

УДК 519.711.3

Е. В. РУЛЬКО

## ПОДХОД К ИМИТАЦИИ ПРОЦЕССА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЕННЫХ ДЕЙСТВИЙ

*Военная академия Республики Беларусь*

*Главное требование к имитационному моделированию военных действий – адекватность. Исходя из этого необходимо, чтобы поведение модельных объектов было максимально приближено к поведению реальных объектов в тех же условиях обстановки или, как минимум, не противоречило логике здравого смысла и требованиям уставных документов. Это создает необходимость разработки механизма, позволяющего формализовать управленческий опыт командиров соответствующих уровней и автоматически выводить решения на основании параметров текущей ситуации и предварительно заданных решающих правил.*

*Как правило, в процессе принятия решений, командир оперирует сложно формализуемой информацией на уровне комплексных категорий. В противоположность этому, состояние объекта в системе моделирования описывается в виде набора значений конкретных параметров. Для преобразования множества параметров объектов в параметры более высокого уровня предлагается использовать метод анализа иерархий.*

*Вторая задача, требующая своего разрешения, – синтез аппарата принятия решений на основе полученных комплексных понятий. Для этого предлагается использование механизма нечеткого логического вывода. В этом случае предпочтительность выбора того или иного варианта поведения задается в зависимости от характера пересечения определенных экспертом нечетких множеств, функции принадлежности которых построены на осях сформированных ранее комплексных параметров. В качестве консеквентов решающих правил выступают заранее сформированные стратегии поведения модельных объектов, в связи с чем в предлагаемом алгоритме фактически отсутствует этап дефаззификации, а для аккумуляирования заключений используется формула алгебраического объединения. Предлагаемый подход позволяет осуществлять автоматический выбор альтернативы поведения в ходе моделирования без участия оператора.*

**Ключевые слова:** военные действия, имитационное моделирование, принятие решений, метод анализа иерархий, нечеткая логика, нечеткий логический вывод.

### Введение

С развитием компьютерных технологий для полного и объективного анализа предметной деятельности широкое распространение получило математическое моделирование. Не является исключением и военная сфера. В вооруженных силах Республики Беларусь разработан и утверждена концепция создания системы моделирования военных действий (далее – СМВД) [1]. В учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь» создан научно-исследовательский центр моделирования военных действий, осуществляющий целенаправленное проведение научных исследований для решения актуальных научных и практических задач в данной области. Основным способом реализации СМВД выбрано имитационное моделирование различных ситуаций, возникающих в ходе боевых действий.

Главное требование к подобному моделированию – адекватность. Исходя из этого необходимо чтобы поведение модельных объектов было максимально приближено к поведению реальных объектов в тех же условиях обстановки или, как минимум, не противоречило логике здравого смысла. Требуемое поведение объектов в системе моделирования задается с помощью специального визуального конструктора, позволяющего формировать алгоритмы, содержащие последовательность выполнения объектами (подразделениями) различных задач – элементарных функциональных действий, выполняемых модельными или групповыми объектами, например, «перемещение по маршруту», «наступление на противника», «оборона назначенных рубежей и позиций», «неподвижный заградительный огонь» артиллерии и др. В каждой из задач указываются входные



Рис. 1. Фрагмент алгоритма «Наступление на противника»

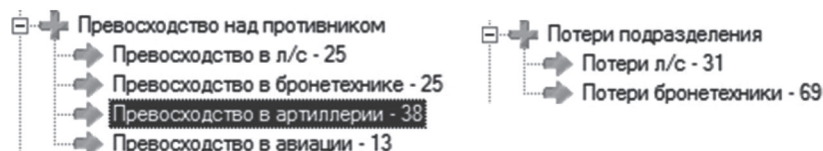


Рис. 2. Примеры комплексных параметров

данные – рубежи, сектора, маршруты и т. д. Алгоритмы могут иметь иерархическую структуру, произвольного уровня вложенности. Так, выполнение алгоритма «Наступление на противника» может содержать следующие этапы – рис. 1.

