

Программное обеспечение вычислительных, телекоммуникационных и управляющих систем

DOI: 10.5862/JCSTCS.236.5

УДК 004.89 +004.94

А.И. Титов, А.Д. Хомоненко

ВЫБОР ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА ТАКАГИ-СУГЕНО НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ

A.I. Titov, A.D. Khomonenko

SOFTWARE SELECTION BY USING THE TAKAGI-SUGENO ALGORITHM ON THE EXAMPLE OF PROJECT MANAGEMENT SYSTEMS

Проведен анализ современных подходов к выбору программного обеспечения. Обоснована целесообразность применения алгоритма нечеткого вывода Такаги-Сугено для выбора программного обеспечения. Рассмотрен вариант модификации алгоритма, используемый для выбора программного обеспечения систем управления проектами (СУП). Предложена база правил для применяемого алгоритма нечеткого вывода. Приведен численный пример сравнения систем управления проектами Spider Project и Oracle Primavera

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ; ВЫБОР ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ; НЕЧЕТКИЙ ВЫВОД; АЛГОРИТМ ТАКАГИ-СУГЕНО; СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ.

This article analyzes the current approaches to selecting software and the expediency of applying the algorithm of fuzzy Takagi-Sugeno output for software selection. The main stages of fuzzy inference using the Takagi-Sugeno algorithm have been described, along with a variant modification of the algorithm used to select the software project management systems (PMS). A rule base for the fuzzy inference algorithm using fuzzy membership function for all key indicators has been established, with numerical examples of comparison provided (Spider Project and Oracle Primavera project management systems). In addition, this article describes the main characteristics of the indicators of project management systems and selected indicators for evaluation experts.

DECISION THEORY; SOFTWARE SELECTION; FUZZY LOGIC; TAKAGI-SUGENO ALGORITHM; PROJECT MANAGEMENT SYSTEM.

При разработке и использовании информационных систем важную роль играет правильный выбор программного обеспечения, такого как системы управления проектами, системы программирования, системы управления базами данных и др. При этом используются различные подходы к принятию решения по выбору программного обеспечения. В настоящее время это направление интенсивно развивается, но пока не найдено исчерпывающее решение.

Например, для систем управления проектами (СУП) крайне важны вопросы ин-

теграции с другими системами. Для проектов в сфере информационных технологий важна интеграция с системами управления версиями кода. Также часто возникает необходимость интеграции СУП с системами автоматизации бухгалтерского учета, причем сценарии подобной интеграции могут сильно различаться. Влияние на требования к интеграции оказывают многие факторы: сфера деятельности компании, совокупность используемых программных средств, объем данных.

Выбор программного обеспечения (ПО)

часто осложняется тем, что в каждой конкретной задаче сравнения необходимо выбрать показатели и указать, насколько они значимы в данной ситуации.

Выбор может проводиться как на основе оценок одного эксперта, так и на основе согласования оценок группы экспертов.

Групповое обсуждение специалистами компании может ускорить принятие решения, однако это трудоемкий процесс, и присутствие всех специалистов на общем обсуждении не всегда возможно. Кроме того, при организации группового обсуждения можно столкнуться с тем, что мнение одного эксперта или группы экспертов сильно отличается от мнения большинства.

Во многих случаях более продуктивным и менее трудоемким является процесс проведения сравнений методом индивидуального анкетирования. При этом необходимо предусмотреть вычисление и согласование общей оценки на основе полученных от специалистов данных.

При оценке большого числа вариантов ПО не все специалисты могут иметь компетенции по каждому варианту. В условиях недостаточной уверенности в оценке показателя большинство специалистов склоняется к усредненным оценкам, что может помешать выбрать оптимальное по качеству решение. В такой ситуации следует предусмотреть возможность обработки оценок по определенному сценарию, например, повышению значимости оценок с наиболее высокой или низкой оценкой.

Таким образом, метод сравнения ПО должен удовлетворять следующим требованиям:

- независимость методики расчета от количества и состава показателей;
- корректная обработка субъективных оценок экспертов;
- возможность использования весов показателей;
- возможность использования дополнительного параметра расчета для определения веса оценки эксперта;
- высокая наглядность и умеренная трудоемкость вычислений.

Среди существующих методов выбора наибольший интерес представляют мето-

ды принятия решения (парных сравнений Саати, продукционные системы с четкими правилами, алгоритмы нечеткого вывода, и др.) [1–3]. В настоящей статье с учетом отмеченных соображений выполняется обоснование использования алгоритма нечеткого вывода Такаги-Сугено [4, 5] для решения задач выбора программного обеспечения. Предлагается вариант модификации названного алгоритма, состоящий в учете весов показателей важности сравниваемых программных продуктов. С его помощью проводится сравнение систем управления проектами.

Характеристика подходов к выбору программного обеспечения

Задачи выбора ПО рассматривались в относительно небольшом количестве работ. В частности, в статье [6] дан сравнительный анализ программного инструментария для анализа и оценки рисков информационной безопасности, проведенной на уровне (есть/нет). В [7] предложен визуальный подход к сравнительной оценке математических пакетов (MathLab, Scientific WorkPlace, Maple и Mathcad) по ряду показателей, представленных в виде лучевых диаграмм. В докладе [8] на основе названного подхода предложен метод выбора программного обеспечения систем управления версиями. Указанные подходы обладают невысокой точностью при сравнении программных продуктов.

В диссертационной работе А.В. Ахаева [9] применительно к модулям программной системы 1С бухгалтерия исследованы вопросы выбора программных продуктов на основе онтологий, нечеткой меры и интеграла Шоке. Отмеченный подход обеспечивает получение более точных интегральных оценок сравниваемых программных продуктов, но характеризуется высокой трудоемкостью вычислений.

В работе [10] проведен выбор пакета программного обеспечения для имитационного моделирования с помощью нечеткого метода анализа иерархий. В [11] метод анализа иерархий предложено использовать для выбора одной из двух систем ERP (Enterprise Resource Planning). В статье

[12] на основе методологии анализа среды функционирования решена задача выбора программного обеспечения системы маршрутизации. При этом выполнено описание характеристик программных продуктов в ранговых шкалах.

В настоящее время разработано большое число методов принятия решения при нескольких критериях. Наиболее широкое применение получили интерактивные методы. Методы этого класса включают совокупность итераций, каждая из которых включает в себя этап анализа. Среди интерактивных методов решения многокритериальных задач перспективными являются методы, основанные на оценках решений. Интерактивные методы можно разделить на две группы: основанные на оценках функции предпочтений и основанные на парном сравнении решений (в частности, метод анализа иерархий Т. Саати).

Применительно к задаче выбора ПО использование метода анализа иерархий [3] имеет ряд существенных недостатков, в том числе необходимость построения большого числа матриц парных сравнений. Кроме того, метод позволяет получить жесткие оценки альтернатив и не допускает возможности принятия решения при нечетких данных. В работе [13] предложено обобщение метода анализа иерархий для принятия решения при неточных сравнениях с использованием теории Демпстера–Шейфера [14], позволяющее обрабатывать неполные и неточные предпочтения.

Несмотря на полученные результаты, указанные подходы к обоснованию выбора ПО, на наш взгляд, нуждаются в дальнейшем совершенствовании в направлении учета нечеткости данных показателей сравниваемых продуктов, снижения трудоемкости вычислений и повышения наглядности решений.

Характеристика показателей систем управления проектами

При разработке программных проектов в области информационных технологий важную роль играет правильный выбор СУП. Систематическое рассмотрение систем управления программными проектами,

решаемых задач и принципов построения содержится в [15, 16].

К системам управления проектами предъявляется большое количество требований, которые могут сильно различаться в зависимости от объема проекта, выбранной методологии и многого другого. При сравнении систем управления проектами (см. сайт www.capterra.com) выделяют следующие функциональные возможности:

- 1) управление бюджетом (Budget Management);
- 2) трассировка ошибок (Bug Tracking);
- 3) сотрудничество (Collaboration);
- 4) интеграция электронной почты (Email Integration);
- 5) общий доступ к файлам (File Sharing);
- 6) диаграммы Ганта (Gantt Charts);
- 7) целевое управление (Idea Management);
- 8) управление выпусками (Issue Management);
- 9) отслеживание этапов (Milestone Tracking);
- 10) отслеживание процента завершений (Percent-Complete Tracking);
- 11) управление портфелем (Portfolio Management);
- 12) планирование проекта (Project Planning);
- 13) управление требованиями (Requirements Management);
- 14) управление ресурсами (Resource Management);
- 15) отслеживание состояния (Status Tracking);
- 16) управление задачами (Task Management);
- 17) тестирование / управления качеством (Testing / QA Management);
- 18) отслеживание времени и расходов (Time & Expense Tracking).

Более обобщенно можно сказать, что современные системы управления проектами должны включать в себя приложения для решения следующих задач: планирования задач; составления расписания; управления бюджетом; распределения ресурсов; общения между участниками проекта; документирования.

Как видим, выбор системы управления проектами основывается на большом количестве показателей, которые могут основываться на важнейших параметрах системы, например, таких как поддержка мобильных платформ, возможность интеграции со сторонними системами и др. Кроме того, здесь могут учитываться субъективные оценки экспертов, например, стоимость внедрения, быстрота обучения и т. д.

Итоговая стоимость ПО основывается на различных факторах, таких как:

- модель использования;
- количество необходимых лицензий;
- комплект поставки.

Оценка эксперта по этим факторам может существенно различаться в зависимости от потребностей проектной команды и существующих условий. Например, если внутренняя инфраструктура компании не позволяет развернуть ПО и возникает потребность в облачной модели использования, то предпочтения эксперта будут отданы варианту с более высокой ценой за одну лицензию, но с нужной моделью использования. Оценивание функциональности может включать еще большее число факторов, с еще большим количеством внешних условий. Поэтому для сравнения подходов к оценке все факторы, наиболее влияющие на оценку эксперта, были разделены на несколько основных групп показателей. Каждая группа показателей может получить оценку либо по сумме оценок всех показателей, либо как субъективную общую оценку по всей группе. Полученные группы показателей представлены в табл. 1.

На практике, кроме этих показателей,

выбор системы управления проектами может основываться на других показателях, например, информации о поставщике решения. В этом случае требуется анализ по критериям, учитывающим следующие показатели:

- устойчивость компании на рынке;
- уровень продаж;
- качество технической поддержки;
- быстрота и качество поставки продукта.

