

УДК 512

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ЭРГАТИЧЕСКИМ ЭЛЕМЕНТОМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ МЕТОДОМ ШОРТЛИФА–БЬЮКЕНЕНА

© С.В. Артемова¹, В.И. Павлов¹, А.А. Артемов, Д.Ю. Муромцев

Ключевые слова: условия неопределенности; принятие решений; эргатический элемент; мера доверия; фактор уверенности; метод Шортлифа–Бьюкенена.

Рассматривается пример применения метода Шортлифа–Бьюкенена для эрготехнических систем. Метод Шортлифа–Бьюкенена позволяет описать субъективную (экспертную) оценку вероятностной меры и обеспечивает возможность экспертной системе объединить свидетельства и принять правильное решение эргатическим элементом в условиях неопределенности.

Введение. Современный¹ этап развития общества и научно-технического прогресса характеризуется созданием крупномасштабных технических комплексов и социотехнических систем (атомных электростанций, трубопроводов, различных типов автоматизированных производств, военной техники), приводящих к усугублению социальных последствий функционирования потенциально опасных технологий в случае аварий и катастроф.

Функционирование сложных технических комплексов характеризуется их новыми системными свойствами: многообразием, нестабильностью, нелинейностью межсистемных взаимодействий, до конца не познанной физико-химической природой процессов функционирования, различными – вплоть до экстремальных – условиями внешней среды, возможностью организованного информационного противодействия.

В настоящее время создан ряд концепций автоматизации и инженерно-психологического проектирования систем «человек – машина», адаптации человека и техники, взаимодействия оператора с системами управления и средствами отображения информации. Одним из ключевых элементов таких систем является эргатический элемент (ЭЭ).

Под эргатическим элементом (ЭЭ) понимается субъект труда с конкретной функцией и необходимым для ее выполнения эргономическим обеспечением, т. е. совокупностью алгоритмических и информационных средств, обеспечивающих взаимодействие субъектов труда между собой, а также с орудиями труда и предметами труда [1]. Под эрготехнической системой (ЭТС) имеется в виду класс гуманистических систем «человек – техника», состоящих из совокупности эргатических и неэргатических элементов, объединенных в единый целенаправленный процесс функционирования, имеющий конечной целью получение конкретного продукта труда с заданным качеством [2].

Одним из важных показателей эффективного функционирования ЭТС является обеспечение поддержки

принятия решений эргатическим элементом в стрессовых ситуациях при работе в условиях неопределенности.

Известны такие методы принятия решений, как:

- метод динамической альтернативности, основанный на принципе динамической вариантности;
- метод принятия решений с использованием байесовского подхода и экспертных оценок;
- метод Шортлифа–Бьюкенена и др., имеющие свои достоинства и недостатки применения при создании ЭТС.

Метод динамической альтернативности дает возможность нахождения оптимального варианта по заданным критериям исследуемой системы, при котором решение задачи сеанса экспертизы состоит в выборе из множества вариантов одного для практического использования. Этот метод можно использовать для уменьшения неопределенности при проектировании самих эрготехнических систем, но он не пригоден для поддержки принятия решений в условиях неопределенности самим ЭЭ в стрессовой ситуации.

Принятие решений с использованием байесовского подхода и экспертных оценок требует знаний безусловных и условных вероятностей ситуаций, с которыми может столкнуться ЭЭ, и для оценки которых необходимы статистические данные. При этом встречаются следующие трудности: большая трудоемкость получения репрезентативной выборки, особенно в случае многомерных распределений; необходимость принятия решений в условиях редко повторяющихся ситуаций, наблюдение за которыми требует длительного времени; изменение во времени характера распределений и взаимосвязи между имеющимися данными и возникающими ситуациями и др. [3].

Преимущество метода Шортлифа–Бьюкенена обусловлено следующими имеющимися особенностями [3]:

- возможностью использования фундаментальных знаний и теоретических закономерностей;
- возможностью применения опытного знания при рассмотрении разных классов проблемных ситуа-

¹ Автор частично поддержано грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 12-08-00352-а.

