001.8+007.5

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ АНОМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЙ В СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Ю. А. Ивашкин

Московский государственный университет прикладной биотехнологии

Рассмотрены матричные модели структурно-сложных ситуаций взаимодействия в больших системах и алгоритмы их идентификации и прогнозирования.

Предлагаемый подход к моделированию и идентификации аномальных ситуаций в больших системах основан на формализованном описании в матричной форме влияния различных факторов на критерий достижения цели, выражаемый многомерной суммой взвешенных нормированных отклонений параметров состояния системы от заданных значений [1, 2].

Эффективность функционирования системы любой физической или социальной природы описывается вектором параметров $Y = \{y_1, ..., y_m\}$ или критерием $Q(y_1, ..., y_m)$ оценки состояния системы (качество продукции, производительность, себестоимость, КПД и т. п.). Компоненты вектора Y в общем случае являются функциями характеристик входных потоков $G = \{g_1, ..., g_r\}$ и параметров состояния системы $X = \{x_1, ..., x_n\}$, которые, в свою очередь, зависят от факторов возмущения $V = \{v_1, ..., v_q\}$ и управляющих воздействий $U = \{u_1, ..., u_p\}$.

Изменение состояния системы в первом приближении можно описать линейными уравнениями в приращениях

$$Q(Y) = \sum_{i=1}^{m} q_i \Delta y_i$$

$$\Delta y_i = \sum_{j=1}^{n_x} c_{ij} \Delta x_j + \sum_{k=1}^{n_g} d_{ik} \Delta g_k, \quad i = \overline{1, m} \qquad (1)$$

$$\Delta x_i = \sum_{\nu=1}^{n_\nu} p_{j\nu} \Delta v_\nu + \sum_{\mu=1}^{n_\mu} r_{jm} \Delta u_\mu, \; j = \overline{1, n_x},$$

где q_i, c_{ij}, d_{ik}, $p_{j\nu}$, и $r_{j\mu}$ — коэффициенты линейной множественной регрессии между соответствующими переменными.

Система уравнений (1) может служить основой структурно-параметрического моделирования технологических систем и описывать их аномальные состояния. При этом все контролируемые параметры целесообразно привести к безразмерной шкале относительных величин

$$z_{ij} = \frac{z_{ij}^t - z_{ij}^0}{\Delta z_{ij}^0},$$

где z_{ij} — j-й параметр i-го множества G, U, V, X и Y; z_{ij}^t и z_{ij}^0 — фактическое и нормативное значения j-го параметра в i-м множестве; Δz_{ij}^0 — предельно допустимое отклонение от нормы.

Для сгруппированного множества наблюдаемых факторов критерий оценки состояния системы можно записать в виде аддитивно-мультипликативной свертки [3]

$$Q = \prod_{k=1}^{m_k} (1 - z_k^2) \cdot \left[\sum_{i=1}^{m} a_i \left(1 - \sqrt{\sum_{j=1}^{n_j} b_{ij} z_{ij}^2} \right) \right], \qquad (2)$$

где z_{ij} и b_{ij} — относительное отклонение j-го фактора i-й группы и его весовой коэффициент; a_i — коэффициент значимости i-й группы факторов; z_k — отклонение k-го фактора критической группы, однозначно определяющей неприемлемость качественного состояния процесса или продукта.

При $\sum_{i=1}^{m} a_i = 1$ и $\sum_{i=1}^{m} b_{ij} = 1$, $i = \overline{1, m}$ функционал (2) изменяется от 1 до 0, соответственно, от эталонного состояния до его граничного допустимого значения и обращается в нуль при выходе любого параметра критической группы за предельно допустимый уровень.

Для оценки групповых и индивидуальных весовых коэффициентов формируется таблица экспертных оценок функционала по схеме полного или дробного факторного эксперимента с последующим вычислением оценок линейных эффектов влияния на функционал по формулам

$$a_i = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} z_{ik}Q_k$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} z_{ijk}Q_k,\ j = \overline{1, n_i},\ i = \overline{1, m},$$

где z_{ik} — значение i-го группового показателя в k-м опыте; z_{ijk} — значение j-й переменной i-й группы в k-м эксперименте; Q_k — значение функционала в k-м эксперименте.

