

## ОПЕРАТИВНЫЙ СПОСОБ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА АЛЬТЕРНАТИВЫ В БАЗАХ ЗНАНИЙ БОРТОВЫХ ОПЕРАТИВНО СОВЕТУЮЩИХ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ

© 2021 г. Б. Е. Федун<sup>а,\*</sup>, Н. Д. Юневич<sup>а</sup>

<sup>а</sup> ФНЦ ФГУП “ГосНИИАС”, Москва, Россия

\*e-mail: boris\_fed@gosniias.ru

Поступила в редакцию 14.07.2020 г.

После доработки 15.09.2020 г.

Принята к публикации 29.10.2020 г.

При работе оперативно советующих экспертных систем на борту антропоцентрических объектов (пилотируемые летательные и обитаемые подводные аппараты, пилотируемые транспортные средства) экипаж не имеет возможности оперативно участвовать в процессе решения задачи многокритериального выбора альтернативы в режиме эксперта. Предлагаемый способ позволяет экипажу всегда получать рекомендуемую альтернативу без его вмешательства в процесс решения задачи. Однако экипажу доступно при необходимости самостоятельно корректировать приоритеты критериев оценки альтернатив.

DOI: 10.31857/S0002338821020037

**Введение.** Бортные оперативно советующие экспертные системы (БОСЭС) всегда разрабатываются для конкретно заданной предметной области [1]. Они размещаются на борту антропоцентрических объектов (Антр/объекты: пилотируемые летательные аппараты, обитаемые подводные аппараты, пилотируемые транспортные средства), обеспечивая интеллектуальную поддержку экипажу Антр/объекта в процессе решения им оперативно возникающих проблем. Антр/объект получает задание на функционирование (задание на миссию). Выполнение Антр/объектом заданной миссии происходит в быстроменяющейся агрессивной внешней среде, в которой возникают проблемы, мешающие выполнению миссии. В базе знаний БОСЭС каждая такая проблема должна оперативно решаться с учетом сложившейся текущей внешней обстановки и с учетом целей выполняемой миссии при *неизменных алгоритмах/процедурах, реализованных в базе знаний*. На каждом такте работы БОСЭС полученное в ее базе знаний решение возникшей проблемы рекомендуется экипажу для реализации.

Некоторые проблемы могут быть решены в базе знаний БОСЭС методом многокритериального выбора альтернативы (МКВА), если этот метод будет удовлетворять следующим особенностям его использования в базах знаний БОСЭС:

- невозможно оперативно привлекать экспертов предметной области и *экипаж Антр/объекта* к процессу решения проблемы этим методом;
- состав альтернатив (альтернативных решений возникшей проблемы) должен на каждом такте работы БОСЭС соответствовать текущей внешней обстановке;
- результаты применения метода на каждом такте работы БОСЭС должны получаться с учетом текущей информации о внешней обстановке и априорной информации, поступившей из задания Антр/объекту на миссию;
- помещенный в базу знаний БОСЭС состав критериев оценки альтернатив должен быть неизменен, а их приоритеты определяются в задании на миссию и *могут* оперативно корректироваться экипажем Антр/объекта в процессе выполнения миссии, если экипаж сочтет это нужным и если сложившаяся внешняя обстановка даст возможность ему это сделать;
- БОСЭС постоянно предъявляет экипажу приоритетную альтернативу для ее реализации даже в случае отсутствия корректировки экипажем заданного вектора приоритета критериев.

При разработке задания на миссию Антр/объекту обычно определяются и включаются в задание (априорная информация для базы знаний БОСЭС): (1) не альтернативы, а только набор типов возможных альтернатив, назначаемых из числа типов, которые заложены в базу знаний БОСЭС, (2) приоритеты критериев, состав которых включен в базу знаний БОСЭС.

Для создания такого оперативного метода МКВА первоначально нужно определить, какие знания экспертов при решении задачи известными методами МКВА используются на каждом этапе ее решения. Системный анализ различных методов МКВА показал, что наиболее наглядно и полно эти знания экспертов выявляются в оперативно применяемом на практике методе МКВА, разработанном Т. Саати [2].

Метод Т. Саати предусматривает для решения задачи выбора предпочтительной альтернативы привлечение группы экспертов. Применяют метод следующим образом.

Создается группа экспертов, которые: (1) имеют глубокие знания об обстановке, в которой нужно решать возникшую проблему/задачу; (2) могут генерировать альтернативные решения проблемы, (3) могут назначать критерии оценки альтернативных решений и (4) непосредственно заинтересованы в эффективном решении проблемы.