ций, для которых нет достаточного статистического материала;

- легкостью модификации алгоритма решения и отсутствием необходимости строить заранее структурированное дерево решений в связи с тем, что продукционные правила могут не иметь явной связи одно с другим;

- отсутствием необходимости анализа сложных взаимосвязей с другими частями системы исходных данных и промежуточных результатов при изменении правил и добавлении новых;

- облегчением поиска потенциальных конфликтов и несовместимостей в базе знаний;

- использованием простых механизмов объяснений вычислительного процесса;

- возможностью информировать пользователей только о той части процесса решения, которая им необходима.

В классической теории вероятностей сумма вероятностей события и его отрицания всегда равна единице. Однако нередки ситуации, при которых эксперт, оценив некоторым значением вероятность события как истинное, должен учитывать, что оно может оказаться и ложным. Зачастую при написании логических правил мера доверия (или уверенности) – это неформальная оценка, которую человек-эксперт добавляет к заключению, например: «вероятно, это так» или «это совершенно невероятно».

Математическое описание метода Шортлифа–Бьюкенена. Стэнфордская теория фактора уверенности, выраженная в методе Шортлифа–Бьюкенена, вводит некоторые простые заключения о мере доверия различных гипотез и предлагает правила для объединения свидетельств при выводе заключений, что приводит к замене строгого понятия вероятности некоторыми доступными экспертными оценками. В случае, когда знания проистекают от эксперта, условные вероятности и их сложные взаимосвязи не обязательно собирать исчерпывающим образом. Вместо этого могут собираться и обрабатываться мнения, которые можно интерпретировать как вероятности. Материал этого пункта взят в основном из работ [3], [4].

Для каждого варианта вводится мера доверия и недоверия:

- мера (*measure*) уверенности или доверия (*believe*) MB в соответствии с равенством $MB[H/x] = \alpha$ означает, что степень или мера доверия в некоторой гипотезе H , основанная на свидетельстве x , есть α ;

- мера недоверия или недостоверности (*distrust*) MD или $MD[H/x] = \beta$ означает, что степень или мера недоверия в гипотезе H , основанная на свидетельстве x , есть β .

Значения MB и MD , как и вероятности, всегда должны находиться в интервале $[0, 1]$. Экспертные оценки или свидетельства могут выступать и как наблюдаемые, и как гипотезы. Например, $MB[H_1/H_2]$ есть мера увеличения уверенности в гипотезе H_1 при условии, что гипотеза H_2 является истинной.

Свидетельство x может выступать либо в пользу, либо против гипотезы H , поэтому

$$MB[H/x] > 0, \text{ если } MD[H/x] = 0; \quad (1)$$

$$MD[H/x] > 0, \text{ если } MB[H/x] = 0. \quad (2)$$

Если гипотеза H не зависит от свидетельства x , т. е. условная вероятность $P(H/x)$ равна безусловной вероятности $P(H)$, то

$$MB[H/x] = MD[H/x]. \quad (3)$$

Определение MB и MD производится с использованием соотношений:

$$MB[H/x] = \begin{cases} 1, & \text{если } P(H)=1, \\ \frac{\max\{P(H/x), P(H)\} - P(H)}{1 - P(H)}, & \text{если } P(H) < 1, \end{cases} \quad (4)$$

$$MD[H/x] = \begin{cases} 1, & \text{если } P(H)=0, \\ \frac{\min\{P(H/x), P(H)\} - P(H)}{-P(H)}, & \text{если } P(H) > 0, \end{cases} \quad (5)$$

где $P(H)$ – безусловная вероятность гипотезы H ; $P(H/x)$ – условная вероятность H при свидетельстве x .

Вероятность $P(H)$ отражает уверенность эксперта в гипотезе H в любой момент времени, а $1 - P(H)$ – оценка неуверенности эксперта в истинности H . Если $P(H/x) > P(H)$, то x увеличивает уверенность эксперта в H (гипотеза H и свидетельство x находятся в отношении *вероятностно-статистического согласия*, см. [5]). Если $P(H/x) < P(H)$, то x уменьшает уверенность в гипотезе H и увеличивает неуверенность в истинности H (гипотеза H и свидетельство x находятся в отношении *вероятностно-статистического конфликта*, [5]).

При $0 < P(H) < 1$ для расчета MB и MD обычно используют более удобные формулы:

$$MB[H/x] = \begin{cases} \frac{P(H/x) - P(H)}{1 - P(H)}, & \text{если } P(H/x) > P(H), \\ 0, & \text{если } P(H/x) \leq P(H), \end{cases} \quad (6)$$

$$MD[H/x] = \begin{cases} \frac{P(H) - P(H/x)}{P(H)}, & \text{если } P(H/x) < P(H), \\ 0, & \text{если } P(H/x) \geq P(H). \end{cases} \quad (7)$$

В случае упорядоченного наблюдения двух свидетельств сначала x_1 и затем x_2 расчет MB и MD производится по формулам:

$$MB[H/x_1 \wedge x_2] = \begin{cases} 0, & MD[H/x_1 \wedge x_2] = 1, \\ MB[H/x_1] + MB[H/x_2](1 - MB[H/x_1]), & MD[H/x_1 \wedge x_2] \neq 1, \end{cases} \quad (8)$$

$$MD[H/x_1 \wedge x_2] = \begin{cases} 0, & MB[H/x_1 \wedge x_2] = 1, \\ MD[H/x_1] + MD[H/x_2](1 - MD[H/x_1]), & MB[H/x_1 \wedge x_2] \neq 1. \end{cases} \quad (9)$$

В случае двух гипотез H_1, H_2 для вычисления мер доверия и недоверия можно использовать формулы, также дающие приближенные значения:

$$MB[H_1 \wedge H_2/x] = \min\{MB[H_1/x], MB[H_2/x]\}; \quad (10)$$

$$MD[H_1 \wedge H_2/x] = \max\{MD[H_1/x], MD[H_2/x]\}; \quad (11)$$

$$MB[H_1 \vee H_2/x] = \max\{MB[H_1/x], MB[H_2/x]\}; \quad (12)$$

$$MD[H_1 \vee H_2/x] = \min\{MD[H_1/x], MD[H_2/x]\}. \quad (13)$$

Наряду с мерами MB и MD в методе Шортлифа–Бьюкенена используется также коэффициент или фактор уверенности CF (*certainty factor*), вычисляемый по формуле:

$$CF[H/x] = MB[H/x] - MD[H/x], \quad (14)$$

причем, $CF[H/x] \in [-1; 1]$.

Используя определения (4) и (5) или формулы (6), (7), получим при $0 < P(H) < 1$ следующую формулу для фактора уверенности CF:

$$CF[H/x] = \begin{cases} \frac{P(H/x) - P(H)}{1 - P(H)}, & \text{если } P(H/x) \geq P(H), \\ \frac{P(H/x) - P(H)}{P(H)}, & \text{если } P(H/x) < P(H). \end{cases} \quad (15)$$

С приближением фактора уверенности к 1 усиливается доверие к гипотезе, а с приближением его к -1 – ее отрицание. Близость значения коэффициента CF к 0 означает, что доказательства в пользу гипотезы и против нее сбалансированы либо их слишком мало.

При формировании базы правил, эксперты сопоставляют каждое правило с фактором CF, который отражает их уверенность в надежности правила. Меры уверенности позволяют регулировать производительность системы.

Предпосылка каждого правила состоит из ряда фактов, связанных операциями конъюнкции и дизъюнкции. При использовании продукционного правила учитываются факторы доверия, связанные с каждым условием предпосылки, следующим образом. Для предпосылок P_1 и P_2 имеем

$$CF(P_1 \wedge P_2) = \min(CF(P_1), CF(P_2))$$

и

$$CF(P_1 \vee P_2) = \max(CF(P_1), CF(P_2)).$$

Пример применения метода Шортлифа–Бьюкенена в эрготехнической системе. Примером сложных ЭТС являются радиолокационные станции (РЛС), ко-

торые широко применяются для наблюдения за различными объектами, при этом решаются задачи обнаружения, распознавания, определения местоположения, скорости и направления движения. Наряду с этим могут решаться задачи управления наблюдаемыми объектами (в транспортных системах) или их поражения (в системах вооруженной борьбы с воздушным, морским или наземным противником) (см., например, [6]). В качестве ЭЭ рассматривается, например, специалист группы руководства полетами в системе управления воздушным движением (УВД), в т. ч. оператор РЛС, призванный обеспечить быстрое и безошибочное решение названных задач, в т. ч. и в условиях неопределенности.