Уравнения (1), описывающие структуру и значимость прямых связей между контролируемыми факторами, позволяют перейти к матричным описаниям функциональной структуры системы путем упорядочивания множеств отклонений Q, Y, X, G, V и U в виде квазидиагональной матрицы

$$\left\|\begin{matrix} \Delta Q & & & & & \\ & \|\Delta y_i\delta_{ij}\|^m & & & & \\ & & \|\Delta x_j\delta_{jk}\|^{n_x} & & & \\ & & & \|\Delta g_k\delta_{kl}\|^{n_g} & & \\ & & & & \|\Delta v_\nu\delta_{\nu x}\|^{n_v} & \\ & & & & & \|\Delta u_\mu\delta_{j\mu}\|^{n_u} \end{matrix}\right\| \quad (3)$$

(δ — символ Кронекера).

В соответствии с этим описанием можно составить клеточную структурную матрицу, систематизирующую по отдельным блокам совокупность всех принципиально возможных матриц характеристик взаимосвязей между элементами параметрических групп:

$\|1\|$ 01	$\|q_i\|$ 02	03	04	05	06
$\|0\|$ 07	$\|\delta_{ij}\|^m$ 08	$\|c_{ij}\|$ 09	$\|d_{ij}\|$ 10	11	$\vdots$ 12
$\|0\|$ 13	$\|0\|$ 14	$\|\delta_{jk}\|^{n_x}$ 15	16	$\|p_{j\nu}\|$ 17	$\|r_{j\mu}\|$ 18
$\|0\|$ 19	$\|0\|$ 20	$\|0\|$ 21	$\|d_{kl}\|^{n_g}$ 22	23	24
$\|0\|$ 25	$\|0\|$ 26	$\|0\|$ 27	$\|0\|$ 28	$\|d_{\nu\tau}\|^{n_v}$ 29	30
$\|0\|$ 31	$\|0\|$ 32	$\|0\|$ 33	$\|0\|$ 31	$\|0\|$ 35	$\|\delta_{\mu\xi}\|^{n_u}$ 36

(4)

где $\|q_i\|$, $\|c_{ij}\|$, $\|d_{ik}\|$, $\|p_{j\nu}\|$, $\|r_{j\mu}\|$ — матрицы коэффициентов связей между векторами соответствующих переменных.

Квадраты главной диагонали структурной матрицы (4) объединяют операторы функциональных связей внутри выделенных групп параметров и в случае их независимости выражаются единичными диагональными матрицами $\|\delta_{ij}\|^m$, $\|\delta_{jk}\|^n$ и т. д. В случае взаимосвязанности элементов внутри группы в соответствующую клетку помещается матрица оператора взаимодействия

$$\|\varphi_{jk}\|^n = \left\|\begin{matrix} 1 & \varphi_{12} & \dots & \varphi_{1n} \\ \varphi_{21} & 1 & \dots & \varphi_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_{n1} & \varphi_{n2} & \dots & 1 \end{matrix}\right\|, \quad (5)$$

где φ_{jk} — нормированные коэффициенты или функции связи между j-м и k-м элементами в системе уравнений

$$\Delta x_j = \sum_{k=1}^{n} \varphi_{jk}\Delta x_k,\ \ j = \overline{1, n},\ \ k \neq j.$$

В общем случае функция связи φ_{ij} отражает интенсивность влияния j-го параметра на i-й и каждая строка матрицы описывает вектор входных (причинных) связей, влияющих на i-й показатель состояния системы. В свою очередь, каждый j-й столбец матрицы описывает вектор следственных связей j-го фактора с другими параметрами состояния.

Недиагональные клетки матрицы (4) соответствуют операторам прямого и косвенного влияний различных функциональных групп друг на друга и на показатели целевой функции или функционал. При этом пустые клетки означают возможные, но неизвестные операторы взаимосвязей, а нулевые матрицы $\|0\|$ априори определяют область несуществующих связей.

Таким образом, клеточная матрица (4) представляет собой полное описание структуры и характеристик связей между параметрами и факторами, определяющими функционирование любого технологического процесса или комплекса. Детализация параметрических описаний объекта в виде клеточной матрицы определяется конкретной задачей идентификации и моделирования системы, а также характером априорных данных о качественных и количественных показателях влияния и взаимодействия между ее элементами.

Коэффициенты связей в виде сопоставимых количественных характеристик могут быть найдены известными методами факторного анализа, планирования эксперимента и экспертных оценок в зависимости от степени априорных представлений о природе связей.

При имеющихся статистических данных о состоянии системы и среды в виде массива x_{kj}, $k = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$, где x_{kj} — значение j-го фактора в k-м опыте, составляется матрица коэффициентов корреляции

$$r_{ij} = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{k=1}^{m} \frac{(x_{ki} - \bar{x}_i)}{S_{x_i}} \cdot \frac{(x_{kj} - \bar{x}_j)}{S_{x_j}},$$

где $\bar{x}_i$ и $\bar{x}_j$ — средние значения i-го и j-го факторов; S_{x_i}, S_{x_j} — среднеквадратичные отклонения соответствующих факторов.

Характер связей между коррелируемыми факторами определяется коэффициентами линейной множественной регрессии

$$\Delta x_i = \sum_{j=1}^{n_i} P_{ij} \Delta x_j, \;\; j = \overline{1, n}$$

с коэффициентами связи P_{ij} j-го фактора с i-м.

Для сопоставимой оценки отклонений и связей параметров различной физической природы и разной размерности формируется матрица безразмерных характеристик

$$C_{ij} = \frac{P_{ij} \Delta x_j^0}{\Delta x_i^0}, \; i, j = \overline{1, n},$$

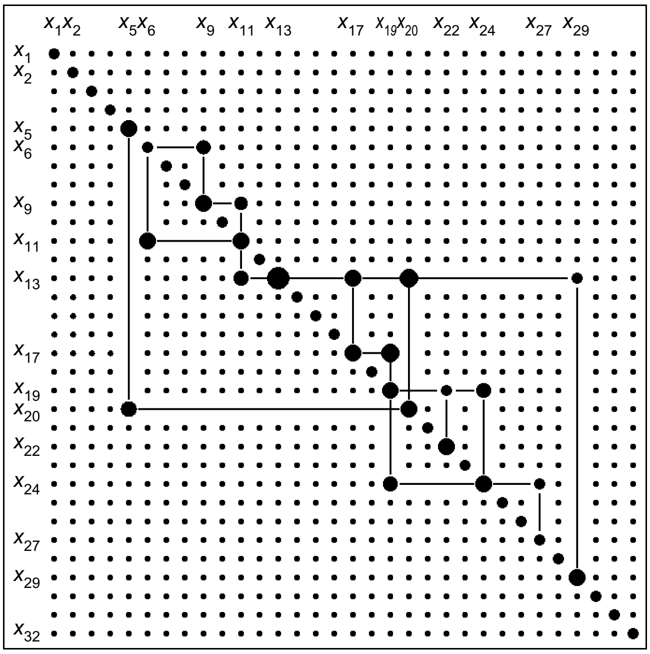
где Δx_i^0 и Δx_j^0 — допустимые отклонения от нормы.

По найденной матрице характеристик взаимосвязей C_{ij}, $i, j = \overline{1, n}$, и вектору текущих отклонений $\Delta x_1, ..., \Delta x_n$ путем умножения матрицы $\|C_{ij}\|^n$ на диагональную матрицу вектора изменений параметров состояния $\|\Delta x_j \delta_{jk}\|$ формируется *ситуационная матрица*

$$\begin{Vmatrix} 1 & c_{12} & ... & c_{1n} \\ c_{21} & 1 & ... & c_{2n} \\ ... & ... & ... & ... \\ c_{n1} & c_{n2} & ... & 1 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} \Delta x_1 & & & \\ & \Delta x_2 & & \\ ... & ... & ... & ... \\ & & & \Delta x_n \end{Vmatrix} =$$

$$= \begin{Vmatrix} \Delta x_1 & c_{12}\Delta x_2 & ... & c_{1n}\Delta x_n \\ c_{21}\Delta x_1 & \Delta x_2 & ... & c_{2n}\Delta x_n \\ ... & ... & ... & ... \\ c_{n1}\Delta x_1 & c_{n2}\Delta x_2 & ... & \Delta x_n \end{Vmatrix}, \qquad (6)$$

описывающая разложение отклонений Δx_i, $i = \overline{1, n}$, по всем координатам множества $\{X\}$, объединяя, таким образом, априорные данные о структуре связей с текущей информацией Δx. При этом элементы главной диагонали ситуационной матрицы (6) отображают текущие отклонения Δx_i контролируемых факторов от заданных значений, а недиагональные — вклады отклонений Δx_j, $j = \overline{1, n}$, в отклонения Δx_i, $i = \overline{1, n}$, с упорядочением по строкам всех априори известных причин отклонений Δx_i, а по столбцам — возможных следственных влияний отклонений Δx_i на другие параметры.