Поскольку целью настоящей статьи является получение методики сравнения именно конечных продуктов, то при сравнении СУП нами не учитываются показатели, задаваемые поставщиками программных систем управления проектами.

По данным сайта www.capterra.com, в число наиболее популярных СУП входят следующие системы: MS Project, Atlassian, Wrike, Podio, Basecamp, Teamwork и др. При этом отбор наиболее популярных программ управления проектами проводился с различных позиций и при различных параметрах (со стороны пользователей, с учетом разного числа пользователей, со стороны разработчиков и др.).

В задаче выбора СУП можно выделить две категории показателей: четкие и нечеткие. Четкая часть показателей, например, количество пользователей в СУП и т. п., может разрешаться с помощью МАИ. Нечеткие показатели СУП, например, удобство использования, функциональность и т. п., целесообразно учитывать на основе одного из алгоритмов нечеткого вывода, Мамдани, Такаги-Сугено, Ларсена и др. [17]. Сравнительный анализ алгоритмов показывает, что в нашем случае целесообразно использовать алгоритм нечеткого вывода Такаги-Сугено,

Таблица 1

Группы показателей систем управления проектами

Показатель	Описание	Обозначение
Стоимость	Оценка стоимости приобретения и сопровождения	A_1
Скорость обучения	Время обучения работе с системой	A_2
Функциональность	Функциональная глубина	A_3
Интегрируемость	Возможности интеграции с внешними системами	A_4

отличающийся невысокой трудоемкостью и приемлемой точностью.

Характеристика алгоритма Такаги-Сугено

Алгоритм Такаги-Сугено описывается следующим образом [4, 5, 17]: для нечеткого множества A используется обозначение функции принадлежности $A(x)$, $x \in X$. Предполагается, что правило нечеткого вывода (импликация) R имеет следующий формат:

R : ЕСЛИ $f(x_1$ есть A_1 , ..., x_k есть A_k),
ТО $y = g(x_1, \dots, x_k)$,

где y – переменная заключения, значение которой выводится; $x_1 - x_k$ – переменные предпосылки, значения которых также присутствуют в заключении; f – логическая функция, связывающая предпосылки в условии; g – функция, определяющая значение y при условии, что $x_1 - x_k$ удовлетворяют исходным условиям правила вывода.

Формирование базы правил систем нечеткого вывода и фаззификация входных переменных. В базе правил используются только правила нечетких продукций (предположим, что база состоит из двух правил с двумя входами и одним выходом) в форме:

Правило 1: ЕСЛИ x_1 есть A_{11} И x_2 есть A_{12} , ТО $y = c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + c_{10}$,

Правило 2: ЕСЛИ x_1 есть A_{21} И x_2 есть A_{22} , ТО $y = c_{21}x_1 + c_{22}x_2 + c_{20}$.

Здесь c_{ij} – весовые коэффициенты компонентов вектора, c_{j0} – смещение. При этом значение выходной переменной y в заключении определяется как действительное число.

Агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций. Для нахождения степени истинности условий всех правил нечетких продукций, как правило, используется логическая операция \min -конъюнкции:

$$\alpha_1 = \min\{\mu_{A_{11}}(x_1), \mu_{A_{12}}(x_2)\},$$

$$\alpha_2 = \min\{\mu_{A_{21}}(x_1), \mu_{A_{22}}(x_2)\}.$$

Для выполнения агрегирования могут использоваться и другие логические опера-

ции. Правила, степень истинности условий которых отлична от нуля, считаются *активными* и используются для дальнейших расчетов.

Активизация подзаключений в нечетких правилах продукций. Во-первых, с использованием \min -активизации, как и в алгоритме Мамдани, находятся значения степеней истинности всех заключений правил нечетких продукций. Во-вторых, осуществляется расчет обычных (не нечетких) значений выходных переменных каждого правила. Это выполняется с использованием формул для заключения:

$$y_1' = c_{11}x_1' + c_{12}x_2' + c_{10},$$

$$y_2' = c_{21}x_1' + c_{22}x_2' + c_{20}.$$

Здесь вместо x_1 и x_2 подставляются значения входных переменных до этапа фаззификации.

Аккумуляция заключений нечетких правил продукций. Фактически отсутствует, поскольку расчеты осуществляются с обычными действительными числами y_j .

Дефаззификация выходных переменных. Используется модифицированный вариант в форме метода центра тяжести для одноточечных множеств:

$$y' = (\alpha_1 y_1' + \alpha_2 y_2') / (\alpha_1 + \alpha_2).$$

При этом не требуется проведения предварительного аккумуляции активизированных заключений отдельных правил.

Реализация алгоритма Такаги-Сугено для выбора СУП

При одинаковой значимости различных показателей сравниваемых программных средств (в нашем случае СУП) общая оценка i -й СУП при использовании алгоритма Такаги-Сугено вычисляется по формуле [4, 17]:

$$y_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} \cdot c(x_{ij}).$$

На практике состав и значимость различных показателей существенно зависит от категории (типа) сравниваемых программных средств (операционных систем, систем программирования, СУП и др.). При этом

вполне очевидным решением представляется необходимость для заданной категории сравниваемых программных средств выполнить экспертную оценку значимости отдельных показателей (z_j) и нормировку так, чтобы выполнялось условие вида:

$$\sum_{j=1}^n z_j = 1.$$

В результате общая оценка i -й СУП будет вычисляться по формуле вида:

$$y_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} \cdot c(x_{ij})z_j.$$

Таким образом, правило оценки i -го программного продукта можно представить в общем виде следующим образом:

ЕСЛИ $c_{i1}(x_{i1}) = A_{i1}(x_{i1})$ И $c_{i2}(x_{i2}) = A_{i2}(x_{i2})$... И $c_{in}(x_{in}) = A_{in}(x_{in})$,

$$\text{ТО } y_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} \cdot c(x_{ij})z_j.$$

Функции принадлежности выбраны таким образом, что наименьший вес имеют средние значения. Вид функций принадлежности для весов показателей при условии использования двух вариантов оценки показателей (A_{ij} высокое (High) и низкое (Low)) приведен на рис. 1.

Вычисляя значение функции $c(x)$ для значения x_{ij} показателя по каждой СУП, получаем значение веса показателя c_{ij} .

Пример правил и обоснования выбора СУП

С учетом вида функций принадлежно-

сти для показателей СУП, приведенных на рис. 1, правила для выбора с четырьмя показателями имеют вид:

$$R^1 : \text{ЕСЛИ } x_{i1} = \text{низкое И ... И } x_{i4} = \text{низкое, ТО } y_i^1 = \sum_{j=1}^4 c_{ij}(x_{ij})z_j.$$

$$R^2 : \text{ЕСЛИ } x_{i1} = \text{низкое И ... И } x_{i4} = \text{высокое, ТО } y_i^2 = \sum_{j=1}^4 c_{ij}(x_{ij})z_j.$$

...

$$R^{16} : \text{ЕСЛИ } x_{i1} = \text{высокое И ... И } x_{i4} = \text{высокое, ТО } y_i^{16} = \sum_{j=1}^4 c_{ij}(x_{ij})z_j.$$

Схематично перебор посылок – термов низкое (Low) и высокое (High) в приведенных правилах для трех показателей сравниваемых СУП может быть представлен, как показано в табл. 2.

Легко показать, что количество правил в базе правил для одного сравниваемого программного продукта (СУП) есть c^n , где n – число показателей, используемых при выборе. В частности, при четырех показателях мы имеем 16 правил.

Для демонстрации рассматриваемого подхода ограничимся сравнением показателей для Oracle Primavera и Spider Project.

Расчет итоговой оценки по каждому продукту проводится при помощи модифицированного метода Такаги-Сугено. На первом этапе формируется база правил для модифицированного алгоритма.

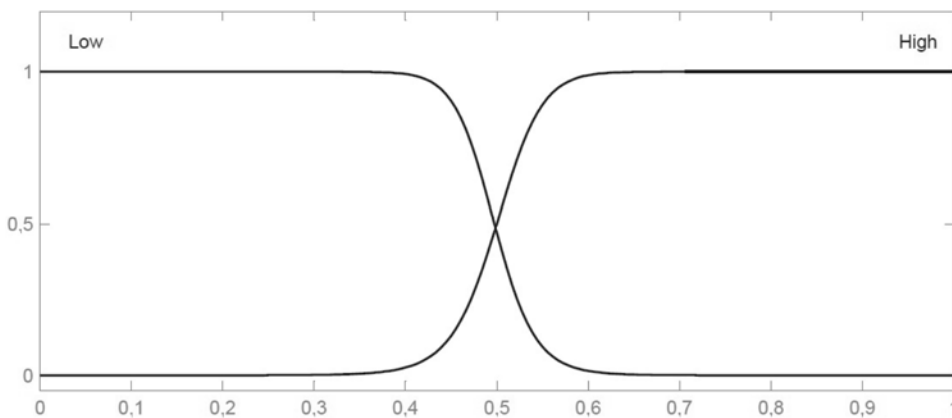


Рис. 1. Функции принадлежности для весов показателей

Таблица 2

Схема перебора посылок термов в правилах

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
1	Low	Low	Low	Low
2				High
3			High	Low
4				High
5		High	Low	Low
6				High
7			High	Low
8				High
9	High	Low	Low	Low
10				High
11			High	Low
12				High
13		High	Low	Low
14				High
15			High	Low
16				High

Формула вычисления оценки по *i*-му правилу в общем случае имеет вид:

$$y_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} \cdot c(x_{ij})z_j,$$

где *n* – число показателей, используемых при выборе; *y_i* – суммарная оценка качества продукта по *i*-му правилу; *x_{ij}* – оценка *j*-го показателя *i*-го правила; *c_{ij}* – вес *j*-го показателя *i*-го правила; *z_j* – значимость *j*-го показателя для всех типов СУП.

После вычисления оценки по всем правилам определяется итоговая оценка:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^m c_{\min}(y_i)y_i}{\sum_{i=1}^m c_{\min}(y_i)},$$

где *c_{min}(y_i)* определяется как результат выполнения логической операции min-конъюнкции всех показателей в *i*-м правиле.

В табл. 3 приведены значения значимостей показателей СУП, определенные на основе экспертной оценки. Наиболее значимыми показателями в нашем примере являются стоимость и функциональность.

В общем случае набор значений значимости показателей должен быть нормированным к единице:

$$\sum_{j=1}^n z_j = 1.$$

После расчета всех параметров вычисляется оценка качества для каждой альтернативы. Согласованные оценки экспертов по выбранным показателям представлены в табл. 4.

Таблица 3

Значимости показателей

<i>j</i>	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
<i>z_j</i>	0,3	0,2	0,3	0,2

Таблица 4

Оценки программных продуктов по выбранным показателям

Продукт	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
Oracle Primavera	0,4	0,5	0,9	0,5
Spider Project	0,6	0,6	0,6	0,4

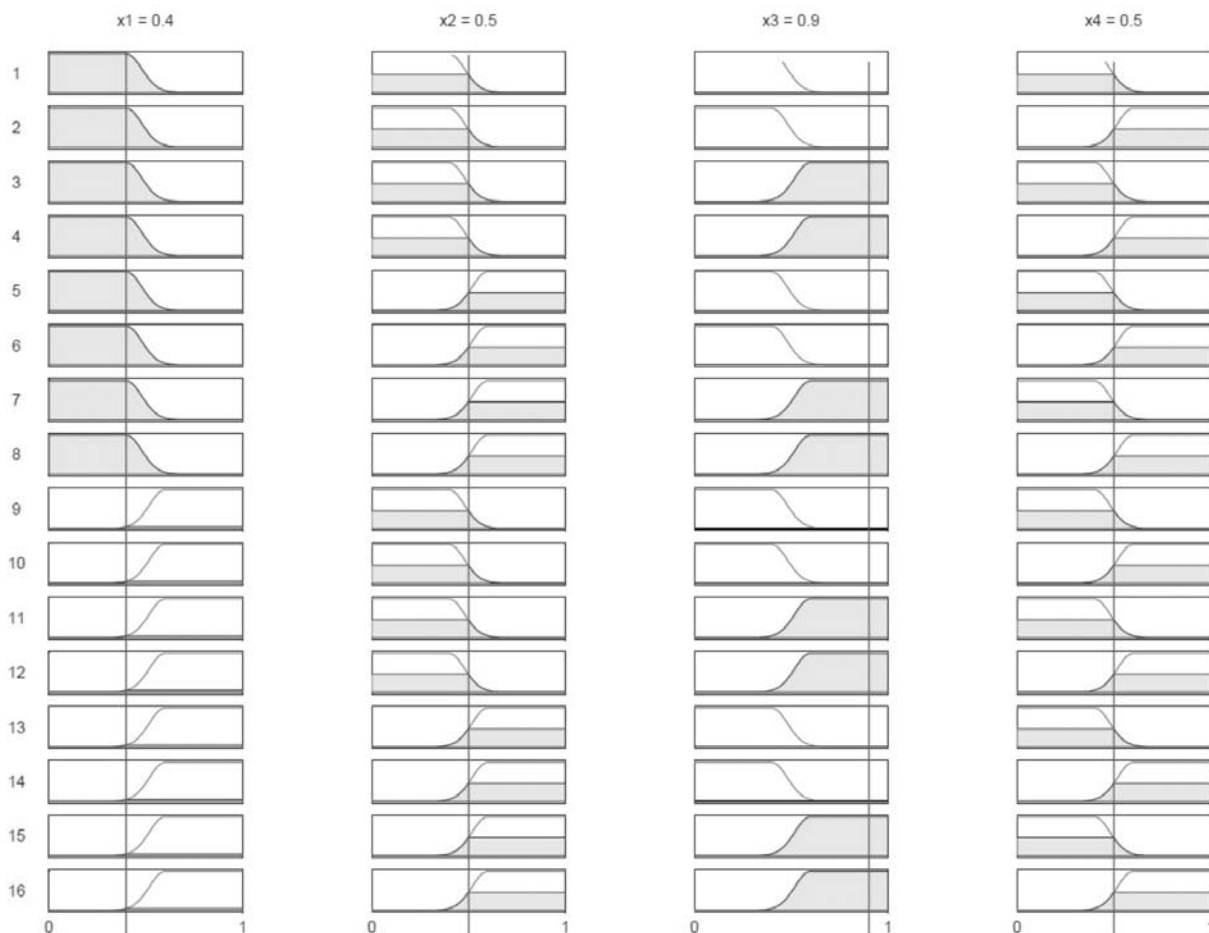


Рис. 2. Значения функций принадлежности для оценок Oracle Primavera

На основе оценок по показателям вычисляются значения функций принадлежности для каждого правила. Пример вывода значений функций принадлежности для Oracle Primavera представлен на рис. 2.

Для примера приведем результат расчета по первому правилу для первого продукта:

$$y_{\text{primavera}} = \sum_{j=1}^4 x_{ij} \cdot c(x_{ij})z_j = 0,4 \cdot 0,9886 \cdot 0,3 + 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,2 + 0,9 \cdot 0,0000078 \cdot 0,3 + 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,2 = 0,218634.$$

Результаты вычислений по всей базе правил для Oracle Primavera представлены в табл. 5.

После вычислений по всем правилам для каждого продукта производится вычисление подусловий и дефаззификация выходной переменной:

$$y_{\text{primavera}} = \frac{\sum_{i=1}^m c_{\min}(y_i)y_i}{\sum_{i=1}^m c_{\min}(y_i)} = \frac{1,015176}{2,101663} = 0,483035.$$

$$y_{\text{spider}} = \frac{\sum_{i=1}^m c_{\min}(y_i)y_i}{\sum_{i=1}^m c_{\min}(y_i)} = \frac{0,606417}{1,176} = 0,515661.$$

Из приведенных результирующих оценок сравниваемых СУП можно сделать вывод, что предпочтение следует отдать СУП Spider Project. Итоговая оценка по выбранным показателям для этого продук-

Таблица 5
Результаты вычисления оценок

	y	$c(y)_{\min}$
1	0,218634	0,00000784
2	0,218634	0,00000784
3	0,488632	0,5
4	0,488632	0,5
5	0,218634	0,00000784
6	0,218634	0,00000784
7	0,488632	0,5
8	0,488632	0,5
9	0,10305	0,00000784
10	0,10305	0,00000784
11	0,373048	0,0254
12	0,373048	0,0254
13	0,10305	0,00000784
14	0,10305	0,00000784
15	0,373048	0,0254
16	0,373048	0,0254

та оказалась выше.

Для сравнения приведем пример расчета без использования функции весов показателей, где входными параметрами для расчета являются оценки эксперта и значимость показателя:

$$y_{\text{primavera}} = \sum_{j=1}^4 x_{ij} \cdot z_j = 0,4 \cdot 0,3 + 0,5 \cdot 0,2 + 0,9 \cdot 0,3 + 0,5 \cdot 0,2 = 0,59.$$

$$y_{\text{spider}} = \sum_{j=1}^4 x_{ij} \cdot z_j = 0,6 \cdot 0,3 + 0,6 \cdot 0,2 + 0,6 \cdot 0,3 + 0,4 \cdot 0,2 = 0,56.$$

Как видим, при отсутствии использования функции весов показателей сравниваемых СУП итоговая оценка заметно отличается. Более высокую оценку в данном варианте расчета получает Oracle Primavera.

На основе использования нечеткого вывода достигнута итоговая оценка, в которой больший вес имеют значения показателей с более выраженной оценкой, т. е. выше

или ниже среднего значения. Этот эффект можно объяснить выбором функций принадлежности (рис. 1) для показателей. Если использовать функции принадлежности с максимумом в средних значениях диапазона значений, то показатели со средними оценками имеют более выраженное влияние на итоговый результат.

Чтобы подтвердить влияние средних оценок на результат вычисления с использованием функций принадлежности, выполним оценку по измененному набору значений для показателей. В частности, для продукта Spider Project вместо экспертной оценки установлены средние значения для двух показателей, а у Oracle Primavera одно из средних значений уменьшено (табл. 6).

При таких входных значениях итоговые оценки без использования нечеткого вывода определяются как

$$y_{\text{primavera}} = \sum_{j=1}^4 x_{ij} \cdot z_j = 0,4 \cdot 0,3 + 0,4 \cdot 0,2 + 0,8 \cdot 0,3 + 0,5 \cdot 0,2 = 0,54.$$

$$y_{\text{spider}} = \sum_{j=1}^4 x_{ij} \cdot z_j = 0,5 \cdot 0,3 + 0,5 \cdot 0,2 + 0,7 \cdot 0,3 + 0,4 \cdot 0,2 = 0,54.$$

Результат вычисления с использованием нечеткого вывода имеет вид:

$$y_{\text{primavera}} = \frac{\sum_{i=1}^m c_{\min}(y_i) y_i}{\sum_{i=1}^m c_{\min}(y_i)} = \frac{0,596609}{1,167062} = 0,511206.$$

$$y_{\text{spider}} = \frac{\sum_{i=1}^m c_{\min}(y_i) y_i}{\sum_{i=1}^m c_{\min}(y_i)} = \frac{0,86401}{2,1112} = 0,409251.$$

Таблица 6

Измененные оценки программных продуктов по выбранным показателям

Продукт	A_1	A_2	A_3	A_4
Oracle Primavera	0,4	0,4	0,8	0,5
Spider Project	0,5	0,5	0,7	0,4

Обсуждение результатов и трудоемкости подхода

Таблица 7

Пример зависимости r и t от n

n	4	10	20	30
r	16	1024	1048576	1073741824
t, c	0,001	0,002	0,769	1403,387

По результатам численных экспериментов можно отметить, что с использованием нечеткого вывода итоговая оценка больше соответствует требованиям к методу обоснования выбора продуктов. Предложенный подход является лучшим, поскольку в нем учитывается разность весов оценки показателей сравниваемых программных продуктов.

Для наглядности нами рассмотрен пример обоснования выбора из двух вариантов СУП с использованием четырех показателей. При этом отметим, что в статьях [7–12] выбор ПО для каждого класса продуктов выполнялся также с использованием относительно небольшого числа показателей (6–8).

Применительно к СУП число используемых показателей может быть заметно большим. При этом возникает дилемма между стремлением к полноте учета всех показателей выбора СУП и желанием избежать излишней трудоемкости вычислений. Напомним, что число правил, используемых в предлагаемом подходе, определяется величиной $r = 2^n$, где n – число показателей.

При принятии решения по выбору СУП достаточно большое время, на наш взгляд, затрачивается на сбор и согласование мнений экспертов. Что касается затрат времени на вычисления с помощью алгоритма Такаги-Сугено, то для примера приведем зависимость числа правил r и времени вычисления t от числа показателей (см. табл. 7). Расчет проводился с помощью разработанного авторами комплекса программ на компьютере с процессором Intel Core i5 с тактовой частотой 2,79 ГГц.

Как видно из данных табл. 7, при увеличении числа сравниваемых показателей наблюдается существенный рост времени вычисления t . В общем случае в практических ситуациях обоснования выбора СУП целесообразно использовать некоторое обосно-

ванное число правил. Задача определения этого числа правил требует отдельного рассмотрения.

Предложенный подход (несмотря на наличие ряда фирменных сайтов, предлагающих готовые решения СУП), на наш взгляд, может быть полезен для широкого круга разработчиков программных проектов, у которых нет любимейшего набора инструментальных средств, находящихся в длительном применении.

Выбор программного обеспечения систем управления проектами на основе применения предложенного модифицированного алгоритма Такаги-Сугено, на наш взгляд:

по сравнению с методом анализа иерархий Саати и его обобщением на основе теории Демпстера-Шейфера [13, 14] позволяет снизить трудоемкость вычислений;

по сравнению с методом предпочтений [8] дает возможность в явной мере учесть нечеткость исходных данных;

по сравнению с подходом, предложенным в [9] на основе онтологий, нечеткой меры и интеграла Шоке, достигается большая наглядность получаемого вывода.

Дальнейшие исследования целесообразно продолжить в направлении практического применения предложенного подхода для выбора других программных продуктов; выработки предложений по формализованному проведению экспертной оценки ряда сложно определяемых параметров, например «Функциональность», «Стоимость» и др.; обоснования состава и числа правил, используемых при выборе программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шварц Д.Т. Интерактивные методы решения задачи многокритериальной оптимизации.

Обзор // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. С. 245–264. [Электрон-

ный ресурс] // URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/547747.html>.

2. **Лотов А.В., Поспелова И.И.** Многокритериальные задачи принятия решений: Учеб. пособие. М.: МАКС Пресс, 2008. 197 с.

3. **Saaty Th.L.** The Hierarchon: A Dictionary of Hierarchies. Pittsburgh, Pennsylvania: RWS Publications, 1992. 496 p.

4. **Takagi T., Sugeno M.** Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control // *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*. 1985. Vol. 15. No. 1. Pp. 116–132.

5. **Ma J., Lu J., Zhang G.Q.** Decider: A fuzzy multi-criteria group decision support system // *Knowledge-Based Systems*. 2010. Vol. 23. Pp. 23–31.

6. **Баранова Е.К., Чернова М.В.** Сравнительный анализ программного инструментария для анализа и оценки рисков информационной безопасности // *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы*. 2014. № 4. С. 160–168.

7. **Брякалов Г.А., Войцеховский С.В., Воробьев Е.Г., Гофман В.Э., Гридин В.В., Дрюков Ю.П., Замула А.А., Захаров А.И., Компаниец Р.И., Липецких А.Г., Рыжиков Ю.И., Хомоненко А.Д., Цыганков В.М.** Основы современных компьютерных технологий: Учебник. СПб.: Корона принт, 2005. 672 с.

8. **Горшков А.В., Хомоненко А.Д.** Метод выбора программного обеспечения систем управления версиями // *Анализ и прогнозирование систем управления в промышленности и на транспорте. Матер. XVI междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, студентов и аспирантов*. СПб., 2015.

9. **Ахаев А.В.** Методика, модели и алгорит-

мы выбора программных продуктов на основе онтологии и нечеткой меры: Дисс. ... канд. техн. наук. Томск, 2014. 19 с.

10. **Azadeh A., Shirkouhi S.N., Rezaie K.** A robust decision-making methodology for evaluation and selection of simulation software package // *Internat. J. of Advanced Manufacturing Technology*. 2010. Vol. 47. Pp. 381–393.

11. **Karaarslan N., Gundogar E.** An application for modular capability-based ERP software selection using AHP method // *Internat. J. of Advanced Manufacturing Technology*. 2009. Vol. 42. Pp. 1025–1033.

12. **Smirlis Y.G., Zeimpekis V., Kaimakamis G.** Data envelopment analysis models to support the selection of vehicle routing software for city logistics operations // *Operational Research*. 2012. Vol. 12. Pp. 399–420.

13. **Уткин Л.В., Симанова Н.В.** Обобщение метода анализа иерархий для принятия решения при неточных сравнениях с использованием теории Демпстера-Шейфера // *Изв. ОрелГТУ. Информационные системы и технологии*. 2007. № 4/268(535). С. 223–227.

14. **Dempster A.P.** Upper and Lower Probabilities Induced by a Multi-Valued Mapping // *Annales of Mathematical Statistics*, 1967. Vol. 38. Pp. 325–339.

15. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*. 5th ed. 2014. 589 p.

16. **Фатрелл Р.Т., Шафер Д.Ф., Шафер Л.И.** Управление программными проектами. Пер. с англ. М., СПб., Киев: ИД «Вильямс», 2004. 1136 с.

17. **Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С.** Нечеткие модели и сети. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 284 с.