Условия неопределенности возникают по ряду причин, к которым можно отнести: ухудшение внешней обстановки (погодные условия); характеристики точности, надежности, загруженности средств связи, навигации и УВД; противодействие третьих лиц в виде действующих маскирующих или имитирующих помех и т. д. Функционирование ЭЭ в условиях неопределенности приравнивается к экстремальным ситуациям. В подобных условиях ЭЭ нуждается в информационной поддержке, которую предлагается осуществлять посредством системы поддержки принятия решений (СППР). С целью повышения эффективности функционирования ЭТС УВД в СППР предлагается использовать метод Шортлифа–Бьюкенена.

Рассмотрим следующий пример. Пусть имеется совокупность из двух летательных аппаратов (ЛА), идущих на посадку. Пусть ухудшаются внешние погодные условия. Задача, стоящая перед ЭЭ, заключается в принятии решения о порядке посадки ЛА. Условимся учитывать следующие факторы для каждого аппарата: x_1 – запас топлива, приближающийся к критическому; x_2 – противоречивость информации на мониторе диспетчера из-за действия помех; x_3 – критические перерывы информации; x_4 – размеры области безопасности вокруг каждого ЛА [6]; x_5 – уровень подготовки экипажей ЛА; x_6 – соблюдение расписания посадки. Рассматриваются два альтернативных варианта: H_1 – посадить первый ЛА, H_2 – посадить второй ЛА.

Сформулированы следующие процедурные правила.

П₁: «Если в варианте H_j запас топлива приближается к критическому, или на мониторе диспетчера имеется противоречивая информация из-за действия помех, то вариант H_j будет принят».

П₂: «Если для варианта H_j характерны критические перерывы информации, и размеры области безопасности вокруг ЛА находятся на заданном уровне, то вариант H_j будет принят».

П₃: «Если вариант H_j учитывает необходимый уровень подготовки экипажей ЛА и обеспечивает соблюдение расписания посадки, то вариант H_j будет принят».

Полученные от экспертов усредненные вероятности $\tilde{P}(H_j/x_i)$ принятия варианта H_j на основании данных x_i и результаты расчета $MB[H_j/x_i]$, $MD[H_j/x_i]$, $CF[H_j/x_i]$ для безусловной вероятности $P(H_j) = 0,5$ представлены в табл. 1. Здесь значе-

ния $MB[H_j/x_i]$, $MD[H_j/x_i]$, $CF[H_j/x_i]$ были вычислены по формулам (6), (7), (13).

Таблица 1

Расчет мер доверия и недоверия, фактора уверенности для примера эрготехнической системы

x_i	H_1				H_2			
	$\tilde{P}(H_1/x_i)$	$MB[H_1/x_i]$	$MD[H_1/x_i]$	$CF[H_1/x_i]$	$\tilde{P}(H_2/x_i)$	$MB[H_2/x_i]$	$MD[H_2/x_i]$	$CF[H_2/x_i]$
x_1	0,6	0,2	0	0,2	0,8	0,6	0	0,6
x_2	0,7	0,4	0	0,4	0,9	0,8	0	0,8
x_3	0,5	0	0	0	0,6	0,2	0	0,2
x_4	0,2	0	0,6	-0,6	0,6	0,2	0	0,2
x_5	0,6	0,2	0	0,2	0,6	0,2	0	0,2
x_6	0,7	0,4	0	0,4	0,2	0	0,6	-0,6

Таблица 2

Меры доверия и недоверия, фактор уверенности для сложных гипотез, соответствующих правилам Π_1 – Π_3

Новая переменная	Правило	H_1			H_2		
		MB	MD	CF	MB	MD	CF
y_1	$\Pi_1 (x_1 \vee x_2)$	0,4	0	0,4	0,8	0	0,8
y_2	$\Pi_2 (x_3 \wedge x_4)$	0	0,6	-0,6	0,2	0	0,2
y_3	$\Pi_3 (x_5 \wedge x_6)$	0,2	0	0,2	0	0,6	-0,6

Таблица 3

Последовательный расчет мер доверия и недоверия, фактора уверенности по всем продукционным правилам

Сложные гипотезы	H_1			H_2		
	MB	MD	CF	MB	MD	CF
$[H_j/y_1 \wedge y_2]$	0,4	0,6	-0,2	0,84	0	0,84
$[H_j/y_1 \wedge y_2 \wedge y_3]$	0,52	0,6	-0,08	0,84	0,6	0,24

Используя соотношений (10)–(13), вычислим значения MB, MD, CF для сложных гипотез, соответствующих сформулированным правилам. Результаты расчета приведены в табл. 2.