Структурно-параметрическая ситуационная модель аномального состояния в пространстве контролируемых параметров x_1, ..., x_{32}

Ситуационная матрица (6) позволяет определить формальную *процедуру идентификации аномальной ситуации*, представленной на рисунке в качестве примера в аналоговой форме. Исходя от максимального диагонального элемента, соответствующего максимальному отклонению от нормы — Δx_{13} в наблюдаемом множестве параметров состояния системы, следует перемещение по строке (см. рисунок) с выявлением причин, вызвавших отклонение данного параметра, и выбором наиболее значимой. Далее следует переход по столбцу к новому элементу главной диагонали, после чего вновь оцениваются элементы соответствующей строки. Поиск продолжается до нахождения отклонения, в строке которого все недиагональные элементы будут равны нулю, например Δx_5. Это означает, что данное отклонение — одна из основных исходных причин возникновения аномальной ситуации.

Алгоритм идентификации содержит блок формирования ситуационной матрицы и процедуру поиска причин аномального состояния системы. Процедура поиска представляет собой цикл перебора независимых отклонений, внутри которого происходит отыскание максимального элемента в строке, запоминание его порядкового номера r и переход на r-ю строку с повторением поиска максимального элемента этой строки. Для обнаружения возможного зацикливания причинно-следственных связей формируется массив индексов диагональных элементов, входящих в траекторию взаимодействия. Совпадение двух элементов этого массива служит признаком возникновения цикла. При этом причина может оказаться в контуре цикла или вне его. Для выхода из цикла и продолжения поиска исходной причины разрывается последнее звено обратной функциональной связи и при повторном переборе элементов предшествующей строки процедура либо остановится на последней вершине цикла (если причина находится в контуре цикла), либо пойдет дальше по ступеням взаимосвязей до следующей причины или нового цикла (см. рисунок).

При переходе к нахождению других траекторий воздействия на исследуемое отклонение максимальный вклад в него приравнивается к нулю и выбирается следующий по размеру вклад (т. е. следующий максимальный элемент строки).

Ситуационная матрица (6) дает возможность прогнозировать развитие ситуации по выходным параметрам состояния (по параметрам качества) при отклонении от норм определенных показателей состояния системы, технологических режимов и управляющих воздействий.

Алгоритм прогноза связан с имитацией отклонения какого-либо фактора Δx_k от нормативного значения, вычислением элементов k-го столбца ситуационной матрицы как $S_{ik} = c_{ik}\Delta x_k$, $i = \overline{1, n}$, и нахождением в нем максимального недиагонального элемента S_{qk}, соответствующего максимальному следственному воздействию $c_{qk}\Delta x_k = \max$ на q-й параметр. Если оно оказывается равным нулю, то k-е отклонение не имеет последствий в контролируемом n-факторном пространстве и после регистрации индексного массива причинно-следственных отклонений процедура заканчивается. При $\max \neq 0$ индекс следственного отклонения q записывается в очередной элемент индексного массива и после проверки на зацикливание следует вычисление отклонения Δx_q (диагонального элемента q-й строки матрицы S_{ij}) как $\Delta x_q = c_{qk}\Delta x_k$ с дальнейшим повторением процедуры в k-м столбце при $k = q$ и $\Delta x_k = \Delta x_q$. Обнаружение причинно-следственных циклов аналогично алгоритму идентификации аномальных ситуаций.

Для определения всех ветвей прогнозируемого аномального состояния системы описанная процедура включается в алгоритм их последовательного перебора по принципу разматывания и сматывания нити в конечном лабиринте. При достижении тупикового элемента очередной ветви последнее ее звено разрывается, т. е. соответствующая связь принимается равной нулю с возвратом к предшествующей ступени (сматывание нити) и нахождением следующего наибольшего вклада k-го элемента, т. е. другой ветви причинно-следственного воздействия (разматывание нити). Процедура останавливается при достижении исходного пункта.

В случае нескольких входных отклонений, т. е. некоторого вектора Δx_j, $i = \overline{1, n}$, формируется матрица прогнозируемой ситуации с запуском процедуры прогнозирования последовательно для всех исходных отклонений (истоков аномалии).