В процессе функционирования созданной БОСЭС нет возможности привлекать такую группу экспертов. Следовательно, в базе знаний БОСЭС должны быть представлены знания экспертов и используемые ими процедуры, упомянутые в перечисленных выше пунктах (1)–(4), через процедуры базы знаний БОСЭС, которые содержали бы “глубокие знания” соответствующей предметной области. Только в этом случае в БОСЭС могли бы вырабатываться такие рекомендации, которые не отвергались бы профессиональными экипажами Антр/объектов.

Рассмотрим, какие знания экспертов и какие процедуры используют эксперты на каждом этапе решения задачи методом Т. Саати.

**Э т а п 1.** Формулировка задачи МКВА. Эксперты формулируют задачу, определяя допустимый состав альтернативных ее решений (альтернативы  $A_1, \dots, A_i, \dots, A_n$ ) и состав критериев  $K_1, \dots, K_j, \dots, K_s$ , по которым должны оцениваться эти решения (альтернативы). В процессе решения задачи эксперты в ряде случаев могут изменять состав альтернатив и состав критериев.

Для решения сформулированной задачи эксперты составляют матрицы парных сравнений альтернатив по каждому критерию и матрицу парных сравнений критериев, используя свои знания о самой задаче, альтернативах ее решения, критериях, знания об обстановке, в которой задача возникла. Все матрицы парных сравнений должны быть согласованы. Для проверки согласованности матриц экспертам предоставляется математическая поддержка, позволяющая для каждой матрицы определять ее собственный вектор, соответствующий ее максимальному собственному числу. По этому собственному числу вычисляется индекс согласованности матрицы, по которому эксперты определяют согласована ли составленная ими матрица.

При установлении экспертами факта несогласованности матрицы, возникающего из-за неполного учета/осознания экспертами внешней обстановки, эксперты составляют новый вариант этой матрицы и вновь определяют согласованность новой версии матрицы. Эта процедура составления новой версии матрицы может применяться несколько раз. В случае, когда таким образом не удастся добиться согласованности матрицы, эксперты корректируют саму постановку задачи МКВА: (1) пересматривают набор альтернатив и/или (2) пересматривают набор критериев. Добиться согласованности всех матриц нужно обязательно!

Процесс составления таких матриц экспертами весьма сложный и трудоемкий.

**Э т а п 2.** Определение матрицы приоритетов альтернатив по критериям. Для согласованной матрицы парных сравнений альтернатив по выбранному критерию ее собственный вектор определяет приоритеты альтернатив по этому критерию. Из полученных собственных векторов матриц парных сравнений альтернатив по критериям составляется матрица приоритетов альтернатив  $A_1, \dots, A_i, \dots, A_n$  по критериям  $K_1, \dots, K_j, \dots, K_s$ .

Для согласованной матрицы парных сравнений критериев ее собственный вектор определяет приоритеты критериев.

**Э т а п 3.** Определение итоговых приоритетов альтернатив. Определение вектора итоговых приоритетов альтернатив выполняется процедурой умножения матрицы приоритетов альтернатив по критериям на вектор приоритетов критериев, которые были получены на этапе 2. Альтернатива с наибольшим итоговым приоритетом рекомендуется как решение возникшей задачи.

Анализ процесса решения задачи упомянутым методом МКВА позволил установить, какие неформализованные знания экспертов используются на каждом этапе применения метода.

Прямое применение метода Т. Саати в базах знаний БОСЭС, размещаемых на Антр/объектах, затруднительно не только потому, что там нет группы экспертов. Быстро меняющаяся внешняя обстановка требует постоянной адаптации к ней набора альтернатив и оперативной корректировки приоритетов критериев. Последнее может делать только экипаж, постоянно анализирующий текущую внешнюю обстановку.

В этих условиях:

– использование знаний экспертов при составлении согласованных матриц парных сравнений альтернатив по каждому критерию становится невозможным и требуется их замена в базе знаний БОСЭС некоторыми другими процедурами, которые должны учитывать особенности применения альтернатив и особенности вычисления их приоритетов по каждому критерию другим способом, в котором отсутствующие знания экспертов будут заменяться “глубокими” моделями предметной области, оперативно настраиваемыми на сложившуюся внешнюю обстановку и на меняющийся состав активных объектов в ней;

– использование знаний экспертов при составлении согласованной матрицы парных сравнений критериев заменяется на вектор приоритета критериев, полученный из задания на миссию Антр/объекта, и на возможность оперативной корректировки экипажем приоритета критериев.

В разд. 1 формулируется постановка задачи. В разд. 2 дается общее описание предлагаемого оперативного метода МКВА, включающее состав и взаимодействие блоков базы знаний БОСЭС. В разд. 3–7 рассматриваются структуры блоков базы знаний БОСЭС, состав которых определен в разд. 2. В разд. 8 дан пример применения предложенного оперативного метода МКВА в базе знаний конкретной БОСЭС, подтверждающий его возможности эффективно решать возникшую проблему без оперативного использования знаний экипажа Антр/объекта.

**1. