УДК 681.518:004:912

В.Н. Бурцев, А.Л. Ерохин

ФОРМАЛИЗАЦИЯ СЛОЖНООРГАНИЗОВАННЫХ СИСТЕМ И РАСПОЗНАВАНИЕ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ. СООБЩЕНИЕ 1

1. Введение

Обеспечение устойчивости функционирования сложноорганизованных систем (СОС) относится к многокритериальными динамическим задачам в многомерном фазовом пространстве. В качестве критерия устойчивости функционирования сложной системы может быть выбрана инвариантность структуры множества связей-отношений между параметрами ее входов и выходов.

Изменения связей-отношений, возникающие, например, при воздействиях внешних факторов стохастической природы, могут служить признаками возникновения нестандартной (внештатной) ситуации, которая в дальнейшем может развиться в аварийную.

Однако для использования в системном анализе структурной инвариантности необходима соответствующая формализация системы. Начало исследований в области такой формализации положено в [1, 8] .

В формальном виде, абстрагируясь от вида целевого продукта, можно выделить в СОС множество каналов-связей, организующих сетевую структуру, которые формируют множество входов-выходов, определяемых в системе по типам и структурам связей-отношений между подсистемами. Такие системы определим как канализированные [1, 2].

Цель исследования – разработка модели взаимодействий сложно-организованной системы со стохастическими возмущениями и создание на ее основе способа визуализации параметров режимов работы сложно-организованных канализированных систем при нештатных ситуациях

Переходя на формализованный уровень подсистем СОС, выделим системные каналы (СК) как множество элементарных каналов (ЭК), и тогда вход A и выход B в каждом СК представляется упорядоченными взаимно сопряженными множествами A_i и B_i.

В таком представлении эволюция системы в многомерном фазовом пространстве характеризуется множеством изменений в системе параметров на множестве входов-выходов A_i и B_i, которые определяются декартовым произведением подмножеств [1]

$$U \subset A \times B . \tag{1}$$

При такой формализации основные сложности возникают при моделировании переходных и аварийных режимов СОС и разработке критериев оценки таких состоянию. Особенно это проявляется при моделировании взаимодействий системы со стохастическими возмущающими силами внутренней и внешней природы.

Существующие СОС ориентированы в основном на наличие штатного режима функционирования, допускающего только возможность выхода во внештатный режим, и этот факт делает пока невозможным создание адекватных моделей СОС в предаварийных и аварийных ситуациях.

Состояние СОС можно определить как множество ф подмножеств флуктуаций многомерных векторов базовых параметров при воздействии множества Т стохастических возмущений:

$$\begin{gathered}\left(\overrightarrow{\varphi_I}\right),\left(\overrightarrow{\varsigma_J}\right),\left(\overrightarrow{\theta_L}\right),\left(\overrightarrow{P_{FS}}\right)\subset\Phi\\ \left(\overrightarrow{St_Q}\right)\in T,\end{gathered} \tag{2}$$

где $\left(\overrightarrow{\varphi_I}\right)$ — флуктуации технологических параметров со скалярными переменными $\Delta\varphi_I$; $\left(\overrightarrow{\varsigma_J}\right)$ — флуктуации параметров управления с переменными $\Delta\varsigma_J$; $\left(\overrightarrow{\theta_L}\right)$ — флуктуации параметров планирования с переменными $\Delta\theta_L$; $\left(\overrightarrow{P_{FS}}\right)$ — флуктуации психофизиологического состояния лица, принимающего решения (ПФС ЛПР); $\left(\overrightarrow{St_Q}\right)$ — стохастические возмущающие воздействия.

Таким образом, задачами исследования являются построение модели отображения параметров режимов при воздействии множества T стохастических возмущений и разработка такого способа отображения множества параметров СОС, который позволил бы повысить эффективность распознавания, классификации и в конечном итоге, идентификации аварийных ситуаций (АС).

2. Решение задачи

Проведем анализ исходных данных на основе (1) и (2).

Параметры $\left[\left(\overrightarrow{\varphi_I}\right),\Delta\varphi_I\right],\left[\left(\overrightarrow{\varsigma_J}\right),\Delta\varsigma_J\right],\left[\left(\overrightarrow{\theta_L}\right),\Delta\theta_L\right]$ являются метрическими, нормируемыми и упорядоченными.