С помощью формул (8)–(9) метода Шортлифа–Бьюкенена производится последовательный расчет значений MB и MD по всем трем продукционным правилам:

$$\begin{aligned}
 MB[H_j/y_1 \wedge y_2 \wedge y_3] &= MB[H_j/y_1 \wedge y_2] + \\
 &+ MB[H_j/y_3](1 - MB[H_j/y_1 \wedge y_2]); \\
 MD[H_j/y_1 \wedge y_2 \wedge y_3] &= MD[H_j/y_1 \wedge y_2] + \\
 &+ MD[H_j/y_3](1 - MD[H_j/y_1 \wedge y_2])
 \end{aligned}$$

Результаты применения метода Шортлифа–Бьюкенена представлены в табл. 3.

Проанализировав табл. 3, получим

$$MB[H_2/y_1 \wedge y_2 \wedge y_3] =$$

$$= 0,84 > MB[H_1/y_1 \wedge y_2 \wedge y_3] = 0,52$$

и

$$\begin{aligned}
 CF[H_2/y_1 \wedge y_2 \wedge y_3] &= \\
 &= 0,24 > CF[H_1/y_1 \wedge y_2 \wedge y_3] = -0,08.
 \end{aligned}$$

На основании этого можно сделать вывод, что при использовании указанных значений $\tilde{P}(H_j/x_i)$ предпочтительнее вариант решения H_2 .

Заключение. Несмотря на то, что значение меры доверия не так строго обосновано, как в теории вероятностей, метод Шортлифа–Бьюкенена позволяет описать субъективную (экспертную) оценку вероятностной меры, что обеспечивает необходимый компромисс, позволяющий экспертной системе объединить свидетельства по мере решения задачи. Таким образом, метод Шортлифа–Бьюкенена может быть использован

при создании базы знаний [7] СППР при принятии решений ЭЭ в условиях неопределенности.

- тентообладатель Тамбовское ВВАИУ; заявл. 12.05.2003 г.; зарегистрировано в Гос. реестре изобретений РФ 24.10.2004 г., Бюл. № 7.
7. *Артемова С.В., Грибков А.Н.* База знаний оптимальной информационно-управляющей системы сушильной установки // Программные продукты и системы. 2012. № 1. С. 61-64.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев В.В., Корыстин С.Н., Малышев В.А., Сысоев В.В.* Моделирование информационного воздействия на эргатический элемент в эрготехнических системах. М.: Изд-во «Стенсвил», 2003. 200 с.
2. *Ушаков И.А.* Вероятностные модели надежности информационно-вычислительных систем. М.: Радио и связь, 1991. 132 с.
3. *Романов В.П.* Интеллектуальные информационные системы в экономике: учебное пособие / под ред. Н.П. Тихомирова. М.: Изд-во «Экзамен», 2003. 496 с.
4. *Люггер Дж.Ф.* Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем: пер. с англ. 4-е изд. М.: Издат. дом «Вильямс», 2005. 864 с.
5. *Артемов А.А.* Вероятностно-статистический конфликт и вероятностно-статистическое согласие // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2001. Т. 6. Вып. 2. С. 155-161.
6. *Драчев В.О., Павлов В.И.* Способ управления воздушным движением летательных аппаратов. Патент № 2239219 / заявитель и па-

Поступила в редакцию 25 апреля 2013 г.

Artemova S.V., Pavlov V.I., Artemov A.A., Muromtsev D.Y.
DECISION SUPPORT BY ERGATIC ELEMENT IN
UNCERTAINTY CONDITIONS BY SHORTLIFFE-
BUCHANAN METHOD

An example of Shortliffe–Buchanan method for ergo-technical systems is considered. Method of Shortliffe–Buchanan allows describing a subjective (expert) evaluation of the probability measure and provides the opportunity to combine evidence of the expert system and make the right decision ergatic element in conditions of uncertainty.

Key words: conditions of uncertainty; decision-making; ergatic element; measure of confidence; confidence factor, Shortliffe–Buchanan method.