Составление структурно-параметрических моделей (3)—(5) связано с построением структурной матрицы большой системы [4] и сводится к следующим этапам:

- представление системы как элемента инфраструктуры с определением внешних связей и факторов, влияющих на ее внутреннюю структуру;
- разработка для собственно технологической системы крупноблочной матрицы (3), каждый блок которой соответствует либо определенному функциональному участку, либо элементу декомпозиции главной целевой функции; выделенные блоки ориентируются вдоль главной диагонали по ходу процесса либо по целевому или функциональному принципу;
- детализация элементов крупноблочной матрицы с разделением каждого диагонального блока матрицы на составные элементы — технологические операции, определяющие факторы и параметры описания функциональных блоков;
- нахождение характеристик связей между выделенными факторами и группами факторов методами экспертных оценок и факторного анализа.

Рассмотренные алгоритмы идентификации состояния больших систем на основе структурно-параметрических моделей позволяют решать задачи принятия решений в сложной ситуации при нечетких аналитических описаниях функциональных связей, основанных лишь на оценках влияния и отношений порядка. Процедура прогноза лежит в основе работы *модуля принятия решения* и определения вектора изменения параметров состояния системы в направлении улучшения целевой функции. Алгоритм принятия решений сводится к накоплению базы знаний и составлению структурно-параметрической модели связей между параметрами состояния и целевой функции и последующим процедурам причинно-следственной идентификации и прогнозирования текущей ситуации на очередном шаге движения к цели.

Описанная информационная технология может быть полезной в различных сферах деятельности (производственной, экономической, социальной, экологической и др.), поскольку она позволяет решать две основные задачи анализа и принятия решений в структурно-сложной ситуации, а именно:

- что в поведении системы, среды или других активных элементов явилось причиной аномалии? (задача идентификации);
- что произойдет с системой при изменении тех или иных параметров ее состояния или окружающей среды? (задача прогнозирования).

Рассмотренные задачи и алгоритмы их решения положены в основу процедур поддержки принятия решений по управлению качеством готовой продукции в технологической системе перерабатывающего предприятия агропромышленного комплекса [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ивашкин Ю. А.* Структурно-параметрические модели и алгоритмы идентификации аномальных состояний технологической системы // Вестн. Росс. акад. диалект.-систем. исслед. — 1998. — Вып. 2. — С. 18—28.
2. *Ивашкин Ю. А.* Матричный метод отображения оперативной информации //Приборы и системы управления. — 1970. — № 10. — С. 15—16.
3. *Ивашкин Ю. А.* Компьютерные технологии оптимальных решений в переработке биосырья // Докл. Третьей междунар. науч.-техн. конф. "Пища. Экология. Человек", — М., 1999. — С. 99—105.
4. *Шатихин Л. Г.* Структурные матрицы и их применение для исследования систем. — М.: Машиностроение, 1991.
5. *Gordeeva Y. L., Ivashkin Y. A.* The informational technology of the quality control and the security of products // CHISA, 2002. — Praha, 2002.

☎ *(095) 277-07-30*
E-mail: ivashkin@msaab.ru

❑

УДК 681.325...2

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ИНТЕРФЕЙСА ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ОПЕРАТОРОМ

В. Г. Лебедев

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова, г. Москва

Рассмотрена архитектура верхнего уровня интеллектуального интерфейса оператора, управляющего сложным аппаратно-программным комплексом, и функциональные особенности его основных модулей.

Будем рассматривать интеллектуальный интерфейс пользователя (ИИП) как составную часть системы поддержки принятия решений оператором (кратко — СПО), предназначенной для оказания помощи оператору (пользователю) в преодолении возникающих проблем при его взаимодействии со сложным аппаратно-программным комплексом путем расширения возможностей данного интерфейса по сравнению с традиционным графическим интерфейсом пользователя.

Эти возможности должны обеспечивать адаптивное к пользователю и решаемой задаче взаимодействие оператора с системой, диалоги между пользователем и системой, представление информации в интегрированном исчерпывающем виде.

Интеллектуальный интерфейс пользователя можно считать ключевым модулем СПО поскольку он отвечает за выбор и передачу информации от других модулей для её отображения, за задержку или удаление информации, а также за выполняющиеся действия от имени оператора, так как поддерживает собственные цели оператора как лица, принимающего решения.

Входная информация, модели и знания используются в ИИП для выяснения намерений оператора, и ответов, в частности, на вопросы:

- какую информацию необходимо представить оператору?
- какие задачи должны выполняться автоматически?