



УДК 621.398

© 2016 г. **И.А. Щербатов**, канд. техн. наук
(Астраханский государственный технический университет)

АВТОНОМНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И СТЕПЕНЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В работе с позиций системного подхода разработаны метрики для оценки степени интеллектуальности и автономности функционирования сложных технических систем на различных этапах жизненного цикла. Приведены расчетные примеры, доказывающие эффективность предложенных решений.

Ключевые слова: сложная техническая система, автономность функционирования, степень интеллектуальности, нечеткие множества, нечеткая метрика.

DOI: 10.22250/isu.2016.49.105-118

Введение

Сложные технические системы (СТС) функционируют при наличии неопределенностей различных типов. В рамках базовых положений концепции интеллектуального управления можно выделить необходимость соответствия *степени интеллектуальности* системы *уровню неопределенности*. Таким образом, можно утверждать, что чем выше неопределенность тем выше степень интеллектуальности [1].

Интеллектуальность достигается за счет применения систем, основанных на знаниях и ситуационном управлении, а автономность обусловлена степенью интеллектуальности и иерархичностью системы управления.

В [2] введено понятие интеллектуальности «в малом» (наличие исполнительного слоя и слоя работы с базами знаний и формирования управляющих решений), «в большом» (наличие исполнительного слоя, слоя работы с базами знаний и формирования управляющих решений, а также слоя самообучения и адаптации) и «в целом» (в дополнение к слоям интеллектуальности «в большом» присутствует слой прогноза событий). Каждый слой интеллектуальности базируется на введенных в [3] пяти базовых принципах организации интеллектуальной управляющей структуры.

К системам, интеллектуальным «в малом», например, относятся нечеткие системы управления различного назначения [4 – 6]. Значительное число работ посвящено применению технологии многоагентных систем, обеспечивающих автономность поведения элементов СТС [7 – 8].

1. Рациональность, автономность и степень интеллектуальности

В [9] определены *признаки рационального поведения* сложных слабоформализуемых систем и введено понятие степени интеллектуальности, однако оценка производится на этапе проектирования системы (динамически, в процессе функционирования системы данные показатели не применимы). *Автономность поведения* присуща различным сложным системам, в частности в [10] введено понятие автономности по форме обеспечения: *информационная автономность*; автономность интеллектуальная (или *автономность управления*); *материально-техническая автономность*. Второй вид автономности обуславливает степень интеллектуальности системы, рассмотренной в работе [1]. Повышение автономности поведения влечет за собой повышение степени интеллектуальности системы и наоборот. Автономность по форме поведения включает в себя признаки рационального поведения, которые были рассмотрены в [9, 11]. Высокая степень неопределенности обусловила применение различных подходов, – например, когнитивного моделирования [12] – и привела к появлению нового подкласса сложных систем – *когнитивных технических систем* [13]. Рассмотренные работы выделяют подходы к повышению автономности на основе различных постулатов, но не вводят количественные метрические оценки в каком-либо виде.

При этом авторы, вводя понятие *автономность* для систем различного назначения, исходят из тех целей, которые ставят в своем исследовании [14], – например, для систем электроснабжения [15], компьютерных систем [16], роботов [17] и пр. Опыт, обобщенный в работе [18], позволил сформулировать определение *автономной системы* как системы, способной функционировать в реальной среде без внешнего управления достаточно продолжительное время. Таким образом, существенным является такой параметр как *время автономного функционирования системы* без внешнего вмешательства T_a . Наличие такого показателя является необходимым, но недостаточным, например, для оценки интеллектуальности СТС.

При этом значительная часть работ посвящена выделению различных уровней автономности, характеризующихся определенным набором признаков и свойств, позволяющих поместить конкретную систему на один из уровней автономности. В основном данные работы посвящены автономным робототехническим [19 – 21] и многоагентным [22 – 24] системам. Например, в [17] предлагается выделять четыре уровня автономности, такие что 0 – полностью не автономные системы, а 3 – полностью автономные. Данные уровни автономности соответствуют признакам рационального поведения, рассмотренным в [9, 11]. При этом остается открытым вопрос о количественной оценке, т.е. не просто отнесению системы к тому или иному уровню, а к построению метрики, на основании которой могут приниматься решения о повышении (понижении) автономности функционирования СТС в случае необходимости.

Указанный подход предполагает разработку шкалы оценки, соответствующей выделенным уровням автономности [25], разработку метрик, на основании которых рассчитываются числовые значения различных характеристик автоном-

ности. Это направление является актуальным, но проработано недостаточно.

В [26] предлагается определять *степень* (уровень) *интеллектуальности*, исходя из *вычислительной мощности устройства управления, сложности алгоритмов* (обработки сенсорной информации, генерации поведения, оценки состояния окружающей среды и пр.), а также *объема ретроспективной информации*, которой обладает система. Но учет актуальности информации, ее устаревания, а также наличие дополнительных алгоритмов (несущественных для решения конкретных задач, но имеющих в системе, что обусловлено опытом и квалификацией разработчиков) не приводится, что является существенным ограничением для применения данного подхода в различных ситуациях.