Подобным образом готовятся различные сценарии тактических маневров или вариантов поведения. При этом остается открытым вопрос организации рационального выбора альтернатив поведения модельными объектами в процессе имитационного эксперимента в заданных точках принятия решений. Фактически, это создает необходимость разработки механизма, позволяющего формализовать управленческий опыт командиров соответствующих уровней и автоматически выбирать предпочтительный вариант поведения из заранее подготовленных на основании параметров текущей ситуации и предварительно заданных решающих правил. Решению данного вопроса и посвящена настоящая работа.

### Решение задачи

Как правило, в процессе принятия решений, командир оперирует комплексной, нечеткой и сложно формализуемой информацией. В противоположность этому, состояние объекта в системе моделирования описывается в виде набора конкретных значений параметров. Это создает необходимость решения задачи синтеза комплексных понятий, доступных специалисту военной предметной области на основе параметров объектов системы моделирования. В ходе проведенного исследования [2] установлено, что с точки зрения обеспечения понимаемости и удобства использования военным специалистом для этой задачи наиболее подходящим является применение метода анализа

иерархий (МАИ) [3, 4]. На этапе подготовки к моделированию экспертом осуществляется формирование взвешенной системы параметров, каждый из которых может быть как комплексным, т.е. содержащим другие параметры, так и простым – связанным с конкретной величиной, используемой в системе моделирования. Так, например, параметры «Пре́восходство над противником» и «Потери подразделения» могут быть представлены в виде ранжированных систем других параметров – рис. 2.

Математический аппарат данного подхода предполагает расчет значений  $i$ -го параметра верхнего уровня в точке принятия решения в соответствии с выражением:

$$H_i = \sum_{n=1}^k (P_n H_n), \quad (1)$$

где  $k$  – число дочерних параметров;  $P_n$  – значение важности  $n$ -го параметра, определяемое экспертом, в системе параметров верхнего уровня;  $H_n$  – собственное численное значение дочернего параметра.

В том случае, если дочерний параметр является комплексным,  $H_n$  определяется в соответствии с выражением 1. Если же он связан с некоторой величиной, предоставляемой системой моделирования,  $H_n = f_n(X_n)$ , где  $X_n$  – численное значение параметра, полученное в результате моделирования;  $f_n(x)$  – функция зависимости степени влияния параметра от его текущего значения, определяемая экспертом. Задача данной функции осуществить нормировку текущего значения параметра в пределах от 0 до 1. В простейшем случае – это линейная зависимость между заданными минимальным и максимальным значениями параметра.

Использование приведенного аппарата позволяет получить нормированное значение каж-

дого из параметров верхнего уровня в произвольной точке принятия решения в процессе имитации боя.

Второй задачей, требующей своего разрешения, является синтез аппарата принятия решений на основе полученных комплексных понятий. Рассмотрим пример принятия решения о реализации маневра «отход» для подразделения, находящегося в обороне. Он осуществляется в целях выхода подразделений из-под ударов превосходящих сил противника и занятия ими более выгодного положения для последующих действий. Схема отхода заранее планируется и формируется с помощью разработанного визуального конструктора, позволяющего задавать последовательности выполнения различных задач объектов, осуществлять их синхронизацию, описывать события и задавать реакции на них.

Путь  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_j\}$  – конечное множество альтернатив, представляющих определенные стратегии поведения. В нашем случае существует всего две альтернативы: осуществлять отход или не осуществлять.  $H = \{H_1, H_2, \dots, H_k\}$  – множество параметров верхнего уровня, существенных для принятия решения. В нашем случае это могут быть: потери подразделения; потери противника; превосходство над противником; уровень наличия боеприпасов; уровень возможности поддержки прикрытия отхода. Пусть  $H_{v1}, H_{v2}, \dots, H_{vk}$  – совокупность множеств возможных значений соответствующих параметров верхнего уровня  $H_1, H_2, \dots, H_k$ , т. е.  $H_{v1}$  – множество возможных значений  $H_1$ ,  $H_{v2}$  – множество возможных значений  $H_2$  и т. д. Для каждого из параметров верхнего уровня  $H_i$  задается система нечетких множеств  $H'_i = \{H'_{i1}, H'_{i2}, \dots, H'_{ir}\}$ , так что  $\forall H_{ik} \in H_{vi}$ , где  $k = 0 \dots r$ . Каждое из данных множеств определяется функцией принадлежности и отождествляется с определенной лексической переменной, которая понятна военному специалисту (возможно, фигурирует в уставных документах). Так параметру «потери подразделения» могут соответствовать лингвистические переменные «низкие», «ощутимые», «высокие», «критические». Параметру «потери противника» соответствуют аналогичные лингвистические переменные, но заданные в других границах (уровень высоких потерь наступает раньше).

После подготовки системы лексических переменных осуществляется формирование базы решающих правил вида: «ЕСЛИ <Антецедент (предпосылка)> ТО <Консеквент (следствие)>» ( $F_n$ ), где в качестве антецедента выступает состояние системы моделирования  $A'_i$ , выбираемое из множества состояний  $A' = \{A'_1, A'_2, \dots, A'_y\}$ , которые описаны в рамках параметров  $\{H_1, H_2, \dots, H_k\}$ , а в качестве консеквента – альтернатива поведения  $A_k$ .  $F_n \in [0; 1]$  является коэффициентом определенности соответствующего правила.

Каждое из состояний системы моделирования, которому соответствует определенная альтернатива поведения, описывается выражением:

$$A'_i = \bigcap_{n=1}^{n=k} (H'_m \in H_{vm}) \wedge \nexists x \left( \left( x \in \bigcup_{n=1}^{n=k} H_{vm} \right) \wedge \left( x \notin \bigcup_{l=1}^{l=y} A'_l \right) \right) \quad (2)$$

где  $k$  – число параметров верхнего уровня,  $y$  – число описанных состояний системы,  $H'_m$  – задается экспертом предметной области и выбирается из множества лексических переменных  $H'_n$ , которое описано на множестве значений  $H_{vn}$  параметра  $H_n$ .

Смысл выражения (2) заключается в том, что множества состояний внешней среды  $A'_i$ , которым соответствует определенная альтернатива поведения управляемого объекта  $A$ , образуются в результате пересечения определенных пользователем нечетких множеств  $\{H'_1, H'_2, \dots, H'_k\}$ , каждое из которых соответствует некоей заданной лексической переменной на области значений соответствующего параметра верхнего уровня, по всему набору параметров  $\{H_1, H_2, \dots, H_k\}$ . При этом пересечения задаются таким образом, что не существует состояний системы, описываемых в рамках параметров верхнего уровня  $\{H_1, H_2, \dots, H_k\}$ , которые принадлежат объединению множеств возможных значений данных параметров, и одновременно не принадлежат объединению множеств состояний системы  $\{A'_1, A'_2, \dots, A'_y\}$ , каждому из которых соответствует своя альтернатива поведения. То есть не должно существовать состояний системы, описанных в рамках множества параметров верхнего уровня  $\{H_1, H_2, \dots, H_k\}$ , которые не принадлежат ни одному из множеств, соответствующему альтернативе поведения.

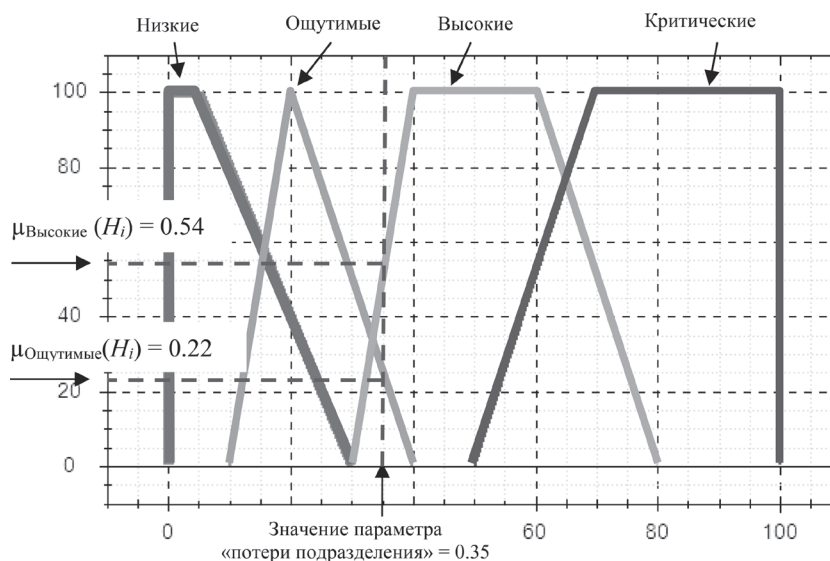


Рис. 3. Определение значений функций принадлежности

Сформированная система правил выглядит следующим образом:

1. «ЕСЛИ <Потери подразделения = критические> ТО <Отход> (0,8);

2. «ЕСЛИ <Потери подразделения = высокие> И <Потери противника = критические> ТО <Оборона> (0,5);

3. «ЕСЛИ <Потери подразделения = высокие> И <Потери противника = высокие> ТО <Оборона> (0,5);

4. «ЕСЛИ <Потери подразделения = высокие> И <Потери противника = ощутимые> ТО <Оборона> (0,5);

5. «ЕСЛИ <Потери подразделения = высокие> И <Потери противника = низкие> ТО <Отход> (0,5);

6. «ЕСЛИ <Потери подразделения = ощутимые> ТО <Оборона> (0,5);

7. «ЕСЛИ <Потери подразделения = низкие> ТО <Оборона> (0,5);

8. «ЕСЛИ <Потери подразделения = высокие> И <Превосходство над противником = превосходство противника> ТО <Отход> (0,9);

9. «ЕСЛИ <Превосходство над противником = значительное превосходство противника> ТО <Отход> (0,9);

10. «ЕСЛИ <Превосходство над противником = значительное наше превосходство> ТО <Оборона> (1);

11. «ЕСЛИ <Уровень наличия боеприпасов = критический> ТО <Отход> (1);

12. «ЕСЛИ <Уровень возможности поддержки прикрытия отхода = низкий> ТО <Оборона> (0,5);

Выполнение требований выражения (2) достигается за счет фигурирования в системе правил всех вариантов лексических переменных параметра «Потери подразделения» в сочетании со всеми вариантами лексических переменных параметра «Потери противника». Это означает, что при любом состоянии системы моделирования одно из выражений окажется с ненулевой истинностью.

Механизм нечеткого вывода вызывается в точке принятия решения в процессе имитационного моделирования. Как правило, он предполагает ряд этапов [5–7]. Этап фаззификации подразумевает установку соответствия между численным значением параметра верхнего уровня  $H_i$ , определяемым в соответствии с выражением (1), и значениями функций принадлежности нечетких множеств  $\{H'_{i1}, H'_{i2}, \dots, H'_{ir}\}$ , определенных на множестве значений данного параметра.

Допустим, что в точке принятия решения параметры верхнего уровня имеют следующие значения: потери подразделения – 0.35; потери противника – 0.45; превосходство над противником – 0.23; уровень наличия боеприпасов – 0.58; уровень возможности поддержки прикрытия отхода – 0.33.

Тогда для параметра «потери подразделения» значения функций принадлежности соответствующих нечетких множеств будут следующими – рис. 3.

Определенная в данном случае система нечетких множеств параметра верхнего уровня, как и система решающих правил, задаются

пользователем субъективно, на основании собственного опыта. Функции принадлежности могут иметь трапецевидную или треугольную форму. Это позволяет закладывать в систему моделирования правила принятия решений различных субъектов и сравнивать их между собой по результатам экспериментов.

Агрегирование подусловий – процедура определения степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода. Для выражения, образованного с помощью нечеткого логического «И», значение функции принадлежности, как правило, определяется следующим образом:  $\mu_{(A \cap B)} = \min(\mu_{(A)}; \mu_{(B)})$ . Степень истинности антецедента умножается на коэффициент определенности решающего правила  $F_n$  для получения итогового значения. Так, для правила «ЕСЛИ <Потери подразделения = критические> ТО <Отход> (0,8) значение истинности будет равно произведению истинности выражения <Потери подразделения = критические> и коэффициента определенности – 0,8. Итого –  $0 * 0,8 = 0$ . Аналогичным образом вычисляются значения истинности всех решающих правил.

На данном этапе антецеденты каждого из решающих правил обладают определенными степенями истинности. При этом каждому антецеденту соответствует свой консеквент, представляющий альтернативу поведения. Таким образом, у каждого консеквента решающего правила есть определенная степень предпочтительности. Допустим, в нашем случае это выглядит следующим образом:

1. <Отход> – 0;
2. <Оборона> – 0,24;
3. <Оборона> – 0,27;
4. <Оборона> – 0;
5. <Отход> – 0;
6. <Оборона> – 0,11;
7. <Оборона> – 0;
8. <Отход> – 0,49;
9. <Отход> – 0,32;
10. <Оборона> – 0;
11. <Отход> – 0;
12. <Оборона> – 0,41;

Аккумуляция заключений в системах нечеткого вывода – это процесс нахождения функции принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных. Каждое из продукционных правил стремится в меру

собственной истинности сделать выбранным соответствующий ему антецедент. Так выбору альтернативы <Отход> способствует группа правил, связанных с анализом текущего соотношения сил и средств. Выбору альтернативы <Оборона> способствует группа правил, связанных с анализом уровня потерь противника и уровнем возможности поддержки прикрытия отхода.

Следует отметить, что этап дефазификации, подразумевающий переход от значений функций принадлежности непрерывной выходной переменной к ее числовому значению, является обязательным для систем нечеткого вывода [5]. В связи с тем, что в нашем случае необходимо выбрать вариант из множества, данный этап будет отсутствовать.

Для вычисления итоговой предпочтительности выбора варианта предлагается использование алгебраического объединения:  $\mu_{(A \cup B)} = \mu_{(A)} + \mu_{(B)} - \mu_{(A)} \mu_{(B)}$ . Данное выражение позволяет именно аккумулировать вклад каждого из правил в предпочтительность выбора своего консеквента, в отличие от наиболее распространенного в таких случаях подхода – max-объединения [5]. Для альтернативы <Отход> в этом случае значение предпочтения будет следующим:  $P<Отход> = 0,49 + 0,32 - 0,49 * 0,32 = 0,81 - 0,16 = 0,65$  (по правилам 8 и 9).

Для альтернативы <Оборона> существует большее число правил с ненулевой истинностью, поэтому объединение множеств будет производиться последовательно:

$$P_1<Оборона> = 0,24 + 0,27 - 0,24 * 0,27 = 0,51 - 0,06 = 0,45 \text{ (по правилам 2, 3).}$$

$$P_2<Оборона> = 0,45 + 0,11 - 0,45 * 0,11 = 0,51 \text{ (} P_1<Оборона> \text{ и правило 6).}$$

$$P<Оборона> = 0,51 + 0,41 - 0,51 * 0,41 = 0,71 \text{ (} P_2<Оборона> \text{ и правило 12).}$$

Таким образом,  $P<Отход> = 0,65$ , а  $P<Оборона> = 0,71$ . В итоге, будет выбран вариант связанный с продолжением обороны. При этом, как видно, существует множество факторов в пользу обоих вариантов.

### Заключение

В итоге предлагаемый подход позволяет осуществлять автоматический выбор одной из альтернатив поведения в произвольной точке принятия решения в ходе имитационного мо-

делирования. Первоначальный синтез комплексных понятий позволяет при построении базы решающих правил оперировать высокоуровневыми категориями, понятными военному специалисту. База правил составляется таким образом, что не должно существовать состояний системы, для которых каждое из продукцион-

ных правил имеет нулевую истинность (когда имеет место неопределенность). В связи с дискретным характером выходной информации в предлагаемой схеме нечеткого вывода отсутствует этап дефаззификации. Аккумуляция заключений осуществляется по формуле алгебраического объединения.

