

УДК 519.816

Д.Н. Обидин

Кировоградская летная академия Национального авиационного университета, Кировоград

## КОНЦЕПЦИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Предложена концепция обеспечения функциональной устойчивости для распределенной интеллектуализированной системы управления сложным техническим объектом, обоснованы показатели и критерии функциональной устойчивости на основе анализа графа структуры системы

**Ключевые слова:** функциональная устойчивость, распределенная интеллектуализированная система управления, сложный технический объект.

### Вступ

При проектировании сложных технических систем возникает вопрос, насколько реальный процесс функционирования системы будет соответствовать расчетному, так как всегда в действительности при расчетах пользуются приближенными моделями, и целый ряд факторов неизбежно не учитывается. Ответ на этот вопрос дает анализ устойчивости функционирования таких систем.

**Постановка проблемы.** Под устойчивостью функционирования подразумевают сохранение некоторого свойства процесса функционирования по отношению к возмущению или неопределенности некоторых конституент (параметров) системы или ее математической модели. При этом обязательно должен быть оговорен допустимый класс возмущений [1]. Несмотря на выразительность термина "устойчивость", существует множество определений данного понятия, которые весьма зависимы от предметной области их применения. Особую сложность вызывает определение понятия устойчивости для сложных технических объектов (СТО) и их систем управления.

**Анализ публикаций.** Проблеме устойчивости посвящено множество научных работ, основными из которых являются монографии А.М. Ляпунова, Ж. Ла-Салля и С. Лефшеца, И.Г. Малкина, А. Пуанкаре, Б.Г. Демидовича, Л. Чезари, В.В. Румянцева и др.

Большинство подходов теории устойчивости, известных на сегодняшний день, базируются на исследовании систем дифференциальных уравнений. Вместе с тем, классические подходы теории устойчивости для современных систем управления, основанных на активном использовании методов искусственного интеллекта, часто не соответствуют требованиям относительно адекватности и надежности оценок устойчивости функционирования таких систем.

Проблема оценки устойчивости функционирования сложных интеллектуализированных систем управления впервые была поставлена в работах О.А. Машкова [1–5], где в [2] впервые был введен термин "функциональная устойчивость". Ключевые положения

теории функциональной устойчивости впоследствии были развиты в работах О.В. Барабаша [4, 6, 7], Ю.В. Кравченко [3, 7], В.А. Савченко [3, 8] и др. Вместе с тем, очевидной является явная зависимость моделей и методов теории функциональной устойчивости от предметной области их применения.

**Цель статьи** заключается в обосновании основных положений концепции и теоретических основ функциональной устойчивости для распределенной интеллектуализированной системы управления сложного технического объекта (РИСУ СТО).

### Основна частина

Под функциональной устойчивостью распределенной интеллектуализированной системы управления сложного технического объекта в настоящей работе понимается ее свойство сохранять на протяжении заданного времени выполнение своих основных функций в пределах, установленных нормативными требованиями в условиях противодействия внешних дестабилизирующих факторов.

Основное отличие устойчивости функционирования от функциональной устойчивости заключается в следующем: устойчивость функционирования характеризует поведение координат невозмущенного и возмущенного движения системы

$$\forall \theta > 0 \Rightarrow \delta > 0, \rho(z_0, z'_0) < \delta \Rightarrow \\ \Rightarrow \rho[z(t, z_0), z(t, z'_0)] < \theta, \quad \forall t \in [0, \infty),$$

где  $z_0 = z(0)$  – начальные условия – координаты фазового пространства  $z_0$  при невозмущенном движении;  $z'_0 = z'(0)$  – координаты фазового пространства при возмущенном движении;  $\rho$  – метрика пространства  $Z$ ;  $\varepsilon, \theta$  – заданные числа, характеризующие отклонение возмущенного движения от невозмущенного.

Функциональная устойчивость характеризует отклонение основных функций от координат при возмущенном и невозмущенном движении

$$\forall \theta > 0 \Rightarrow \delta > 0, \rho(f(z_0), f(z'_0)) < \delta \Rightarrow \\ \Rightarrow \rho[f(z(t, z_0)), f(z(t, z'_0))] < \theta, \quad \forall t \in [0, \infty),$$

где  $f(z)$  – функция от координаты движения системы, характеризующая основные требования, предъявляемые к системе.

**Концепция функциональной устойчивости РИСУ СТО.** Свойство функциональной устойчивости было введено благодаря наблюдениям за поведением биологических систем, организмов с присущим им свойством выполнять заданные цели при физических повреждениях за счет биологической избыточности: множества органов чувств, нервных волокон, приспособляемости мозга, как системы управления и переработки информации, симметричности организма.