Попытки разработки различных метрик, позволяющих оценить степень автономности функционирования СТС, предпринимаются достаточно часто [7]. Оценка производится на основе взаимодействия системы с внешней средой с применением энтропийного подхода [27], заключающегося в максимизации самостоятельности постановки целей системой. Взаимодействие с внешней средой тесно связано с ограничениями, накладываемыми на систему в поведенческом смысле и дополняют их. Использование энтропии и вычисление меры на основе вероятностей ограничивает применимость данного подхода.

В [17] разработан программный инструмент для комплексной оценки автономности робототехнических систем на основе подхода, аккумулирующего автономность, обусловленную сложностью достижения локальной цели (цель, а также задачи, на которые она разбивается, представляются в табличной форме), сложностью внешней среды и независимостью системы от действий лица принимающего решения (ЛПР) – оператора. Итоговая оценка производится на основе взвешенных метрических баллов, которые исследователь вводит вручную, – например, для подзадачи второго уровня (элементарная задача работа «переместиться в позицию»):

$$A_{i,2} = (w_{PM} \cdot PM + w_{WM} \cdot WM) / 2,$$

где $A_{i,2}$ – показатель, характеризующий автономность подзадачи второго уровня; PM – оценка в баллах показателя «планирование» в контексте сложности задачи; w_{PM} – вес PM ; WM – оценка в баллах показателя «загруженности» человеко-машинного интерфейса; w_{WM} – вес WM .

Итоговый показатель формируемый из предпочтений оператора, является субъективным, а значит, оценка автономности системы только на основе балльных взвешенных метрик может привести к недостоверности полученных результатов.

В соответствии с [18] можно ввести показатель автономности функционирования PA :

$$PA = T_a / T, \tag{1}$$

где T_a – время автономного функционирования; T – общее время функционирования системы. Точность измерения T_a и T будет существенным образом сказываться на значении показателя автономности функционирования. Кроме того, PA не может применяться в качестве основного, а только дополняя другие показатели

автономности.

Для оценки *материально-технической автономности* применяются следующие метрики [28]: МТБФ (средняя наработка на отказ), МТТР (среднее время до восстановления работоспособности), надежность $MTBF/(MTTR+MTBF)$, выраженная в процентах. В [28] для коллективов роботов, которые являются сложными системами, предлагается использовать модифицированную с учетом выявленных недостатков комплексную метрическую оценку из [29] в форме (основное ограничение на применение данной метрики – поиск экспертов для оценки показателей, входящих в вычисление eff):

$$eff = k_1(f)^2 + k_2(p)^2, \quad (2)$$

где $f = m/n$ – оценка отказоустойчивости; m – число допустимых отказов подсистем; n – общее число подсистем; $p = (S + R + C)/3$ – оценка эффективность/стоимость; $S \in [0;1]$ – оценка производительности (скорости обнаружения неисправностей); $R \in [0;1]$ – оценка времени восстановления t ; $C \in [0;1]$ – оценка стоимости восстановления.

С учетом этого в [28] предложена мера оценки отказоустойчивости коллективов роботов в рамках материально-технической автономности:

$$P = \sum_{j:T_j \in X} u_j - \sum_{j:T_j \in y} (c_j \cdot q_j) \cdot \left(q_j - \sum_{i=1}^{q_j} \rho_j^i \right), \quad (3)$$

где u_j – полезность задачи T_j , выполненной роботом; c_j – стоимость не выполненных задач; q_j – общее число неудачных попыток выполнения задачи T_j ; ρ_j^i – мера устойчивости для i -й попытки решения j -й задачи.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что, несмотря на успехи, достигнутые в рамках оценки автономности и интеллектуальности сложных технических систем, имеются два существенных недостатка, а именно:

в работах, в которых вводится понятийный аппарат, приводится классификационное деление или распределение систем по уровням, отсутствуют количественные оценки автономности и/или интеллектуальности;

вторая часть работ посвящена разработке отдельных метрик (на основе расчета показателей сбоев, сложности алгоритмов, времени функционирования без вмешательства и пр.), которые применимы только на одном из этапов жизненного цикла СТС (проектирование или функционирование).

Таким образом, существует актуальная задача разработки совокупности метрических показателей, которые позволяют оценивать автономность и интеллектуальность на основе числовых показателей на всех этапах жизненного цикла сложных технических систем.

2. Разработка метрик автономности и интеллектуальности СТС

Рассмотрим СТС «снизу – вверх». Единичный элемент СТС $R_i, i = \overline{1, n}$, функционируя в составе системы $R = \{R_1, \dots, R_i, \dots, R_n\}$, обеспечивает достижение

конкретной локальной цели $I_j, j = \overline{1, m}$. Совокупность локальных целей $I = \{I_1, \dots, I_j, \dots, I_m\}$ всех элементов обеспечивает достижение глобальной цели системы G .

Упрощение 1. Для синтеза метрики достаточным является наличие *единственной достижимой* глобальной цели, характеризующейся оптимальным и единственным с точки зрения показателя «*эффективность/стоимость*» набором локальных целей [30].