REFERENCES

1. **Shvarts D.T.** Interaktivnyye metody resheniya zadachi mnogokriterialnoy optimizatsii. Obzor [Interactive methods for solving multi-objective optimization problem. Review]. *Nauka i obrazovaniye. MGTU imeni N.E. Bauman [Science and Education of Bauman MSTU]*, 2013, Pp. 245–264. Available: <http://technomag.bmstu.ru/doc/547747.html>. (rus)

2. **Lotov A.V., Pospelova I.I.** *Mnogokriterialnyye zadachi prinyatiya resheniy [Multicriteria decision making problems]*, Moscow: MAKS Press Publ., 2008, 197 p. (rus)

3. **Saaty Th.L.** The Hierarchon: A Dictionary of Hierarchies. Pittsburgh, Pennsylvania: RWS Publications, 1992, 496 p.

4. **Takagi T., Sugeno M.** Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, 1985, Vol. 15, No. 1, Pp. 116–132.

5. **Ma J., Lu J., Zhang G.Q.** Decider: A fuzzy multi-criteria group decision support system. *Knowledge-Based Systems*, 2010, No. 23, Pp. 23–31.

6. **Baranova Ye.K., Chernova M.V.** Sravnitelnyy analiz programmnoy instrumentariya dlya analiza i otsenki riskov informatsionnoy bezopasnosti [Comparative analysis of programming tools for cybersecurity risk assessment]. *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Kompyuternyye sistemy [Information security problems. Computer Systems]*, 2014, No. 4, Pp. 160–168. (rus)

7. **Bryakalov G.A., Voytsekhovskiy S.V., Vorobyev Ye.G., Gofman V.E., Gridin V.V., Dryukov Yu.P., Zamula A.A., Zakharov A.I., Kompaniyets R.I., Lipetskikh A.G., Ryzhikov Yu.I., Khomonenkov A.D., Tsygankov V.M.** *Osnovy sovremennykh kompyuternykh tekhnologiy [Fundamentals of modern computer technologies]*. St. Petersburg: Korona print

Publ., 2005, 672 p. (rus)

8. **Gorshkov A.V., Khomonenko A.D.** Metod vybora programmnoho obespecheniya sistem upravleniya versiyami [The method of selection of software version control systems]. *Materialy XVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, studentov i aspirantov Analiz i prognozirovaniye sistem upravleniya v promyshlennosti i na transporte [XVI Materials International scientific-practical conference of young scientists, students and graduate students Analysis and Forecasting Management Systems in Industry and Transport]*. St. Petersburg, 2015. (rus)

9. **Akhayev A.V.** Metodika, modeli i algoritmy vybora programmnykh produktov na osnove ontologii i nechetkoy mery [Abstract of dissertation for the degree of candidate of technical sciences, made the topic: *Methods, models and algorithms for the selection of software products based on ontology and fuzzy measures*], Tomsk, 2014, 19 p. (rus)

10. **Azadeh A., Shirkouhi S.N., Rezaie K.** A robust decision-making methodology for evaluation and selection of simulation software package, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, Vol. 47, Pp. 381–393.

11. **Karaarslan N., Gundogar E.** An application for modular capability-based ERP software selection using AHP method, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, Vol. 42, Pp. 1025–1033.

12. **Smirlis Y.G., Zeimpekis V., Kaimakamis G.** Data envelopment analysis models to support the selection of vehicle routing software for city logistics operations, *Operational Research*, 2012, Vol. 12, Pp. 399–420.

13. **Utkin L.V., Simanova N.V.** Obobshcheniye metoda analiza iyerarkhiy dlya prinyatiya resheniya pri netochnykh sravneniyakh s ispolzovaniyem teorii Dempstera-Sheyfera [The generalization of the analytic hierarchy process for deciding when inaccurate comparisons using the Dempster-Shafer theory]. *Izvestiya OrelGTU. Informatsionnyye sistemy i tekhnologii [Izvestiya OrelSTU. Information systems and technologies]*, 2007, No. 4/268(535), Pp. 223–227. (rus)

14. **Dempster A.P.** Upper and Lower Probabilities Induced by a Multi-Valued Mapping, *Annales of Mathematical Statistics*, 1967, Vol. 38, Pp. 325–339.

15. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*, 5th ed., 2014, 589 p.

16. **Fatrell R.T., Shafer D.F., Shafer L.I.** *Upravleniye programmnyimi proyektami. Dostizheniye optimalnogo kachestva pri minimume zatrat [Quality Software Project Management]*. Moscow-St. Petersburg-Kiev: Publishing House “Vilyams”, 2004, 1136 p. (rus)

17. **Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S.** *Nechetkiye modeli i seti [Fuzzy models and networks]*. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2007, 284 p. (rus)

ТИТОВ Александр Игоревич – аспирант кафедры информационных и вычислительных систем факультета автоматизации и интеллектуальных технологий Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9.

E-mail: titovvvv@rambler.ru

ТИТОВ Aleksandr I. *Petersburg State Transport University.*

190031, Moskovsky Ave. 9, St. Petersburg, Russia.

E-mail: titovvvv@rambler.ru **ХОМОНЕНКО Анатолий Дмитриевич** – заведующий кафедрой информационных и вычислительных систем факультета автоматизации и интеллектуальных технологий Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, доктор технических наук.

190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9.

E-mail: khomon@mail.ru

KHOMONENKO Anatoly D. *Petersburg State Transport University.*

190031, Moskovsky Ave. 9, St. Petersburg, Russia.

E-mail: khomon@mail.ru