

А.Л. ЕРОХИН, канд. техн. наук,

В.Н. БУРЦЕВ, канд. техн. наук

МОДЕЛИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНО-ОРГАНИЗОВАННЫХ СИСТЕМ СО СТОХАСТИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ

У статті обґрунтована нова методологія ідентифікації складно-організованих систем під час їхньої взаємодії зі стохастичними впливами. Наведені теоретичні результати з використання теорії нечіткої логіки для розробки алгебри нештатних ситуацій.

In article is grounded the new methodology for identification of complex-organized system at their interaction with stochastic influences. Lead the theoretical results on development of algebra of abnormal situations based on fuzzy logic.

Постановка проблемы. Основными причинами выхода сложно-организованных систем (СОС) из состояния метаустойчивости являются процессы взаимодействия стохастических нагрузок с параметрами системы. И если стохастические возмущения эндогенной природы являются детерминированными и могут быть откорректированы системой управления, то экзогенные возмущающие силы по своей природе являются стохастическими. Только статистические данные дают возможность учитывать воздействие этих сил в системе поддержки принятия решений.

Анализ литературы. Для разработки методов и алгоритмов распознавания внештатных, предаварийных и аварийных ситуаций необходима классификация параметров и возмущающих сил, что позволит получить первичные данные приоритетов взаимодействий.

Анализ разработок в этой области [1 – 6] показывает, что представляет теоретический и практический интерес классификации взаимодействия между СОС и стохастическими возмущающими силами.

Целью статьи является разработка методологии идентификации сложно-организованных систем при их взаимодействии со стохастическими воздействиями для построения моделей визуализации поведения СОС, что позволит повысить качество распознавания нештатных ситуаций.

Классификация стохастических возмущений по степени воздействия на параметры СОС. Рассмотрим классификацию стохастических возмущений в СОС.

1. Подкласс сильных воздействий – *SI* (Strong Influence)

$$t_{SI} \Rightarrow (\varphi_I, \zeta_J, \theta_K, \mu_L, PFS_S, v_M). \quad (1)$$

Стохастические возмущения t_{SC} с некоторой вероятностью $0 < P(t) \leq K_{SC} < 1.0$ воздействуют на технологические параметры, параметры управления и корректировки параметров СОС $\varphi_I, \zeta_J, \theta_K, \mu_L, PFS_S, v_M$ и каждый из параметров с определенной вероятностью взаимодействует с этим возмущением, в пределах допустимых изменений параметров управления и корректировок.

При сильном взаимодействии с высокой вероятностью возможен выход СОС в предаварийное или аварийное состояние, если системы управления и поддержки принятия решений не были рассчитаны заранее на выход из такой ситуации. При разработке системы поддержки принятия решения (СППР) этому подклассу присваивается самый высокий приоритет.

2. Подкласс слабых взаимодействий – *WI* (Weak Influence)

$$t_S \mapsto (\varphi_I, \zeta_J, \theta_K, \mu_L, PFS_S, v_M) . \quad (2)$$

Вероятность взаимодействия СОС с такими возмущающими силами $0 < P(t) \leq K_{WC} < K_{SC}$ меньше, чем при сильном взаимодействии, поэтому приоритет этого подкласса устанавливается более низким. Слабые воздействия являются причиной выхода из штатного режима функционирования СОС в предаварийное состояние.

3. Подкласс опосредованных взаимодействий – *MI* (Mediate Influence).

Взаимодействие между стохастическим возмущением этого подкласса и параметрами СОС возникает посредством некоторого промежуточного первичного воздействия, например, стохастическое воздействие изменяет распределение флуктуаций параметров, которые на время становятся отличными от закона нормального распределения.

Возможен локальный или множественный “выброс” амплитуды флуктуации за пределы системы управления, тогда процесс управления переводится, например, в автоколебательный режим с большей амплитудой воздействия параметров управления.

Вероятность опосредованного взаимодействия $0 < P(t) \leq K_{MC} < K_{WC}$ и приоритет – низкий.

Классификация параметров СОС. На основании вышеприведенной классификации стохастических возмущений проведем классификацию параметров СОС по степени ее реакции на эти возмущения. Выделим три подкласса взаимодействий таких параметров.