Каждая локальная цель I_j может быть представлена конкретным набором типовых задач (например, для робота – это «движение вперед», «поворот», «останов» и пр.) $T^j = \{T_1^j, \dots, T_l^j, \dots, T_k^j\}, l = \overline{1, k}$, где k – общее число задач, решение которых обеспечивает достижение I_j .

Стоимость выполнения $c_l^j = t_l^j \cdot r_l^j$ l – задачи T_l^j определяется временем ее выполнения t_l^j и стоимостью затраченного ресурса r_l^j , приведенному к единице времени выполнения задачи. Правильность выполнения задачи обусловлена мерой $\|T_l^j; \hat{T}_l^j\| \leq \alpha$, т.е. если «расстояние» между текущим результатом выполнения задачи и требуемым входит в зону допустимых отклонений 2α , то задача считается выполненной, в противном случае увеличивается счетчик неудачных попыток выполнения задачи $cn_l^j = cn_l^j + 1$, а также увеличивается t_l^j на величину $\Delta\tau_l^j$. Тогда стоимость достижения локальной цели I_j может быть выражена как:

$$C_j = \sum_l \left((t_l^j + \Delta\tau_l^j) \cdot r_l^j \right) \quad (4)$$

и, соответственно, в целом для системы:

$$GC = \sum_j \sum_l \left((t_l^j + \Delta\tau_l^j) \cdot r_l^j \right). \quad (5)$$

Выражение (5) определяет стоимость достижения системой G . Условимся, что *требуемая эффективность достижения* G – это выполнение всех задач T_l^j для достижения всех целей I_j с первой попытки, т.е. $\forall T_l^j, cn_l^j = 1$. Обозначим эту величину NA , тогда $NA = l \cdot m$. Фактическая эффективность достижения G – это общее число попыток для всех задач каждой из цели, т.е. $na = \sum_j \sum_l cn_l^j$.

Тогда *показатель эффективности выполнения задач*:

$$GE = \frac{\sum_j \sum_l cn_l^j}{l \cdot m}. \quad (6)$$

Таким образом, увеличение числа неудачных попыток na выполнения T_l^j будет приводить к тому, что $GE \rightarrow \infty$. В терминах затрат достижение глобальной цели «в идеале» GC^* – выполнение всех задач каждой локальной цели с первой

попытки, тогда *комплексный показатель эффективности функционирования системы*:

$$CS' = GC^* - GC \cdot GE = \sum_j \sum_l (t_l^j \cdot r_l^j) - \sum_j \sum_l ((t_l^j + \Delta\tau_l^j) \cdot r_l^j) \cdot \frac{\sum_j \sum_l cn_l^j}{l \cdot m}. \quad (7)$$

Таким образом, отрицательное значение $CS' < 0$ свидетельствует, что функционирование системы происходит с увеличением затрат ресурса и/или отклонениями от достижения G по времени.

Время автономного функционирования системы TA' :

$$TA' = \sum_j \sum_l (t_l^j + \Delta\tau_l^j). \quad (8)$$

В случае, если какая-либо из задач не может быть выполнена, требуется внешнее воздействие и вмешательство оператора, что увеличивает время достижения глобальной цели G на величину $\Delta\hat{\tau}_l^j$ (время, в течение которого оператор осуществляет вмешательство или осуществляется переформулирование задачи и/или цели):

$$TA'' = \sum_j \sum_l (t_l^j + \Delta\tau_l^j + \Delta\hat{\tau}_l^j). \quad (9)$$

С учетом (1) *показатель автономности функционирования*:

$$PA = \frac{TA'}{TA''} = \frac{\sum_j \sum_l (t_l^j + \Delta\tau_l^j)}{\sum_j \sum_l (t_l^j + \Delta\tau_l^j + \Delta\hat{\tau}_l^j)}. \quad (10)$$

Метрики в форме (7) и (10) оперируют параметрами, характеризующими достижение элементами системы локальных целей, поэтому могут быть использованы $\forall m, n : m > 0, n > 0$. *Ограничением* на применение данных метрик является то, что они могут использоваться только в процессе функционирования для систем, элементам (подсистемам, компонентам) которых обеспечено распределение непротиворечивых и достижимых локальных целей.

На основании изложенного в [2] введем бинарные оценки наличия соответствующего *признака интеллектуальности (слоя)*, где 1 – показывает наличие признака, а 0 – его отсутствие; s_1 – исполнительный слой; s_2 – слой работы со знаниями и генерации решений; s_3 – слой самообучения и адаптации; s_4 – слой прогноза событий.

Тогда *показатель степени интеллектуальности системы*:

$$SI = 0.25 \cdot (s_1 + s_1s_2 + s_1s_2s_3 + s_1s_2s_3s_4). \quad (11)$$

Таким образом, в соответствии с [2] для систем *интеллектуальных в малом* $SI = 0.5$, для систем *интеллектуальных в большом* $SI = 0.75$, а для систем *интеллектуальных в целом* $SI = 1$. Исходя из (11), отсутствие любого из слоев, начиная со 2-го, приводит к тому, что система превращается в систему автоматического управления без признаков интеллектуальности, для которой $SI = 0.25$. Следова-

тельно, мы получаем дискретную шкалу $[sc]=[0,0.25,0.5,0.75,1]$ СТС по *типу интеллектуальности*. Использование метрики (11) возможно как на этапе проектирования, так и на этапе функционирования систем.