### Литература

1. Об утверждении Концепции создания системы моделирования военных действий: приказ Министра обороны Республики Беларусь, 19 августа 2009 г., № 664.
2. Разработка модуля принятия решений системы моделирования военных действий / В.М. Булойчик [и др.] // Сборник научных статей ВАРБ. – 2013. – № 24. – С. 10–15.
3. Саати, Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях / Т. Саати – М.: ЛКИ, 2008. – 360 с.
4. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
5. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков – СПб.: БХВ - Петербург, 2005. – 736 с.
6. Пospelov, Д. А. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Д.А. Пospelov – М.: Наука, 1986. – 312 с.
7. Тэрano, Т. Прикладные нечеткие системы / Т. Тэрano, К. Асаи, М. Сугэно – М.: Мир, 1993. – 368 с.

### References

1. About the statement of the Concept of creation of SMVD: the order of the Minister of Defenses of the republic of Belarus, on August, 19th, 2009, № 664.
2. Working out of the module of decision-making of system of modeling of military operations / V.M. Bulojchik [etc.] // Collection of scientific articles VARB. – 2013. - № 24. – p. 10–15.
3. Saaty, T. Dec. making with depend. and feedback / T. Saaty – M.: LKI, 2008. – 360 p.
4. Saaty, T. Decision making. Analytic hierarchy process / T. Saaty – M.: Radio and communication, 1993. – 278 p.
5. Leonenkov, A. V. Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH / A.V. Leonenkov – SPb.: BHV – Petersburg, 2005. – 736 p.
6. Pospelov, D. A. Fuzzy sets in models of control and systems of artificial intelligence. / D.A. Pospelov – M.: Science, 1986. – 312 p.
7. Terano, T. Applied fuzzy systems / T. Terano, K. Asai – M.: World, 1993. – 368 p.

Поступила  
12.01.2017

После доработки  
22.02.2017

Принята к печати  
06.03.2017

*E. Rulko*

## THE APPROACH TO IMITATION DECISION-MAKING PROCESS IN SYSTEM OF MODELLING OF MILITARY OPERATIONS

*Military Academy of the Republic of Belarus*

*The main requirement to imitating modeling of military operations - adequacy. Proceeding from it is necessary that the behavior of modeling objects has been as much as possible approached to behavior of real objects in the same conditions of conditions or, at least, did not contradict logic of common sense and requirements of authorized documents. It creates necessity of working out of the mechanism, allowing to formalize administrative experience of commanders of corresponding levels and automatically to deduce decisions, on the basis of parameters of a current situation and preliminary set solving rules.*

*As a rule, in decision-making process, the commander operates with difficult formalizable information at level of complex categories. Contrary to it, the object condition in modeling system is described in the form of a set of values of concrete parameters. For transformation of set of parameters of objects to parameters of higher level the method of the analysis of hierarchies is used.*

*Thus there is the second problem demanding the permission - synthesis of the device of decision-making on the basis of the received complex concepts. Use of the mechanism of an indistinct logic conclusion for this purpose is offered. In this case preference of a choice of this or that variant of behavior is set depending on character of crossing of the indistinct sets defined by the expert which functions of an accessory are constructed on axes generated before complex parameters. In quality konsekvents solving rules in advance generated strategy of behavior of modeling objects in this connection in offered algorithm actually there is no stage defuzzyfication act, and for accumulation of the conclusions the formula of algebraic association is*

used. The offered approach allows to carry out an automatic choice of alternative of behavior during modeling without participation of the operator.

**Keywords:** Military operations, imitating modeling, decision-making, AHR, fuzzy logic.



**Рутько Евгений Викторович**, магистр технических наук. Научный сотрудник научно-исследовательского центра моделирования военных действий учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь». Сфера научных интересов: искусственный интеллект, рефлексивное управление.

E-mail: [achtung-2@yandex.ru](mailto:achtung-2@yandex.ru), тел. 2874863

**Yauheni Rulko**, the master of engineering science. The research assistant of the research center of modeling of military operations of establishment of formation «Military academy of the republic of Belarus». Sphere of scientific interests: artificial intelligence, reflective control.