Основной особенностью функционально-устойчивых систем является их способность деградировать на структурном уровне до полного отказа системы, то есть исключать из структуры отказавшие элементы, перестраивать структуру, настраивать параметры системы для приспособления (адаптации) к новым условиям эксплуатации. Основным средством обеспечения функциональной устойчивости является введение избыточности (структурной, программной, временной и т.д.) при их проектировании.

Вместе с тем, такой подход, который часто используется в различных распределенных системах, не может быть использован в распределенных интеллектуализированных системах управления, ключевым элементом которых является распределенная база знаний (РБЗ). В отличие от технических систем, база знаний не может деградировать, исключая из работы отдельные модули, поскольку образовавшиеся в таком случае разрывы не обеспечат нормальное ее функционирование, а вывод, сделанный на такой базе знаний, не будет владеть необходимой достоверностью. В таком случае необходим несколько иной подход к определению понятия и формированию этапов обеспечения функциональной устойчивости РИСУ СТО.

Стандартный подход к обеспечению функциональной устойчивости для распределенной системы включает основные этапы: 1) выявление (локализация) отказа; 2) определение наличия избыточности; 3) исключение отказавшего узла и перераспределение процесса выполнения задач на оставшиеся узлы.

В случае функционирования распределенной базы знаний изменяется как структура процесса, так и сама сущность этапов.

Так, для выявления проблемного модуля применяется процедура распределенной верификации РБЗ. После определения (локализации) проблемного модуля, должна быть выполнена процедура определения степени “доверия” некорректному модулю, поскольку даже некорректный модуль может выдавать требуемые выводы, хотя степень доверия к таким выводам будет несколько ниже, чем в случае корректной базы знаний. В таком случае, оперируя теперь с нечеткими знаниями, алгоритм получения вывода на РБЗ должен быть перестроен соответствующим образом.

Таким образом, концепция обеспечения функциональной устойчивости РИСУ СТО, функционирующего в реальном времени, заключается в выполнении следующих этапов:

- 1) распределенная динамическая верификация РБЗ РИСУ;
- 2) фазсификация структуры РИСУ на основе результатов динамической верификации;
- 3) адаптация алгоритмов вывода на РБЗ с учетом фазсифицированности ее структуры.

Процедуры верификации РБЗ являются достаточно сложными для их непосредственного применения в СТО реального времени. Поэтому, для получения различных оперативных (приближенных) оценок состояния РИСУ можно использовать структурные методы оценок, основанные на анализе структурных особенностей графов, их описывающих.

**Математическая модель описания структуры РИСУ.** Для дальнейших исследований будем использовать математическую модель в виде неориентированного графа, т.к. логические связи в РБЗ могут считаться двусторонними

$$G(V, L), V = \{v_i\}, L = \{l_{ij}\}, i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

в которой множеству вершин  $V$  соответствует множество модулей РБЗ мощности  $n$ , а множеству ребер  $L$  соответствует множество связей между модулями. Так же будем считать, что в графе отсутствуют петли и кратные ребра.

Граф может быть задан тремя способами: матрицей связности размером  $n \times n$

$$A = \|a_{ij}\|, i, j = 1 \dots n, a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при } l_{ij} \in L; \\ 0, & \text{при } l_{ij} \notin L, \end{cases} \quad (2)$$

списками связности размером  $1 \times m$ ;  $m = |L|$ ;

списком смежности, котором каждой вершине  $v_i$  ставится в соответствие список  $N_{v_i}$  вершин, смежных с  $v_i$ ;

матрицей инцидентности размерностью  $n \times m$  [9].

При исследовании моделей будем использовать следующие инварианты (параметры) графов:

- 1) мощность множества вершин  $n = m_v = |V|$ ;
- 2) мощность множества ребер  $m_L = |L|$ ;
- 3) локальные степени вершин (валентность) – число инцидентных ребер по отношению к вершине  $v_i$ :

$$\alpha_i = \text{deg}(v_i); \quad (3)$$

- 4) характеристические числа матрицы смежности графа (след графа)  $\lambda_i, i=1, 2, \dots, n$ , являющиеся решением матричного уравнения:

$$A - \lambda E = 0, \quad (4)$$

где  $A$  – матрица смежности графа;

$\lambda^T = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$  – вектор характерных чисел;

$E = \|e_{ij}\|$  – единичная матрица:

$$e_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{при } i \neq j; \\ 1, & \text{при } i = j. \end{cases}$$

5) число вершинной связности (узловой связности)  $\chi(G)$ ;

6) число реберной связности  $\lambda(G)$ .