В связи с тем, что каждый из слоев характеризует достаточно большой объем функций, которые реализуются системой, можно утверждать: с точки зрения ранжирования систем по степени интеллектуальности – существуют промежуточные значения SI и шкала $[sc]$ содержит больше, чем пять точек. Каждый слой реализует определенный набор функций, соответствующий полной уверенности в том, что система обладает указанным слоем. Отсутствие ряда функций в системе на определенном слое свидетельствует, что значение $s_g < 1, g = \overline{1,4}$. Причем существует некоторый доверительный интервал α , для которого $s_g = 1$, а затем s_g начинает убывать, приближая систему к предыдущему слою. Это означает снижение уверенности в том, что система обладает данным слоем интеллектуальности. Наличие дополнительных функций (сверх необходимых на данном слое) означает полную уверенность, но не увеличивает при этом значение s_g . То есть появляется субъективность в оценке функциональности конкретного слоя. С учетом изложенного представим бинарный показатель s_g с помощью нечеткого числа \tilde{s}_g , формализующего степень неопределенности и субъективизм в оценке наличия конкретного слоя интеллектуальности. Для этого используем трапецевидное нечеткое число (рис. 1), являющееся нормализованным и наиболее достоверным классификатором неуверенности оценки [12].

Для задания трапецевидного числа \tilde{s}_g необходимо задать четверку $[a_g.b_g.c_g.d_g]$. Условимся, что центр симметрии \tilde{s}_g соответствует значению степени интеллектуальности системы для каждого конкретного слоя в соответствии с (11). Тогда нечеткие трапецевидные числа, соответствующие присутствию в системе определенного слоя, можно задать значениями: $a_g = si_g - \alpha_g - \beta_g$, $b_g = si_g - \alpha_g$, $c_g = si_g + \alpha_g$, $d_g = si_g + \alpha_g + \beta_g$, где $si_g = SI_g$ – значение степени интеллектуальности по шкале $[sc]$ для числа слоев, равное g ($si_1 = 0.25, si_2 = 0.5, si_3 = 0.75, si_4 = 1.0$); α_g – величина доверительного интервала полной уверенности; β_g – величина пессимистического интервала неуверенности. Значения α_g и β_g выбираются экспертом, проводящим оценивание.

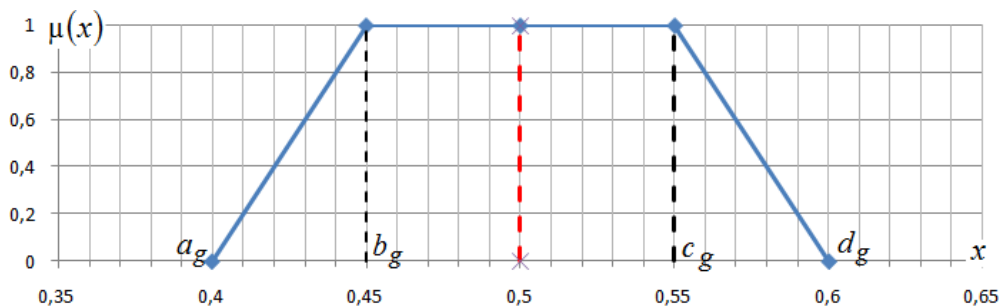


Рис. 1. Формализация s_2 нечетким числом \tilde{s}_2 .

Трапецевидные числа, описывающие усиление степени неуверенности \tilde{s}_g^L , будут располагаться левее \tilde{s}_g для каждого слоя. Расстояние, которое характеризует величину снижения уверенности, а значит и степень интеллектуальности для конкретного слоя и системы в целом, может быть найдено как разность между \tilde{s}_g и \tilde{s}_g^L : $\tilde{r}_g = \tilde{s}_g \setminus \tilde{s}_g^L$, где «\» – операция разности нечетких чисел. Величина показателя степени интеллектуальности будет выражена следующим образом: $si_g^* = 1 - def(\tilde{r}_g)$, где $def(.)$ – оператор приведения к четкости (дефаззификации). Тогда с учетом (11) нечеткий показатель степени интеллектуальности системы:

$$SI^* = 0.25 \sum_{g=1}^4 \left(\prod_{b=1}^g k_b \right) si_g^* . \quad (12)$$

В (12) присутствует произведение $\prod_{b=1}^g k_b$, смысл которого аналогичен умножению значений бинарных признаков наличия слоя в (11), а коэффициент 0.25 является нормировочным, приводящим значение SI^* к интервалу $[0;1]$. При этом k_b принимает значение 0 или 1.

Так как для получения числового значения показателя интеллектуальности системы по (12) применяется теория нечетких множеств, то итоговый результат будет зависеть от выбора параметров, участвующих в вычислении SI^* . Выбор четверки $[a_g, b_g, c_g, d_g]$ для каждого трапецевидного числа зависит от предпочтений исследователя, использующего метрику в форме (12). Поэтому проведем исследование влияния тех параметров вычисления SI^* на его итоговое значение, которые являются настроечными и будут одинаковыми для всех заданных \tilde{s}_g и \tilde{s}_g^L выбранных исследователем. Для этого в среде инженерных расчетов Matlab реализована соответствующая программа.

1. Дефаззификация \tilde{r}_g .

В Matlab реализованы пять методов приведения к четкости (табл. 1).

Таблица 1

Метод	Центр тяжести	Медиана	Центр максимумов	Наименьший из максимумов	Наибольший из максимумов
Значение	0.1028	0.09	0.035	0	0.07

С учетом изложенного подхода, выбор метода дефаззификации обусловлен близостью разницы между \tilde{s}_g и \tilde{s}_g^L к нулю. Зададим \tilde{s}_g четверкой $[0.1, 0.21, 0.29, 0.4]$ и найдем величину $\tilde{s}_g \setminus \tilde{s}_g^L$, затем получим значения четкого показателя разности для указанных методов из табл. 1.

На основании табл. 1 выбран метод «наименьший из максимумов», как обеспечивающий результат 0 при вычитании \tilde{s}_g^L самого из себя.

2. Шаг дискретизации базового множества x переменных \tilde{s}_g и \tilde{s}_g^L .

Базовое (универсальное множество) x задается интервалом $[0;1]$, получим значения si_g^* для Δx , отличающихся на порядок, для двух нечетких чисел, заданных как:

$$\tilde{s}_g : [0.1, 0.21, 0.29, 0.4] \quad \tilde{s}_g^L : [0.05, 0.12, 0.18, 0.3] \quad (\text{табл. 2}).$$

Таблица 2

Величина шага	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
Значение si_g^*	1	0.97	0.97	0.9698	0.97

В соответствии с табл. 2 в качестве настроечного параметра выбран шаг дискретизации базового множества $\Delta x = 10^{-4}$.

3. Расчетные примеры

Примеры расчетов по предложенным метрикам приведем для различных сценариев функционирования СТС.

Сценарий №1. Группа мобильных роботов представляет собой СТС. Пусть группе из трех роботов распределены три локальные цели (перемещение в заданную точку), глобальная цель – покрытие трех указанных точек (рис. 2.1). Пусть стоимость перемещения на 1 м дистанции равна 1 условной единице ресурса (у.е.р), поворот на 90° (за 1 с) затрачивает 0.25 у.е.р. Скорость перемещения робота равна 1 м/с, поворот производится за 1 с.

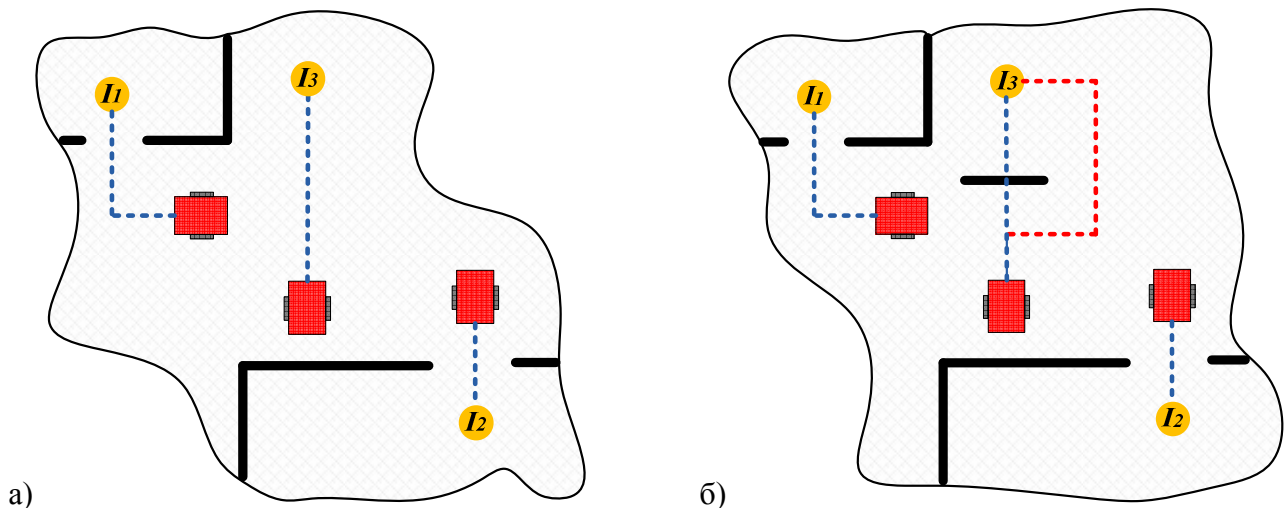


Рис. 2. Иллюстрация к сценарию №1:

а – достижение цели «в идеале»; б – реальное достижение цели.

Случай 1.1. Перемещение без препятствий.