1. Подкласс сильных взаимодействий – *SC* (Strong Coupling)

$$t_{SC} \Rightarrow (\varphi_I^{SC}, \zeta_J^{SC}, \theta_K^{SC}, \mu_L^{SC}, PFS_S^{SC}, v_M^{SC}) . \quad (3)$$

2. Подкласс слабых взаимодействий – *WC* (Weak Coupling)

$$t_{WC} \mapsto (\varphi_I^{WC}, \zeta_J^{WC}, \theta_K^{WC}, \mu_L^{WC}, PFS_S^{WC}, \nu_M^{WC}). \quad (4)$$

3. Подкласс опосредованных взаимодействий – *MC* (Mediate Coupling)

$$t_{MC} \mapsto (\varphi_I^{MC}, \zeta_J^{MC}, \theta_K^{MC}, \mu_L^{MC}, PFS_S^{MC}, \nu_M^{MC}). \quad (5)$$

Таким образом, при анализе аварийной и предаварийной ситуаций, возможны, по крайней мере, девять типов взаимодействий

$$\begin{aligned} SI &\rightarrow SC; SI \rightarrow WC; SI \rightarrow MC; \\ WI &\rightarrow SC; WI \rightarrow WC; WI \rightarrow MC; \\ MI &\rightarrow SC; MI \rightarrow WC; MI \rightarrow MC, \end{aligned} \quad (6)$$

определяющих множество ситуаций при функционировании СОС. Определим для каждого из взаимодействий:

– синтаксические правила или способы порождения лингвистических значений, рожденные бесконтекстной грамматикой и порождающие термножество $T(X)$, где X – множество лингвистических значений термина **ситуация**;

– семантические правила или способы вычисления смысла любой семантической переменной; каждому элементу X из универсального множества U ставится в соответствие его смысл $M(X)$;

– функции совместимости с универсальным множеством: $U \rightarrow [0,1], \forall u \in U$.

Совокупность значений лингвистической переменной **ситуация** составляют термножество $T(X)$ с нечеткими ограничениями. Представим термножество этой лингвистической переменной.

$$T(X) = \text{штатная} + \text{внештатная} + \text{предаварийная уровня 1} + \\ + \text{предаварийная уровня 2} + \dots + \text{аварийная уровня 1} + \text{аварийная уровня 2} \\ + \dots + \text{аварийная уровня } N.$$

Лингвистическая переменная ситуация. Обычная интерпретация лингвистических переменных “предаварийная или аварийная ситуация” состоит в том, что эти понятия принадлежит к целому классу “ситуаций” системы, характеризующие ее возможные переходы из одного состояния в другое при или после воздействия возмущающих сил. Лингвистическая переменная **ситуация** имеет иерархическую структуру (рис.1), определяемую указанными выше синтаксическим и семантическим правилами. Универсальное множество $U \rightarrow [0,1], \forall u \in U$ является базовой переменной также и для термножества T (*вероятность*), представленного объединением лингвистических переменных

$T(\text{вероятность}) = \text{правдоподобно} + \text{очень правдоподобно} + \text{неправдоподобно} + \text{чрезвычайно правдоподобно} + \text{весьма правдоподобно} + \text{вероятно} + \text{невероятно} + \text{более или менее правдоподобно} + \dots$ [4, 7, 8].

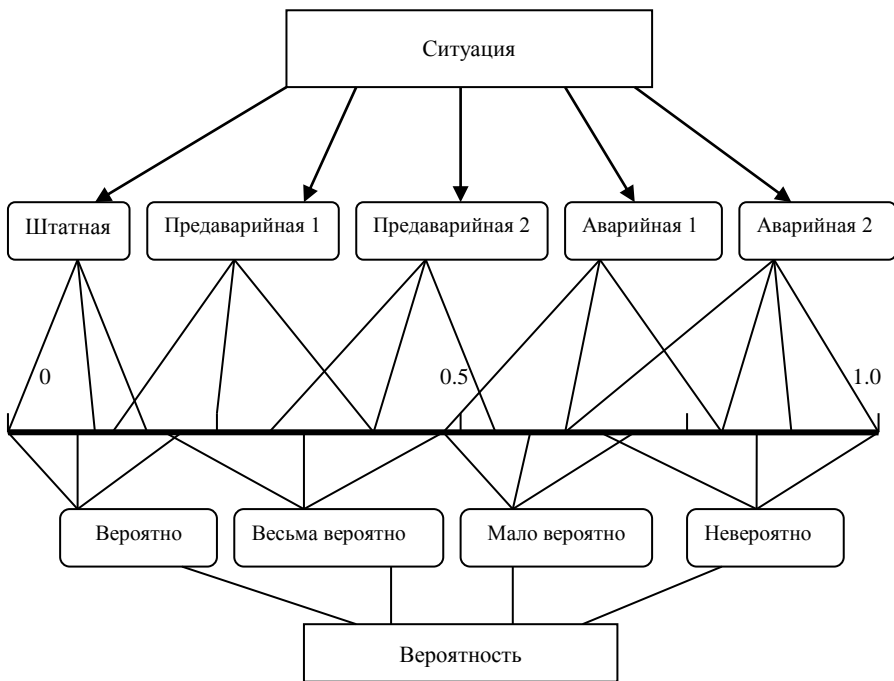


Рис. 1. Примеры распределений вероятности $p(E_{j,x}|g_i)$

При использовании этого терм-множества, варианты взаимодействий (6) можно представить в формальном виде

$$\exists R(kI, IC) = T(S) \rightarrow T(P); \forall k, l = S, W, M, \quad (7)$$

где R – реакция системы при сильных, слабых и опосредованных взаимодействиях параметров СОС с возмущающими силами;

I, C – стохастические воздействия и восприимчивость системы к стохастическим возмущениям;

$T(S), T(P)$ – терм-множество лингвистической переменной *ситуация*, отображенных на терм-множество *вероятность* соответственно, совместимые с функциями принадлежности с универсальным множеством $U \rightarrow [0, 1]$.

Если терм-множества $T(S), T(P)$ упорядочить, то универсальным множеством для n -арных переменных $S = (S_i)$ и $T(P)$ будет являться декартово произведение

$$U = U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n \quad (8)$$

с ограничениями $R(S_1, S_2, \dots, S_m), R(P_1, P_2, \dots, P_m)$.

Тогда для двух переменных их характеристические функции будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \mu_S &: U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n \rightarrow [0, 1]; \\ \mu_P &: U_1 \times U_2 \times \dots \times U_m \rightarrow [0, 1]. \end{aligned} \quad (9)$$

Используя (9), представим нечеткие множества $(S), (P)$ в виде:

$$\begin{aligned} (S) &= \mu_{1S} / u_1 + \mu_{2S} / u_2 + \dots + \mu_{nS} / u_n = \sum_{i=1}^n \mu_{iS} / u_i; \\ (P) &= \mu_{1P} / u_1 + \mu_{2P} / u_2 + \dots + \mu_{nP} / u_n = \sum_{i=1}^n \mu_{iP} / u_i, \end{aligned} \quad (10)$$

где знак "+" – определяет объединение; μ_S, μ_P – характеристические функции (степень принадлежности) элементов u_i нечетким множествам S, P , для которых значения $\mu_S(u), \mu_P(u) > 0$.

В соответствии с [7] высотой нечетких множеств будем считать величину

$$H_{S,P} = \sup_U \mu_S(S), \mu_P(P). \quad (11)$$

Точкой перехода нечетких множеств S, P будем считать такой элемент $u_i u_S \in U \mu_{iP}, \mu_{jS} : u_i, u_j = 0.5$. Если носители множеств будут иметь мощность континуума, то выражения (10) будут представлены в виде:

$$\begin{aligned} S &= \int_U \mu_S(u) / u; \\ P &= \int_U \mu_P(u) / u, \end{aligned} \quad (12)$$

где знак интегрирования означает объединение одноточечных множеств.

Критерии выбора функций принадлежности. Для возможного использования нечетких множеств необходимо вначале предварительно разработать критерии выбора функций принадлежности (10) для каждого из элементов из этих множеств. Для этого вновь рассмотрим все возможные варианты взаимодействий (6) и (7), отобразив реакцию системы на нечеткое множество *вероятность*, с последующей классификацией этих реакций посредством терм-множества *ситуация*. Используя выражения (1) – (5) преобразуем выражения (6) в виде системы по степени убывания нечеткой вероятной реакции системы $T(P)$, отображенной на нечеткое множество $T(S)$

$$SI \rightarrow SC(WC, MC) = R_S \rightarrow T(S_S) \rightarrow T(P); \forall \varphi^{S,W,M}, \zeta^{S,W,M}, \theta^{S,W,M}, \mu^{S,W,M};$$

$$WI \rightarrow WC(MC) = R_W \rightarrow T(S_W) \rightarrow T(P); \forall \varphi^{W,M}, \zeta^{W,M}, \theta^{W,M}, \mu^{W,M}; \quad (13)$$

$$MI \rightarrow MC = R_M \rightarrow T(S_M) \rightarrow T(P); \forall \varphi^M, \zeta^M, \theta^M, \mu^M,$$

где – $\varphi^{S,W,M}, \zeta^{S,W,M}, \theta^{S,W,M}, \mu^{S,W,M}$ – технологические параметры, параметры управления и корректировки параметров СОС при сильных S , слабых W и опосредованных M взаимодействиях.

Для выражения, расположенного в верхней строке соотношений (13), множество нечетких переменных “**вероятно, маловероятно и невероятно**”, отображенное на нечеткие переменные “**предаварийная или аварийная ситуации**”, подлежит дальнейшему анализу.

Для выражения – во второй строке множество нечетких переменных “**вероятно, маловероятно и невероятно**”, отображенное на нечеткие переменные “**штатная, предаварийная ситуации**”, подлежит дальнейшему анализу.

Для выражения в третьей строке множество нечетких переменных “**вероятно, маловероятно и невероятно**”, отображенное на нечеткие переменные “**штатная или предаварийная ситуации**”, подлежит дальнейшему анализу.

Анализ отображений множества ситуаций. Для анализа отображений множества $T(S_S), T(S_W), T(S_M) \rightarrow T(P)$ необходимо вновь вернуться к формальной модели флуктуационной капсулы [1, 3] и установить нечеткие логические связи между векторами параметров со стохастическими возмущениями.

При таких взаимодействиях время, место и интенсивность стохастического взаимодействия с параметрами СОС случайны. Поэтому в качестве характеристических функций μ_{iP}, μ_{jS} множеств $T(S)$ и $T(P)$ выберем некоторое подмножество открытых множеств u_i, u_j , которые формируются следующим образом:

– технологический параметр $\phi_I(\bar{\phi}_I, \pm \zeta_I) \in \Phi$ в штатном режиме функционирования СОС проецирует на поверхности единичной сферы окрестность

$$\varepsilon = Proj(\bar{\phi}_I \pm \zeta_I) \rightarrow 0; \quad (14)$$

– технологический параметр $\phi_J(\bar{\phi}_J, \pm \zeta_J) \in \Phi$ за счет взаимодействия с возмущающими силами слабого взаимодействия изменяет свое положение и выходит в зону предаварийной ситуации, при этом на поверхность сферы проецируется окрестность

$$\Delta_1 = Proj(\vec{\varphi}_I \pm \zeta_I) \rightarrow \varepsilon. \quad (15)$$

Технологический параметр $\varphi_I(\vec{\varphi}_I, \pm \zeta_I) \in \Phi$ за счет взаимодействия с возмущающими силами с сильным взаимодействием изменяет свое положение и выходит в зону предаварийной ситуации. При этом на поверхность сферы проецируется окрестность:

$$\Delta_K = Proj(\vec{\varphi}_I \pm \zeta_I) \rightarrow \Delta_2 \rightarrow \Delta_1. \quad (16)$$

На рис. 2 представлены три открытых множества, являющихся проекциями множества изменений вектора технологического параметра СОС при его взаимодействии со стохастическими воздействиями.

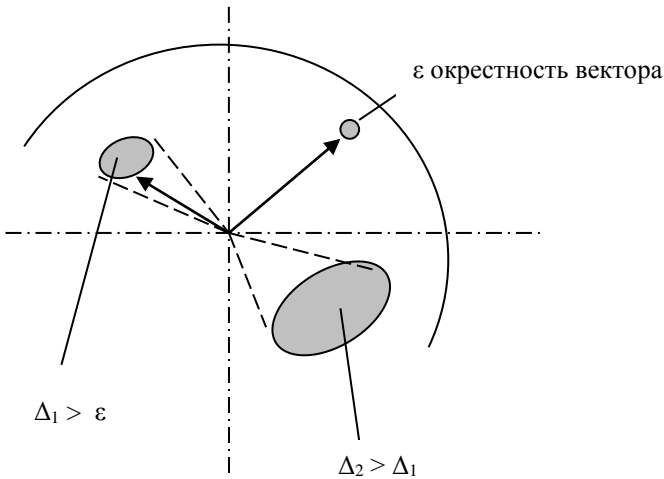


Рис. 2. Проекция вектора технологического параметра и параметра управления на поверхность единичной сферы при взаимодействиях с возмущающими силами различной интенсивности

Открытость множества определяется случайным процессом взаимодействия. Благодаря этому детерминированные процессы управления технологическими параметрами приобретают свойство неупорядоченных множеств. Возможна разработка критериев классификации и распознавания нескольких классов нештатных, предаварийных и аварийных ситуаций в СОС, которые в порядке возрастания нечеткой вероятности возникновения ситуации образуют множество

$$(\varepsilon, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_K, \dots, 1.0]. \quad (17)$$

Выводы. Таким образом, множество (17) может быть использовано для вычислений функций принадлежности той или иной ситуации из множества

$T(S)$, для прогнозирования ситуации и ее распознавания. Для использования предложенной формальной модели необходимо:

- провести анализ всех возможных типов взаимодействия отдельных параметров СОС со всеми возможными стохастическими воздействиями различных интенсивностей на базе выявления функциональных и нечетких зависимостей реакций СОС на такие воздействия, включая статистические данные историй возникновения аварийных ситуаций и ликвидации их последствий;

- построить систему связей между стохастическими силами и взаимодействующими параметрами СОС и разбить систему на классы риска возникновения предаварийной и аварийной ситуации;

- на основе предположений о наличии сильного, слабого и опосредованного взаимодействия параметров СОС со стохастическими воздействиями различной интенсивности разработать алгоритм создания формальной модели флуктуационной капсулы и разработать алгоритмы функционирования формальной модели;

- на основе моделирования процессов взаимодействия разработать систему визуального мониторинга функционирования СОС и предложить базовые критерии распознавания предаварийных и аварийных ситуаций.

Список литературы: 1. *Бондаренко М.В., Єрохін А.Л.* Про моделі позаштатної поведінки інтелектуальних систем // Проблеми біоніки. Всеукр. міжвед. науч.-техн. сб. – Х.: Изд-во ХНУРЭ. – 2004. – Вип. 60. – С. 7–16. 2. *Бурцев Вал.Н., Бурцев Вл.Н., Єрохін А.Л.* Анализ связей сложноорганизованных систем с гомеостатическим и гетеростатическим управлением // Системный анализ, управление и информационные технологии. Вестник НТУ "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2001. – № 4. – С. 20–23. 3. *Бурцев В.Н., Єрохін А.Л.* Об оптимальной формализации сложноорганизованных систем / Труды III Международной конференции "Идентификация систем и задачи управления", Москва, 28-30 января 2004 года. – ИПУ РАН, 2004. – С. 440–444. 4. *Кофман А.* Введение в теорию нечетких множеств. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с. 5. *Гриб О.Г., Єрохін А.Л., Светелик А.А.* О поддержке принятия решений при аварийных ситуациях в электрических сетях // Проблеми біоніки. Всеукр. міжвед. науч.-техн. сб. – Х.: Изд-во ХНУРЭ. – 2000. – Вип. 53. – С. 28–30. 6. *Єрохін А.Л.* Топології просторових інформаційних моделей електричних мереж // Електроенергетичні та електромеханічні системи. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – № 479. – Львів: НУ "Львівська політехніка", 2003. – С. 72–79. 7. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 165 с. 8. *Hand D., Mannila H., Smith P.* Principles of Data Mining. MIT Press, 2001. – 546 p.

Поступила в редакцію 10.04.2005