**Признаки функциональной устойчивости структуры.** В технической кибернетике, а именно в теории автоматического управления [1], построена классическая теория устойчивости динамических систем. В данной теории можно оценить устойчивость, не решая систему дифференциальных уравнений, которые описывают объект, а, используя простые признаки, условия и критерии устойчивости, разработанные И.А. Вышнеградским, А. Гурвицем, А.В. Михайловым, Х. Найквистом и др. По аналогии с классической теорией устойчивости предлагается оценивать функциональную устойчивость по параметрам графа, который описывает структуру РИСУ. Оказывается, что по внешнему виду графа и его параметров можно определить: будет ли такая РИСУ функционально устойчивой, неустойчивой или нейтральной.

**Признак функциональной устойчивости структуры.** Структура РИСУ является функционально устойчивой, если граф структуры является однокомпонентным и не имеет мостов и узлов соединения. Обратное определение позволяет обусловить функциональную неустойчивость структуры.

**Признак функциональной неустойчивости структуры.** Структура РИСУ является функционально неустойчивой, если ее граф является многокомпонентным и несвязным.

Таким образом, по внешнему виду графа, а именно по числу компонентов, наличию мостов и узлов соединения графа можно судить о функциональной устойчивости структуры, то есть о потенциально заложенной в ней способности функционировать в условиях сбоев и отказов. Однако для сильно-разветвленных и многовершинных графов осуществить оценивание по внешнему виду сложно. Поэтому для количественной оценки степени функциональной устойчивости введем в рассмотрение показатели функциональной устойчивости структуры.

**Показатели функциональной устойчивости структуры РИСУ.**

1. Число вершинной связности  $\chi(G)$  – это наименьшее число вершин, удаление которых вместе с инцидентными им ребрами приводит к несвязному или одновершинному графу [9].

2. Число реберной связности  $\lambda(G)$  – это наименьшее число ребер, удаление которых приводит к несвязному графу [9].

3. Вероятность связности  $P_{ij}(t)$  – это вероятность того, что информация из узла  $i$  в узел  $j$  будет передана за время не более, чем  $t$ .

Анализ данных показателей позволяет выделить такие их особенности:

числа вершинной и реберной связности характеризуют только общую структуру РИСУ, независимо от состояния модулей или связей;

показатели  $\chi(G)$  и  $\lambda(G)$  принимают значения целых чисел и связаны соотношением

$$\chi(G) \leq \lambda(G) \leq \min_{v_i \in V} \{ \deg(v_i) \}; \quad (5)$$

вероятность связности  $P_{ij}(t)$  позволяет учитывать надежность аппаратной части РИСУ, вид физического канала передачи информации, наличие резервных путей передачи, а также связность распределенной структуры. Вместе с тем, вычисление значения  $P_{ij}(t)$  является сложной и громоздкой задачей;

вероятность связности характеризует только связность между одной парой вершин, что определяет возможность вывода на двух связных модулях. Чтобы характеризовать связность между всеми парами вершин необходимо оперировать с матрицей вероятностей связности:

$$P_{CB} = \|P_{ij}\|, i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

На основе предложенных признаков и показателей можно разработать критерии функциональной устойчивости структуры:

**Критерии функциональной устойчивости структуры РИСУ.**

1. Структурный критерий. Структура функционально устойчива, если число вершинной связности и число реберной связности удовлетворяют условиям:

$$\chi(G) \geq 2 \cup \lambda(G) \geq 2. \quad (7)$$

2. Вероятностный критерий. Структура функционально устойчива, если вероятность связности между каждой парой вершин будет не менее заданной:

$$P_{ij}(t) \geq P_{ij}^{зад}, i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

где  $n$  – число вершин графа  $G(V, L)$ .

**Обоснование показателей функциональной устойчивости.**

1. Число вершинной связности  $\chi(G)$  характеризует максимально возможное число отказов модулей РИСУ  $R_{мод}$ , при которых

$$R_{мод} = \chi(G) - 1. \quad (9)$$

Таким образом, параметр  $\chi(G)$  характеризует верхнюю оценку допустимого числа отказов модулей РБЗ.

2. Число реберной связности  $\lambda(G)$  характеризует максимально возможное число отказов линий связи РИСУ, при котором сеть остается связной

$$\lambda(G) = \min |S_j, j = 1, 2, \dots, m_s| \quad (10)$$

где  $S_j$  –  $j$ -е множество ребер, составляющих простое сечение множества графа;  $m_s$  – мощность множества простых сечений графа.

Таким образом, параметр графа  $\lambda(G)$  характеризует верхнюю границу допустимого числа отказов связей между модулями.

3. В качестве числового показателя функциональной устойчивости структуры выбрана также вероятность связности  $P_{ij}(t)$  – вероятность того, что информация будет доставлена из узла  $i$  в узел  $j$  за время не более  $t$ . Преимущества использования данного показателя заключаются в следующем:

учитывается надежность коммутационного оборудования;

учитывается вид физического канала передачи информации;

учитывается наличие резервных каналов и маршрутов;

учитывается связность распределенной структуры.