Для случая, представленного на рис. 2а, набор задач для достижения локальных целей: I_1 – «перемещение вперед на 2 м., поворот на 90° , перемещение

вперед на 3.3 м»; I_2 – «перемещение вперед на 6 м»; I_3 – «перемещение вперед на 2.65 м».

Тогда $GE = \frac{3}{3} = 1$, $\Delta\tau_l^j = 0$, $GC^* = \frac{2}{1} \cdot 1 + 1 \cdot 0.25 + \frac{3.3}{1} \cdot 1 + \frac{6}{1} \cdot 1 + \frac{2.65}{1} \cdot 1$, $CS' = 0$, $GC = GC^* = 14.2$. В соответствии с (10) $PA = 1$.

Для мобильного робота присутствуют слои s_1 и s_2 , неопределенность при наличии функционала в слоях отсутствует, поэтому $SI = 0.25 \cdot (1 + 1 \cdot 1) = 0.5$, необходимость в расчете SI^* отсутствует.

Система относится к интеллектуальным «в малом».

Случай 1.2. Перемещение с препятствиями.

Для случая, представленного на рис. 2б, набор задач для достижения локальных целей: I_1 – «перемещение вперед на 2 м, поворот на 90° , перемещение вперед на 3.3 м»; I_2 – «перемещение вперед на 1.5 м, поворот на 90° , перемещение вперед на 3 м, поворот на 90° , перемещение вперед на 5 м, поворот на 90° , перемещение вперед на 2.35 м»; I_3 – «перемещение вперед на 2.65 м».

Тогда $GE = \frac{4}{3}$, $\Delta\tau_l^j \neq 0$ (осуществлялся объезд препятствия), $GC^* = 14.2$,

$GC_{I_2} = \left(\frac{1.5}{1} \cdot 1 + 1 \cdot 0.25 + \frac{3}{1} \cdot 1 + 1 \cdot 0.25 + \frac{5}{1} \cdot 1 + 1 \cdot 0.25 + \frac{2.35}{1} \cdot 1 \right) = 12.6$, $GC_{I_3} = \left(\frac{2.65}{1} \cdot 1 \right) = 2.65$,

$GC_{I_1} = \left(\frac{2}{1} \cdot 1 + 1 \cdot 0.25 + \frac{3.3}{1} \cdot 1 \right) = 5.55$, тогда $CS' = 14.2 - 5.55 - 12.6 - 2.65 = -6.6$. В соответствии с (10) $PA = 1$.

Расчет показателей SI и SI^* аналогичен случаю 1.1. Аналогично осуществляются расчеты показателей для любого числа роботов, обеспечивающих достижение любого числа локальных целей.

Сценарий №2. Сложная интеллектуальная (использующая методы искусственного интеллекта) система управления. В соответствии с [2] в системе управления присутствуют стратегический, тактический и приводной уровни, на каждом из которых могут присутствовать слои $s_1 - s_4$. Для удобства рассмотрим стратегический уровень, условившись, что аналогично может быть исследована интеллектуальность на каждом из уровней. Рассмотрим систему оптимального управления рыбохозяйственным производством [30], обладающую неопределенностью и относящуюся к слабоформализуемым системам.

Случай 2.1. Полная уверенность в наличии слоя интеллектуальности.

В СТС присутствуют слои: s_1 – полученные данные используются для повышения рыбопродуктивности за счет более эффективного кормления; s_2 – генерация управленческих решений; s_3 – адаптация за счет использования методов работы с текущими данными и их учета для управления и прогноза; s_4 – прогноз рыбопродуктивности с учетом текущих и ретроспективных данных. Тогда, в соответствии с (11) $SI = 1$, т.е. система является интеллектуальной «в целом».

Случай 2.2. Наличие неопределенности в реализации функций.

Рассматриваемая система оперирует формализованным опытом экспертов и эвристиками. Таким образом, в реализации ряда функций может появиться неопределенность, обусловленная указанными факторами. В системе в зависимости от текущей ситуации осуществляется выбор наиболее подходящего метода решения задачи (достижения цели). Следовательно, существует неопределенность, обусловленная субъективностью постановки ситуации некоторого метода решения, так как в системе управления для этих целей применяются эвристики. Оценка интеллектуальности системы на основе метрики (11) требует учета неуверенности в наличии требуемых функций в слое s_3 . Неуверенность экспертов формализуем нечеткими трапециевидными числами (рис. 3).

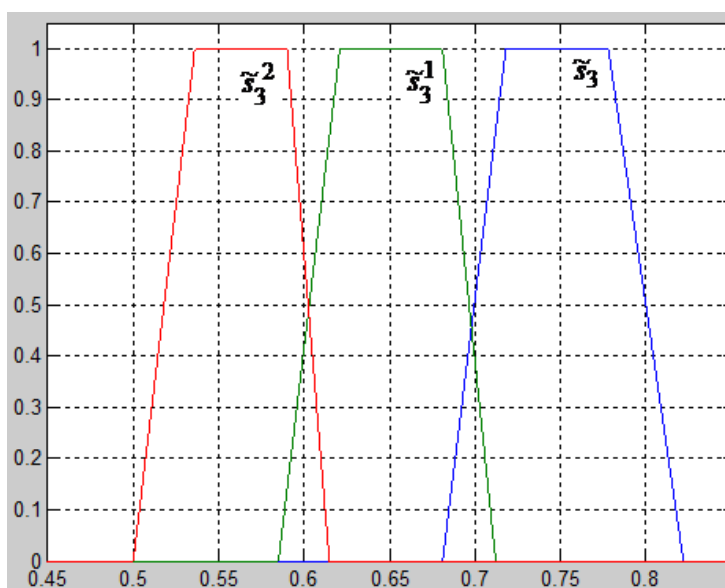


Рис. 3. Оценки для слоя s_3 .

Для слоя s_3 сформированы две пессимистичные оценки \tilde{s}_3^1 и \tilde{s}_3^2 . Тогда в соответствии с (12) нечеткий показатель степени интеллектуальности для \tilde{s}_3^1 будем рассчитывать следующим образом:

$$SI^* = 0.25(1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.9628 + 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1) = 0.9681.$$

Для пессимистичной оценки \tilde{s}_3^2 :

$$SI^* = 0.25(1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.8718 + 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1) = 0.9454.$$

4. Общие замечания по применению метрик

Замечание 1. Показатель GE применяется на этапе функционирования системы и рассчитывается для каждого элемента в отдельности, единичной подсистемы (статической структуры, выделенной на этапе проектирования) или единичной компоненты (динамической структуры, образуемой в процессе функционирования). Рассчитанные значения GE используются для оценки эффективности отдельного структурного элемента, эффективность всей СТС будет определяться

наименьшим значением GE для выделенной структуры (на основе подсистем или компонент). Следствием расчета GE может являться перечень организационно-технических мероприятий для повышения эффективности выполнения задач конкретным структурным образованием в системе.

Замечание 2. Комплексный показатель эффективности функционирования системы CS' , как и GE , применяется на этапе функционирования. Он позволяет оценивать отклонение функционирования СТС от некоторого целевого состояния. Величина CS' показывает, насколько эффективно расходуются ресурсы с учетом необходимости внешнего (внутреннего) вмешательства в систему.

Замечание 3. Показатель автономности функционирования PA определяет степень автономности системы (время, затрачиваемое на достижение глобальной цели), без внешнего (внутреннего) вмешательства в систему. Данный показатель применяется на этапе функционирования системы для расчета автономности элемента, подсистемы или компоненты. Автономность системы в целом будет определять автономность того структурного образования, которое имеет наименьшее значение PA .

Замечание 4. Показатель степени интеллектуальности системы SI может применяться как на этапе проектирования (с целью приведения системы к требуемому значению SI), так и на этапе функционирования (с целью обеспечения требуемого функционала присутствующих слоев интеллектуальности). Применение данной метрики ограничено тем, что у исследователя, который ее использует, присутствует полная уверенность в реализованном функционале каждого слоя интеллектуальности.

Замечание 5. Нечеткий показатель степени интеллектуальности SI^* применяется на всех этапах по аналогии с SI . Применение данной метрики позволяет учесть имеющуюся неопределенность, обусловленную реализованным функционалом слоя, но вместе с тем вносит дополнительный субъективизм в оценку степени интеллектуальности СТС.

Заключение

В работе получен комплекс метрических показателей, которые могут использоваться совместно, дополнять друг друга и являются достаточными для оценки автономности и интеллектуальности СТС как в процессе проектирования, так и в процессе функционирования. Синтезированные метрики могут применяться для отдельных элементов, подсистем, а также сложных технических систем в целом, таким образом обеспечивая охват все составляющих структуры системы.

Показатель GE характеризует структуру СТС, эффективность расходования ресурсов системы учитывается использованием показателя CS' . Кроме того, получены показатели, характеризующие степень интеллектуальности систем на основе наличия соответствующих слоев, присутствие неуверенности оценки функционала учитывается использованием нечеткого показателя SI^* .

Практическая значимость полученных метрик обусловлена возможностью их применения на различных этапах жизненного цикла СТС для оценки отдель-

ных структурных образований и системы в целом. На основе метрик существует возможность планирования организационно-технических мероприятий по повышению эффективности, автономности и интеллектуальности СТС.

