

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЙ СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ ПРИ АДАПТИВНОМ СИТУАЦИОННОМ УПРАВЛЕНИИ

к.т.н. Гулай А.В., к.т.н. Зайцев В.М.

Белорусский национальный технический университет, Минск

Современные интеллектуальные мехатронные системы включают механические, электромеханические, электронные (дискретные, импульсные, цифровые) компоненты, а также различные компьютерные блоки. Совместная работа указанных элементов мехатронных систем осуществляется за счет введения в их состав интеллектуальных средств алгоритмического и программного обеспечения. В таком случае системные процессы контроля и управления при использовании интеллектуальных средств носят явно выраженный циклический ситуационно–адаптивный характер.

Ситуационно-адаптивное управление основывается на учете и анализе объективно складывающихся системотехнических ситуаций, которые определяются множеством одномоментных событий и внешних обстоятельств функционирования системы. В перечень таких событий и обстоятельств входит взаимодействие системы со средой, с объектом управления и иными элементами системного окружения [1, 2]. Неопределенности и неточности в идентификации системотехнических ситуаций порождают риски управления, которые могут иметь негативные последствия для функционирования системы.

В связи с вышеизложенным, представляет значительный интерес рассмотрение вопросов оценки состояния текущей системотехнической ситуации в различных циклах адаптивного ситуационного управления.

Кластеризация информации как основа оценки состояния системотехнической ситуации

Адекватность формирования в интеллектуальной мехатронной системе управленческих решений и соответствующих им управляющих воздействий определяется, в основном, информационной полнотой сенсорных образов текущих системотехнических ситуаций, а также правильностью их идентификации. Неопределенности и неточности в идентификации системотехнических ситуаций порождают риски управления, которые могут иметь негативные и даже катастрофические последствия для функционирования системы.

Следует отметить, что риски всегда требуют количественной оценки, поскольку влияют на перспективное поведение системы, на ее будущие состояния и результаты функционирования. Для сложных многопараметрических систем важно своевременно выявлять различного рода отклонения и опасные тенденции развития системных ситуаций и принимать соответствующие превентивные меры. Сложность рационального выбора управленческих решений и минимизация рисков, прежде всего, зависят не только от текущих уровней неопределенностей и неточностей, но и от ранжирования рисков по возможным последствиям, от принятой стратегии уклонения от рисков и от методов их нейтрализации.

Под сенсорным образом системотехнической ситуации, складывающейся на текущий момент времени, здесь и далее будем понимать максимально полный и упорядоченный перечень ее параметров и характеристик (то есть аспектов и атрибутов), совокупность которых дает целостное представление о состоянии важнейших агрегатов, узлов и блоков самой системы, внешней среды, управляемых и взаимодействующих объ-

ектов. Состав параметров и характеристик, получение которых возлагается на сенсорную аппаратуру системы, должен быть достаточным для численного решения задач управления преимущественно на основе использования цифрового вычислительного оборудования и средств программного обеспечения.

Для эффективного решения задач управления необходима структуризация информации, определение ее смысла и ценности. Системотехническими приемами, наиболее часто применяемыми для структуризации информации, являются кластеризация и классификация. В отличие от многофакторных задач обработки данных, решаемых при распознавании образов, машинном обучении и автоматической классификации, в гибридных системах контроля и управления, имеющих техническое назначение, кластеризация и классификация применяются преимущественно с целью выработки управленческих решений.

Кластеризация — это разбиение множества материальных или информационных элементов на подмножества с заранее известными характеристиками, которые могут интерпретироваться как единицы самостоятельного системотехнического применения. Количество кластеров может быть как произвольным, так и фиксированным, при этом кластеры могут рассматриваться в качестве составных элементов иных классификационных единиц (в частности, таксонов).

Под классификацией чаще всего понимают отнесение конкретного элемента из анализируемого множества материальных или информационных элементов или некоторого их подмножества — кластера, к тому или иному классу — таксону, который обладает заранее известными свойствами или заранее известной схемой дальнейшей обработки или использования входящих элементов. Число таксонов, как правило, ограничено.

Кластеризация и классификация в известной мере выполняются по общей схеме [3, 4]. Предполагается, что имеется исходная последовательность (набор) из $n > 0$ информационных элементов (единиц) $\{x_1, x_2, \dots, x_n\} \subset X$. В этом множестве требуется выделить подмножества — кластеры (таксоны, термы) X_1, X_2, \dots, X_K при условии, что задана функция метрики $d(x_i, x_j)$, определяющая расстояние между любой парой элементов (единиц). Каждое из подмножеств состоит из элементов (единиц), близких по метрике $d(x_i, x_j)$, а элементы (единицы) разных подмножеств существенно отличаются, при этом в идеальном случае

$$X_a^* \cap_{k=1}^K X_b^* = \emptyset; a, b = 1, 2, \dots, K; a \neq b; \bigcup X_k^* = X. \quad (1)$$

Функция кластеризации $f: X \rightarrow X^*$ любому блоку (единице) $x_i \in X$ ставит в соответствие блок (единицу) $x_{ik}^* = f(x_i)$ с меткой k кластера $X_k^* \in X$. Мощности отдельных подмножеств $\text{Card}(X_k^*)$ заранее не известны. В ряде практических случаев может наблюдаться пересечение классификационных подмножеств, то есть классификация становится нечеткой.

До настоящего времени не построен универсальный алгоритм кластеризации и классификации, который был бы эффективным для представления информации различной природы. В основном используются итеративные методы, которые базируются на априорном задании количества кластеров и таксонов [3]. Результат существенно зависит от метрики, выбор которой обычно определяется экспертом и чаще всего субъективен. Кроме того, большое значение имеет первоначальное разбиение анализируемого множества элементов на кластеры и правильность исходной оценки количества подмножеств X_1, X_2, \dots, X_K . Несмотря на сложность и многопараметричность гибридных систем контроля и управления, для них могут быть найдены методы и приемы кластеризации и классификации сенсорных образов текущих системотехнических ситуаций, обеспечивающие получение эффективных разбиений и выработку адекватных управ-

ленческих решений в условиях неопределенности с одновременной оценкой возможных рисков.

Формирование таксонов управляющих воздействий при адаптивном ситуационном управлении

Сформируем таксоны таким образом, чтобы каждому из них можно было поставить в соответствие определенные управленческие решения и последующие управляющие воздействия. С этой целью введем таксоны S как классификационные группы сенсорных образов системотехнических ситуаций, которые на этапе анализа системы предварительно выделяются системными аналитиками по признаку целевой общности и направленности последующих управленческих решений и управляющих воздействий. При использовании наиболее распространенной таксономической схемы введенным таксонам может быть приписан следующий системотехнический смысл:

- $S_1 = S_{AB}$, $S_5 = S_{AH}$ — таксоны выработки экстренных управляющих воздействий при достижении контролируемыми параметрами или характеристиками, соответственно, верхних или нижних аварийных границ;
- $S_2 = S_{PB}$, $S_4 = S_{PH}$ — таксоны выработки штатных предупредительных управленческих решений и управляющих воздействий при достижении контролируемыми параметрами, соответственно, верхних или нижних предупредительных границ;
- $S_3 = S_{PP}$ — таксон предпочтительных системотехнических ситуаций, в которых предполагается принятие штатных управленческих решений по формированию управляющих воздействий с целью обеспечения требуемых законов управления, либо с целью сохранения текущих состояний управляемых объектов и системы.

Сенсорные образы системотехнической ситуации в каждом цикле управления естественно оценивать текущими значениями параметров, которые являются координатами информационных векторов системы:

$$X_t = (x_g = a_{gt}); g = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Значение каждого элемента $x_g = a_{gt}$ характеризует некоторую сторону или текущее микросостояние сенсорного образа системотехнической ситуации. В состав векторов X_t в терминологии Р. Эшби должны включаться только «главные параметры» и характеристики, необходимые и достаточные для решения требуемого набора задач управления [5]. На стадии системного анализа среди координат вектора X_t целесообразно выделять параметры векторов, которые формируются сенсорной аппаратурой. Совокупности возможных значений каждого из контролируемых параметров x_g соответствуют определенным интервалам $\{(x_{ng}; x_{vg})\}$.

Оцифрованные значения образуют соответствующие дискретные множества с потенциальными мощностями $\text{Card}(x_g) = 2^{R_g}$, где R_g — количество двоичных разрядов, отведенных для представления параметра x_g в цифровых компонентах и в компьютерных блоках. На практике для оцифрованных значений непрерывных, дискретных или импульсных параметров $\{x_{gj}\}; j = 1, 2, 3, \dots, 2^{R_g}$ выполняется предварительное выделение пяти типовых интервалов индивидуального разбиения указанных множеств на кластеры $\{C_{gi}\}; i = 1, 2, 3, 4, 5$, а также задание их нижних и верхних идентификационных границ $\{(x_{ngi}; x_{vgi})\}$. Дискретные параметры иногда используются для количественного представления возможных состояний органов управления системы.

Параметры и характеристики x_g могут быть интерпретированы как лингвистические переменные, терм-множества которых в общем случае включают в свой состав по пять нечетких термов: C_{g1} — аварийный верхний; C_{g2} — предупредительный верхний; C_{g3} — штатный рабочий; C_{g4} — предупредительный нижний; C_{g5} — аварийный ниж-

ний. Потенциальная мощность каждого кластера определяется следующими значениями:

$$\{\text{Card}(C_{gi}) = \text{Ant}[(x_{B_{gi}} - x_{H_{gi}})2^{R_g} / (x_{B_g} - x_{H_g})]\}, \quad (3)$$

где Ant — функция Антье взятия большего целого.

Интервалы каждого параметра или характеристики x_g выделяют кластеры C_{gi} , соответствующие таксонам S_i , при этом в каждый текущий момент времени

$$S_i = \bigcup C_{ni}. \quad (4)$$

При сенсорном формировании значений параметров α_g погрешности представления этой информации в системе в большинстве случаев могут быть оценены средне-квадратичными отклонениями $\{\sigma_{gi}\}$ вероятностных (в ряде случаев нормальных) распределений. В общем случае погрешности представления параметров и характеристик x_g в различных интервалах их возможных значений могут быть различными. Таким образом, кластеры C_{gi} и формируемые на их основе таксоны S_i по своей природе являются нечеткими множествами с «размытыми» и пересекающимися границами. Это порождает зоны неопределенности, в которых конкретные значения тех или иных текущих координат $x_g = \alpha_{gi}$ информационного вектора допускают одновременное отнесение их к различным смежным кластерам.

На основе знаний экспертов нечеткие термы C_{gi} могут быть наделены одномерными трапециевидными, π -образными или иными функциями принадлежности $\{\mu_{gi}(\alpha_g)\}$. Одномерные трапециевидные функции принадлежности, которые характерны для параметров и характеристик с интервальными границами, задаются следующими соотношениями:

$$\mu_{gi}(\alpha_g) = \begin{cases} 0 & \text{при } \alpha_g < A_{gi} - 3\sigma_{gi}; \\ (\alpha_g - A_{gi} + 3\sigma_{gi})/6\sigma_{gi} & \text{при } A_{gi} - 3\sigma_{gi} \leq \alpha_g \leq A_{gi} + 3\sigma_{gi}; \\ 1 & \text{при } A_{gi} + 3\sigma_{gi} \leq \alpha_g \leq B_{gi} - 3\sigma_{gi}; \\ -(\alpha_g - B_{gi} - 3\sigma_{gi})/6\sigma_{gi} & \text{при } B_{gi} - 3\sigma_{gi} \leq \alpha_g \leq B_{gi} + 3\sigma_{gi}; \\ 0 & \text{при } \alpha_g > B_{gi} + 3\sigma_{gi}. \end{cases} \quad (5)$$

Пример типовой трапециевидной функции принадлежности параметров представлен на рисунке 1.

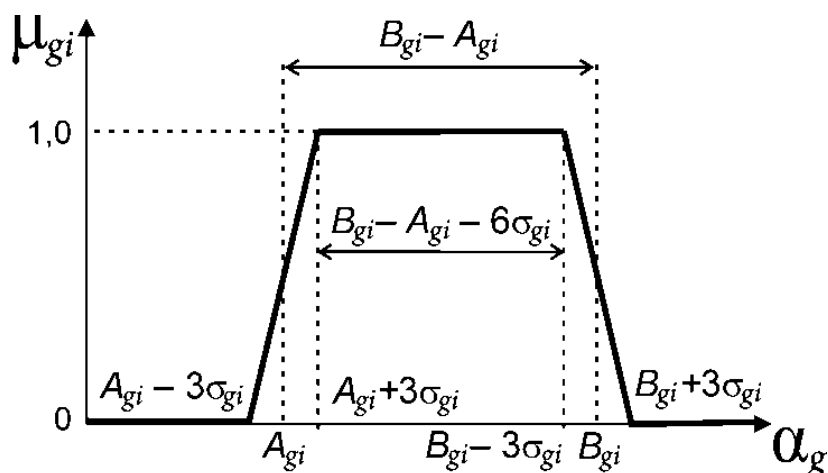


Рис. 1. Трапециевидная функция принадлежности параметров объекта управления

Для каждого нечеткого терма C_{gi} параметры A_{gi} и B_{gi} равны $A_{gi} = x_{H_{gi}}$, $B_{gi} = x_{B_{gi}}$. При этом база данных системы должна содержать отношение $F\alpha$ условно-постоянных

параметров функции принадлежности с кардинальным числом $5n$, доменарным числом 5 и основным ключом кортежей $\langle gi \rangle$:

$$Fa = \{g, i, \sigma_{gi}, x_{n gi}, x_{b gi}\}. \quad (6)$$

Оценка уровней доверия к расчетным значениям мощностей таксонов

Для выработки управленческих решений и последующих управляющих воздействий в любой текущий момент времени принципиально важны оценки мощностей каждого из таксонов $\text{Card}(S_{it})$. Под текущей мощностью таксона $\text{Card}(S_{it})$ понимается количество параметров x_g , текущие значения которых α_g отнесены к кластерам C_{gi} , соответствующим таксону S_{it} . Именно совокупность текущих мощностей таксонов $\{\text{Card}(S_{it})\}$ объективно характеризует макросостояние каждой системотехнической ситуации. Очевидно, что для текущей мощности любого таксона S_{it} имеют место следующие соотношения:

- 1) $\min \text{Card}(S_{it}) = 0$ — пустой таксон, если $\{\mu_{gi}(\alpha_{gt}) = 0\}$;
- 2) $\text{Card}(S_{it}) = \sum \beta_{gi}$, где $\beta_{gi} = 1$, если $\mu_{gi}(\alpha_{gt}) \neq 0$;
- 3) $\beta_{gi} = 0$, если $g = 1, 2, \dots, n$ при $\mu_{gi}(\alpha_{gt}) = 0$;
- 4) $\max \text{Card}(S_{it}) = n$ — таксон максимальной текущей мощности, если $\{\mu_{gi}(\alpha_{gt}) = 1\}$.

Текущие значения мощностей таксонов $\text{Card}(S_{it})$ в свою очередь образуют нечеткие множества с диапазоном мощностей $[0, n]$. Из-за нечетких границ кластеров C_{gi} и их возможных пересечений объективно возможны ситуации, при которых имеет место следующее соотношение:

$$\sum_i \text{Card}(S_{it}) > n. \quad (7)$$

Особенностью формирования таксонов в процессе функционирования системы является то, что по составу они динамичны. Априорно крайне трудно, а в ряде случаев практически невозможно, на основе каких-либо теоретических рассуждений или предварительного анализа вывести многомерные функции принадлежности параметров и характеристик x_g к тем или иным таксонам S_{it} для произвольных моментов времени $\{\mu_{S_{it}}(x_n = \alpha_{nt})\}$.

В анализируемых условиях возникает задача оценки уровня доверия системных аналитиков к результатам расчетов текущих мощностей таксонов. В связи с этим рассмотрим применение аппарата нечетких выводов Заде – Мамдани для оценки уровней доверия к расчетным значениям мощностей таксонов, соответствующих системотехнической ситуации при поступлении в систему вектора (2) и автоматической кластеризации его параметров [6, 7].

В алгоритме нечеткого вывода Заде – Мамдани в качестве первой процедуры применяется фаззификация — действие, которое направлено на преобразование четкого значения α_{gt} каждого из параметров или характеристик x_g в соответствующие нечеткие значения термов C_{gi} . Для этого на основе условно–постоянных параметров отношения Fa базы данных рассчитываются значения функции принадлежности соответствующим термам $\{M_{git} = \mu_{gi}[\alpha_{gt}]\}$ по каждому из значений параметров и характеристик α_{gt} .

Возможная фреймовая структура параметров и характеристик текущей системотехнической ситуации представлена в таблице 1. Второй слот фрейма каждого параметра или характеристики является пятикоординатным вектором принадлежности значений $\{x_g = \alpha_{gt}\}$ соответствующим кластерам C_{gi} .

Табл. 1. Фреймовая структура параметров текущей системотехнической ситуации

Текущая системотехническая ситуация			
Фреймы параметров и характеристик			
x_1	СЛОТ 11	α_1	Real α_{1t}
	СЛОТ 12	M_{1it}	Real $\{M_{1it}\}$
x_2	СЛОТ 21	α_2	Real α_{2t}
	СЛОТ 22	M_{2it}	Real $\{M_{2it}\}$
...			
x_n	СЛОТ n1	α_n	Real α_{nt}
	СЛОТ n2	M_{nit}	Real $\{M_{nit}\}$

Рассмотрим логические правила формирования таксонов на основе кластеров C_{gi} . Термы S_i соответствуют продукции, для которой фактические значения переменных $x_g = \alpha_{gt}$ обладают свойствами $\{M_{git} \neq 0\}$ и попадают в кластеры C_{gi} .

Rule 1:

$IF(\alpha_{1t} \text{ is } C_{11}) \text{ AND } (\alpha_{2t} \text{ is } C_{21}) \text{ AND } \dots \text{ AND } (\alpha_{gt} \text{ is } C_{g1}) \text{ AND } \dots$
 $\dots \text{ AND } (\alpha_{nt} \text{ is } C_{n1}) \text{ THEN } (S \text{ is } S_{AB}); (W_1).$

Rule 2:

$IF(\alpha_{1t} \text{ is } C_{12}) \text{ AND } (\alpha_{2t} \text{ is } C_{22}) \text{ AND } \dots \text{ AND } (\alpha_{gt} \text{ is } C_{g2}) \text{ AND } \dots$
 $\dots \text{ AND } (\alpha_{nt} \text{ is } C_{n2}) \text{ THEN } (S \text{ is } S_{PB}); (W_2).$

...

Rule 5:

$IF(\alpha_{1t} \text{ is } C_{15}) \text{ AND } (\alpha_{2t} \text{ is } C_{25}) \text{ AND } \dots \text{ AND } (\alpha_{gt} \text{ is } C_{g5}) \text{ AND } \dots$
 $\dots \text{ AND } (\alpha_{nt} \text{ is } C_{n5}) \text{ THEN } (S \text{ is } S_{AH}); (W_5).$

Здесь $0 \leq W_i \leq 1$ — экспертные коэффициенты уверенности в заключении по соответствующему правилу.

На основании использования минимальных операций пересечения нечеткой логики по Л. Заде и результатов фаззификации формируются значения агрегирования:

$$A_i = \min \{M_{git}\} \text{ для } \{M_{git} \neq 0\}. \quad (8)$$

По каждому из заключений оцениваются текущие точечные значения функции принадлежности параметров вектора X_t таксонам S_{it} . В этой процедуре учитываются экспертные коэффициенты уверенности в заключениях путем выполнения операций обычного алгебраического умножения:

$$\{\mu S_{it}(x_g = \alpha_{gt}) = W_i A_i\}. \quad (9)$$

Табл. 2. Фреймовая структура слотов текущей системотехнической ситуации

Текущая системотехническая ситуация			
Фреймы таксонов			
ТАКСОН 1	СЛОТ 11	SL_{11}	Integer $\text{Card}(S_{1t})$
	СЛОТ 12	SL_{12}	Integer $G_{1t} = \{g_{1t}\}$
	СЛОТ 13	SL_{13}	Real μS_{1t}
ТАКСОН 2	СЛОТ 21	SL_{21}	Integer $\text{Card}(S_{2t})$
	СЛОТ 22	SL_{22}	Integer $G_{2t} = \{g_{2t}\}$
	СЛОТ 23	SL_{23}	Real μS_{2t}
...			
ТАКСОН 5	СЛОТ 51	SL_{51}	Integer $\text{Card}(S_{5t})$
	СЛОТ 52	SL_{52}	Integer $G_{5t} = \{g_{5t}\}$
	СЛОТ 53	SL_{53}	Real μS_{5t}

Уровни рисков при использовании расчетных значений текущих мощностей таксонов $\{\text{Card}(S_{it})\}$ для выработки управленческих решений и управляющих воздействий характеризуются следующими величинами:

$$\{R_{it} = 1 - \mu S_{it}(x_g = \alpha_{gt})\}. \quad (10)$$

Фреймовая структура слотов текущей системотехнической ситуации показана в таблице 2. В этой структуре $\{\text{Card}(S_{it})\}$ — текущие мощности таксонов S_{it} ; $G_{it} = \{g_{it}\}$ — списки параметров и характеристик x_g , которые имеют текущие значения $M_{git} \neq 0$ и обуславливают их вхождение в текущие таксоны S_{it} ; μS_{it} — значения функций принадлежности параметров вектора X_t таксонам S_{it} .

РЕЗЮМЕ

Ситуационно-адаптивное управление в интеллектуальной мехатронной системе основывается на анализе объективно складывающихся системотехнических ситуаций, которые определяются множеством событий и обстоятельств взаимодействия системы с элементами ее окружения. С учетом этого выполнен анализ процессов кластеризации информации и формирования таксонов управляющих воздействий при ситуационно-адаптивном управлении. Рассмотрена технология применения аппарата нечетких выводов Заде – Мамдани для оценки уровней доверия к расчетным значениям мощностей таксонов, соответствующих текущим состояниям системотехнических ситуаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поспелов, Д. А. Ситуационное управление: теория и практика / Д. А. Поспелов — М.: Наука, 1986.
2. Ющенко, А. С. К теории деятельности эргатических мехатронных систем / А. С. Ющенко // Мехатроника. — 2000. — № 3.
3. Граничин, О. Н. Рандомизированный алгоритм стохастической аппроксимации в задаче самообучения / О. Н. Граничин, О. А. Измакова // Автоматика и телемеханика. — 2005. — № 8.
4. Hartigan, J. A. Clustering Algorithms / J. A. Hartigan — New York: Wiley, 1975.
5. Эшби, У. Р. Введение в кибернетику / У. Р. Эшби — М.: Издательство иностранной литературы, 1959.
6. Mamdani, E. H. An Experiment in Linguistic Synthesis with Fuzzi Logic Controller / E. H. Mamdani, S. Assilian // Int. J. Man–Machine Studies. — 1975. — Vol. 7. — № 1.
7. Штовба, С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и в нечеткую логику. Проектирование систем управления / С. Д. Штовба — Источник: интернет-ресурс matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/1.php.

SUMMARY

Situational and adaptive control in the intellectual mechatronic system is based on the analysis of objective systems engineering situations which are determined by numerous events and circumstances of system interaction with surrounding components. By taking this phenomenon in account the analysis has been carried out concerning the information clustering and taxons formation of controlling impacts during situational and adaptive control. The technology of using the Zadeh – Mamdani’s fuzzy conclusion instrument has been considered for evaluation of assurance levels to the calculated values of taxons capacities in compliance with the current state of systems engineering situations.

E-mail: altaj@tut.by

Поступила в редакцию 12.09.2015