Вычисление вероятности связности  $P_{ij}(t)$  осуществляется на основе следующих исходных данных:

вероятности передачи сообщения  $P_{ij}$  по линии  $I_{ij}$ ;

структуры распределенной информационной системы.

Очевидно, что чем выше исходные  $p_{ij}$  для каждого канала связи, тем выше вероятность  $P_{ij}(t)$ . Чем насыщеннее структура (больше маршрутов из  $v_i$  в  $v_j$ , больше значения показателей  $\chi(G)$  и  $\lambda(G)$ ), тем выше вероятность связности  $P_{ij}(t)$ . Таким образом, показатель  $P_{ij}(t)$  является основным показателем, характеризующим функциональную устойчивость РИС.

Таким образом, на основе предложенных признаков и показателей разработаны структурный и вероятностный критерии функциональной устойчивости структуры РИСУ, которые на основе точных расчетов позволяют определить функциональную устойчивость текущей структуры системы, функционирующей в реальном масштабе времени.

### Висновок

Таким образом, в отличие от сложных технических систем, концепция обеспечения функциональной устойчивости распределенных интеллектуализированных систем управления реального времени включает этапы: распределенной динамической верификации распределенной базы знаний, фазсификации структуры распределенной системы и адаптации алгоритмов вывода по результатам фазсификации.

Для оперативной оценки функциональной устойчивости распределенных интеллектуализированных систем управления целесообразно применять структурные методы на основе определения соответствующих параметров графов. Применение структурных методов позволяет определить показатели и критерии функциональной устойчивости, а

также необходимые и достаточные условия обеспечения функциональной устойчивости распределенной интеллектуализированной системы управления сложным техническим объектом.

Направлением дальнейших исследований в этой области может быть широкий круг вопросов, посвященных моделям определения показателей функциональной устойчивости распределенных интеллектуализированных систем управления.

### Список літератури

1. Артюшин Л.М. Теорія автоматичного керування / Л.М. Артюшин, О.А. Машков, М.С. Сівов, Б.В. Дурняк. – Львів: Політехніка, 2003. – 456 с.
2. Машков О.А. Оптимизация цифровых автоматических систем, устойчивых к отказам / Л.М. Артюшин, О.А. Машков. / – К.: КВВАИУ, 1991. – 89 с.
3. Машков О.А. Синтез високоточної радіонавігаційної системи на основі метода аналізу ієрархій показників якості / О.А. Машков, Ю.В. Кравченко, В.А. Савченко // Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – 2003. – Вип. 22. – С. 41-48.
4. Машков О.А. Топологічні критерії та показники функціональної стійкості складних ієрархічних систем / О.А. Машков, О.В. Барабаш // Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – 2003. – Вип. 25. – С. 29-35.
5. Машков О.А. Возможности обеспечения функциональной устойчивости эргатических систем управления в рамках существующего методического аппарата / О.А. Машков, О.А. Кононов // Зб. наук. пр. Ін-ту проблем моделювання в енергетиці НАН України. – 2006. – Вип. 32. – С. 151-157.
6. Барабаш О.В. Построение функционально устойчивых распределенных информационных систем / О.В. Барабаш. – К.: НАОУ, 2004. – 226 с.
7. Кравченко Ю.В. Функціональна стійкість – властивість складних технічних систем / Ю.В. Кравченко, О.В. Барабаш // Труды академії, № 40. – К.: НАОУ. – 2002. – С. 225-228.
8. Савченко В.А. Обоснование показателя функциональной устойчивости пространственной структуры для многопозиционных радионавигационных систем / В.А. Савченко // Зб. наук. пр. ХВУ. – Х.: ХВУ, 2004. – № 5(52). – С. 41-42.
9. Уилсон Р. Введение в теорию графов: пер. с англ. / Р. Уилсон. – М.: Мир, 1977. – 208 с.

Надійшла до редколегії 1.11.2012

Рецензент: д-р техн. наук проф. О.В. Барабаш, Національний авіаційний університет, Київ.

### КОНЦЕПЦИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Д.Н. Обидин

Предложена концепция обеспечения функциональной устойчивости для распределенной интеллектуализированной системы управления сложным техническим объектом, обоснованы показатели и критерии функциональной устойчивости на основе анализа графа структуры системы.

**Ключевые слова:** функциональная устойчивость, распределенная интеллектуализированная система управления, сложный технический объект.

### THE CONCEPT OF FUNCTIONAL STABILITY FOR DISTRIBUTED INTELLECTUALIZED CONTROL SYSTEM

D.M. Obidin

The article highlights the concept of functional stability for distributed intellectualized control system of the complex technical object, also the criteria of functional stability on the basement of graph structure analyze are given.

**Keywords:** functional stability, distributed intellectualized control system, complex technical object.