Рассмотренные в работе примеры иллюстрируют применимость синтезированного комплекса метрических показателей для различных СТС при оценке их автономности и интеллектуальности на различных этапах жизненного цикла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Александрова Р.И. Развитие технологии интеллектуального управления для создания перспективных образцов ВВТ на базе новых средств комплексной автоматизации проектирования // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3. – С.7-14.
2. Лохин В.М., Захаров В.Н. Интеллектуальные системы управления: понятия, определения, принципы построения // Интеллектуальные системы автоматического управления / под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. – М.: Физматлит, 2001. – С. 25-38.
3. Захаров В.Н. Интеллектуальные системы управления. Основные понятия и определения // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 1997. – № 3. – С.138-145.
4. Немчинов Д.В., Проталинский О.М. Система принятия управленческих решений по снижению влияния субъективного фактора как причины аварийной ситуации // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: "Управление, вычислительная техника и информатика". – 2011. – № 2. – С.43-48.
5. Бобырь М.В., Титов В.С., Беломестная А.Л. Стабилизация теплового режима в процессе резания // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 6. – С.38-41.
6. Титов В.С., Бобырь М.В., Анциферов А.В. Алгоритм высокоскоростной обработки деталей на основе нечеткой логики // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 6. – С.21-26.
7. Hrabia C-E, Masuch N., Albayrak S. A Metrics Framework for Quantifying Autonomy in Complex Systems // Proc. in 13th German Conference, MATES 2015. – P.22-41.
8. Новиков Д.А. Рефлексия и устойчивость коллективного поведения в многоагентных системах. // Труды IX Международной Четаевской конф. «Аналитическая механика, устойчивость и управление движением». – 2007. – С.360-365.
9. Щербатов И.А., Проталинский О.М. Сложные слабоформализуемые многокомпонентные технические системы // Управление большими системами: сборник трудов. – 2013. – № 45. – С.30-46.
10. Ермолов И.Л. Повышение автономности мобильных роботов как важнейшее направление развития современной робототехники // Вестник МГТУ «Станкин». – 2010. – №2 (10). – С.121-127.
11. Elio R., Petrinjak A. Normative Communication Models for Agent // Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. – 2005. – № 11(3). – P.273–305.
12. Ажмухамедов И.М., Проталинский О.М. Методология моделирования слабоформализуемых социотехнических систем // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2014. – № 3. – С.85-91.
13. Beetz M., Buss M., Wollherr D. Cognitive Technical Systems-What Is the Role of Artificial Intelligence? // Proceeding in KI '07 Proc. of the 30th annual German conference on Advances in Artificial Intelligence. – 2007. – P.19-42.
14. Noorman M., Johnson D.G. Negotiating autonomy and responsibility in military robots // Ethics and Information Technology. – 2014. – Vol. 16, Iss.1. – P.51-62.
15. Standardizing the Classification of Intelligence Levels and Performance of Electricity Supply Chains. 2009. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nema.org/Policy/Energy/>

Smartgrid/Documents/Levels_of_Intelligence_White_Paper.pdf.

16. *Breitgand D., Henis E., Shehory O.* Automated and Adaptive Threshold Setting: Enabling Technology for Autonomy and Self-Management // Proceedings of the Second International Conference on Autonomic Computing (ICAC'05), 2005.
17. *Durst P.J., Gray W.* Levels of Autonomy and Autonomous System Performance Assessment for Intelligent Unmanned Systems. The US Army Engineer Research and Development Center. 2014. ERDC/GSL SR-14-1. URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a601656.pdf>.
18. *Bekey G.* Autonomous robots: From biological inspiration to implementation and control. – Cambridge, MA: MIT Press, 2005.
19. *Alami R., Chatila R., Fleury S., Ghallab M., Ingrand F.* An architecture for autonomy // International Journal of Robotics Research. – 1998. № – 17(4). – P.315-337. DOI: 10.1177/027836499801700402.
20. *Murphy R.* Introduction to AI Robotics. – Cambridge, MA: The MIT Press, 2000.
21. *Thrun S.* Toward a framework for human-robot interaction // Human-Computer Interaction. – 2004. – № 19(1-2). – P.9-24. DOI: 10.1207/s15327051hci1901&2_2.
22. *Franklin S., Graesser A.* Is it an agent, or just a program? A taxonomy for autonomous agents // Proceedings of the Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages, Intelligent. – 1996. – P.21-35. DOI: 10.1007/BFb0013570.
23. *Russell S. J., Norvig P.* Artificial intelligence: A modern approach (2nd ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, Inc, 2003.
24. *Wooldridge M., Jennings N.R.* Intelligent agents: Theory and practice // Knowledge Engineering Review. – 1995. – № 10. – P.115-152. DOI: 10.1017/S0269888900008122.
25. *Clough B.T.* Metrics, schmetrics: How the heck do you determine a UAV's autonomy anyway. Technical report. Wright-Patterson AFB, OH: Air Force Research Lab, 2002.
26. *Albus J.S.* Outline for a Theory of Intelligence // IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics. – 1991. – Vol. 21, № 3.
27. *Yavnai A.* Entropy-based criteria for intelligent autonomous systems // Proceeding in IEEE International Symposium on Intelligent Control. – 1991. – P.55-60.
28. *Kannan B., Parker L.E.* Fault-Tolerance Based Metrics for Evaluating System Performance in Multi-Robot Teams // Proceeding of Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop, 2006.
29. *Hamilton D., Walker I., Bennett J.* Fault tolerance versus performance metrics for robot systems // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. –1996. – P.3073-3080.
30. *Большаков А.А. и др.* Интеллектуальные системы управления организационно-техническими системами. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006.

Статья представлена к публикации членом редколлегии О.С. Амосовым.

E-mail:

Щербатов Иван Анатольевич – sherbatov2004@mail.ru.