Пусть изменения флуктуаций этих параметров подчиняются нормальному закону распределения вероятности и относятся к детерминированным (эргодическим) процессам.

Относительно параметров ПФС ЛПР можно утверждать, что $\left(\overrightarrow{P_{FS}}\right)$ по своей природе относятся к детерминированным хаотическим процессам [3, 4], поэтому для них возможен соответствующий аттрактор существования, внутри которого может быть введена, по крайней мере, частичная упорядоченность.

Границы аттрактора могут быть использованы как доверительные интервалы оптимальности ПФС ЛПР [5].

Относительно стохастических возмущающих воздействий $\left(Si_Q\right)$ можно утверждать, что они являются фактором неопределенности, которая по своей сути проявляется везде, взаимодействуя как с одним из параметров СОС, так и со всеми одновременно.

Важность исследований взаимодействий метрических параметров СОС со стохастическими процессами определяется новыми подходами в осмыслении вклада хаотических процессов в сложных системах [6, 7].

Решение задачи разобьем на несколько этапов.

В данной статье рассмотрен первый этап решения задачи, посвященный разработке математической модели.

3. Этап 1. Разработка математической модели

В [1, 8] была сделана теоретическая попытка представления метаустойчивости СОС посредством описания формальной модели многомерного единичного шара, образованного векторами флуктуаций параметров (многомерной флуктуационной капсулы).

Используем этот подход для анализа внештатных ситуаций в СОС. Для этого построим единичный многомерный многогранник V, образованный объединением подмножеств флуктуаций параметров СОС

$$\left(\overrightarrow{\varphi_I}\right)\in N,\left(\overrightarrow{\varsigma_J}\right)\in N,\left(\overrightarrow{\theta_L}\right)\in K,\left(\overrightarrow{P_{FS}}\right)\in R \tag{3}$$

с началом координат, помещенным в центр пересечения их диагоналей.

Так как параметры управления посредством прямых и обратных связей взаимодействуют с технологическими параметрами, то их отнесем к одному множеству ($\theta_i \leftrightarrow \varphi_j$ N).

Для параметров планирования и ПФС ЛПР также существует множество параметров корректировок μ_M, ν_N, которые обеспечивают оптимальные значения этих параметров.

Встроим многомерные многогранники параметров планирования и ПФС ЛПР внутрь многогранника технологических параметров, совместив начало координат. Тогда многомерный многогранник будет иметь вид:

$$V\subseteq\bigcup_{\varphi,\theta,\varsigma,P_{KS}}\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\overrightarrow{\varphi_I}\right)\vee\sum_{l=1}^{m}\left(\overrightarrow{\varsigma_j}\right)\vee\sum_{k=1}^{r}\left(\overrightarrow{\theta_L}\right)\vee\right.$$
$$\left.\vee\sum_{M=1}^{R}\left(\mu_M\right)\vee\sum_{KS=1}^{s}\left(\overrightarrow{P_{KS}}\right)\vee\sum_{N=1}^{S}\left(\nu_N\right)\right]. \tag{4}$$

Максимальные нормированные подмножества θ_i, φ, ζ, t, P являются вершинами многомерных многогранников $\Phi(\Theta)$, (Ξ), (T) и (P), вложенных друг в друга.

Оболочка, натянутая на указанные вершины, образует флуктуационную капсулу U, при этом считаем, что сама оболочка капсулы обладает некоторыми энергетическими параметрами, способными вернуть капсулу в исходное метастабильное состояние.

Такими энергетическими параметрами будем считать множество скалярных значений параметров управления $(\varphi_I \pm \Delta\varsigma_j)\in N$ технологических параметров и множество значений параметров корректировок $(\pm\Delta\mu_M)$ и $(\pm\Delta\nu_N)$, аналогично воздействующих на параметры планирования $(\theta_L \pm \Delta\mu_M)\in K$ и ПФС ЛПР $(P_{KS}\pm\Delta\nu_N)\in M$.

Управление технологическими параметрами является динамическим процессом (сильное взаимодействие), корректировка параметров планирования и ПФС ЛПР являются более инерционными (слабое взаимодействие).

Зададим, например, подмножество векторов флуктуаций технологических параметров

$$\overrightarrow{\phi_i}=f\left(\vec{\varphi}_i,\vec{\theta}_j,\overrightarrow{P_{KS}}\right);\quad \phi_i,\theta_j,P_{KS}\le 1;\quad t_S=0, \tag{5}$$

где a_i,b_i,c_i — угловые коэффициенты векторов, упорядоченные по меридианам и широтам единичной сферы; $\phi_i,\theta_j,P_{KS}\le 1$ — нормированные скалярные значения векторов; $t_S=0$ — стохастические воздействия на СОС отсутствуют.

Так как основными возмущающими воздействиями на СОС являются параметры стохастических воздействий и параметры ПФС ЛПР, то для дальнейшего рассмотрения поставленной задачи введем два предположения:

— результирующее взаимодействие технологических параметров с параметрами управления и параметров планирования с параметрами корректировок не влияет на положение векторов $\left(\overrightarrow{\varphi_I}\right),\left(\overrightarrow{\theta_L}\right)$, то есть не изменяет координат соответствующих вершин на поверхности капсулы;

— результирующее взаимодействие метрических параметров со стохастическими возмущающими силами и ПФС ЛПР приводит к изменению положение векторов $\left(\overrightarrow{\varphi_I}\right)$, $\left(\overrightarrow{\theta_L}\right)$.

Редуцируем проекции вершин многогранников многомерного шара U^* на двух гиперплоскостях

$$\begin{aligned}&b_1x_1+b_2x_2+\ldots+b_nx_n+\ldots+b_{\nu-1}x_{\nu-1}\le 0\\&c_1x_1+c_2x_2+\ldots+c_nx_n+\ldots+c_{\nu-1}x_{\nu-1}\le 0.\end{aligned} \tag{6}$$

Первая из плоскостей (рис. 1, поз. 1) является касательной к одной из вершин многогранника, например технологического параметра. Гиперплоскость 2 располагается перпендикулярно первой.

Рис. 1. Редукция проекции вершин многогранников многомерного шара параметров СОС

Выберем из множества $N_i^R \in N^R$ три технологических параметра

$$\varphi_1, \varphi_i, \varphi_k \in N_i^{*} \subset N^R \qquad (7)$$

и зададим положение параметров в трехмерном метрическом пространстве в виде трех линейных зависимостей

$$\begin{aligned} a_1 x + b_1 y + c_1 z &= 0 \\ a_i x + b_i y + c_i z &= 0 \\ a_k x + b_k y + c_k z &= 0, \end{aligned} \qquad (8)$$

где коэффициенты a, b, c задают угловые характеристики векторов флуктуаций этих параметров.

Выберем такое положение плоскости 1, чтобы она касалась ϕ_1 вершины, представленной линейной зависимостью $a_1 x + b_1 y + c_1 z = 0$. В этом случае все возможные флуктуации параметров φ_i, φ_k проецируются на поверхность касательной плоскости в виде открытых линейных интервалов

$$(-\varphi_1 + \varphi_1), (-\varphi_k + \varphi_k) \leq 1, \qquad (9)$$

как показано на рис. 1.

Приняв первое предположение о неизменности положения векторов на поверхности единичного шара при взаимодействии технологических параметров, считаем, что координаты вершин соответствующего многомерного многогранника являются граничными значениями изменений скалярных переменных флуктуаций.

В предположении сильного или слабого взаимодействия параметров со стохастическими и ПФС ЛПР воздействиями вектор может изменить свое положение, и интервал может быть задан на плоскости в виде двумерного множества.

Примером взаимодействия является предаварийная ситуация в распределении электрических потоков между потребителями по аварийным изменениям активных и реактивных мощностей [9].

Аварийное отключение индуктивной мощности W_{IN} неизбежно ведет к оперативному перераспределению высвободившейся мощности между другими потребителями или подключению к энергосистеме «поля с реактивными нагрузками» или другие решения из-за перекоса векторов мощностей в системе.

Спроецируем на касательной плоскости 1 распределение флуктуаций реактивной индуктивной мощности W_{IN} и реактивной емкостной мощности W_{CA} при наличии стохастического возмущения T_S.

Линейный интервал нормированных флуктуаций реактивных мощностей

$$(-W_{IN} + W_{IN}), (-W_{CA} + W_{CA}) \leq 1 \qquad (10)$$

может быть представлен двумерным множеством Φ^2, и тогда внештатная ситуация характеризуется изменениями флуктуаций технологических параметров

$$\left(\overline{\phi_I} \pm \Delta\varphi_I\right) \in \Phi^2. \qquad (11)$$

Условиями выхода СОС во внештатный режим флуктуаций технологического параметра будут являться выход скалярной переменной $\pm\Delta\varphi_I$ за единичный интервал (9, 10) и выход вектора $\overline{\phi_I}$ за максимальное значение замыкания множества Φ^2 (11).

Рассмотрим пример, представленный на рис. 2.

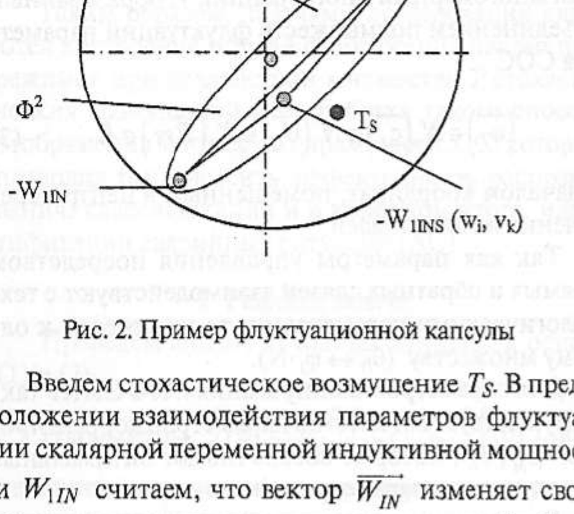

Рис. 2. Пример флуктуационной капсулы

Введем стохастическое возмущение T_S. В предположении взаимодействия параметров флуктуации скалярной переменной индуктивной мощности W_{1IN} считаем, что вектор $\overrightarrow{W_{IN}}$ изменяет свои первоначальные координаты на единичной сфере и установится в новом положении, например, — $W_{1INS}(w_d, v_k)$.

За счет преобразования одномерных интервалов (10,11) в двумерное открытое подмножество

$$\varphi_i \in \left(\Phi_n^2\right) \subset \Phi \qquad (12)$$

получаем двумерное распределение всех флуктуаций технологических параметров ц$_i$., измененных под воздействием стохастического возмущения T_S.

В качестве двумерного множества $\left(\Phi_n^2\right)$ выберем эллипс, у которого большой диаметр $D_{\max}$ соответствует интервалу (10), а малый $D_{\min}$ – определяет флуктуации векторов технологических параметров при взаимодействии их с возмущающими силами T_S.

Таким образом, значения изменений векторов $\overrightarrow{\Delta\varphi_I} > \Delta_K$, распределенных относительно малого радиуса эллипса $D_{\min} \subset \left(\Phi_n^2\right)$, дают возможность использовать для классификации внештатных ситуаций в СОС аппарат нечеткой логики [11, 12], а совместно с анализом изменений амплитуд флуктуаций $\Delta\varphi_i^{R1} > 1$ по большому диаметру $D_{\max} \subset \left(\Phi_n^2\right)$ – для классификации аварийных ситуаций.

Определим в дальнейшем множество (12) как прецессию параметра φ_i на поверхности единичного многомерного шара.

Рассмотрим вариант, когда изменение флуктуации параметра $\overrightarrow{\varphi_i}, \varphi_i \in \left(\Phi^2\right)$ относительно малого диаметра эллипса составляет

$$\vec{\varphi}^{R2}_{\ \ i} \le \Delta_K, \qquad (13)$$

где Δ_K — максимально возможное его изменение при стохастическом воздействии, не приводящее к аварийной ситуации.

Изменение флуктуации скалярной переменной указанного параметра относительно большого диаметра — $\Delta\varphi_i^{R1} > 1$.

Считаем, что за счет параметров управления не происходит выхода СОС из штатного режима.

Тогда в двумерной области $\left(\Phi_n^2\right)$ параметры

$$\Delta_{MAX} \ge \vec{\varphi}_i^{R1} > \Delta_K \text{ и } \Delta_{MAX} \ge \Delta\varphi_i^{R1} > \Delta_K \qquad (14)$$

могут рассматриваться как критерии внештатных и предаварийных ситуаций в СОС.

4. Выводы

1. Разработан этап 1 решения задачи создания формальной модели метаустойчивости СОС, представленной в виде многомерного единичного шара – флуктуационной капсулы, на поверхности которой определенным образом распределены вершины многомерных многогранников векторов флуктуаций, находящихся в поле воздействий стохастических нагрузок и ПФС ЛПР.

2. Предложена модель взаимодействия метрических и нормированных параметров СОС со стохастическими возмущениями. Результатом таких взаимодействий является смещение векторов метризуемых и нормируемых параметров внутри двумерного открытого множества $\left(\Phi_n^2\right)$ гомеоморфного кругу, замыкание которого может быть принято за верхнюю границу существования внештатной ситуации.

3. Анализ проекций векторов параметров СОС на двумерном множестве дает теоретическую возможность разработать критерии классификации внештатных и аварийных ситуаций в СОС, например, посредством математического аппарата нечеткой логики.

4. Объектом теоретических и экспериментальных исследований классификации внештатных и аварийных ситуаций в СОС является определение множества связей–отношений между метрическими и нормированными параметрами со стохастическими возмущениями и влиянием ПФС ЛПР.

5. В следующей статье будет рассмотрен второй этап решения задачи построения модели отображения параметров режимов сложно-организованной системы при воздействии множества стохастических воздействий, посвящены построению и исследованию модели визуализации параметров.

Список литературы: 1. *Бондаренко М.В., Єрохін А.Л.* Про моделі позаштатної поведінки інтелектуальних систем // Проблеми біоніки. 2004. Вип. 60. С. 7-16. 2. *Бурцев Вал.Н., Бурцев Вл.Н., Ерохин А.Л.* Анализ связей сложно-организованных систем с гомеостатическим и гетеростатическим управлением // Системный анализ, управление и информационные технологии. Вестник НТУ "ХПИ", 2001. Сб. науч. тр. Тематич. вып.: Автоматика и приборостроение. Харьков: НТУ "ХПИ". 2001. № 4. С. 20-23. 3. *Пригожин И.* Природа, наука и новая рациональность (В поисках нового миропонимания). М.,1991. 4. *Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса. М.: Прогресс, 1986. 432 с. 5. *Бурцев Вал.Н., Бурцев Вл.Н., Ерохин А.Л.* Обеспечение устойчивости системы психофизиологического состояния ЛПР в системах поддержки принятия решений // Проблемы бионики: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. Х.: Изд-во ХНУРЭ. 2002. Вып. 57. С. 91-94. 6. *Рузавин Г.Н.* Синергетика и диалектическая концепция развития // Философские науки, № 5. 1978. 7. *Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Синергетика как новое мировоззрение. Диалог с И. Пригожиным // Вопросы философии, №12, 1992. 8. *Бурцев В.Н., Ерохин А.Л.* Об оптимальной формализации сложноорганизованных систем / Труды III Междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления», Москва, 28-30 января 2004 года, ИПУ РАН. С. 440-444. 9. *Гриб О.Г., Ерохин А.Л., Светелик А.А.* О поддержке принятия решений при аварийных ситуациях в электрических сетях // Проблемы бионики: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. Х.: Изд-во ХНУРЭ. 2000. Вып. 53. С. 28-30. 10. *Єрохін А.Л.* Топології просторових інформаційних моделей електричних мереж // Електроенергетичні та електромеханічні системи. Вісник Нац. ун. «Львівська політехніка». № 479. Львів. 2003. С. 72-79. 11. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: Пер. с фр. М.: Мир, 1976. 165 с. 12 *Кофман А.* Введение в теорию нечетких множеств: Пер. с фр. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.

Поступила в редколлегию 23.11.2004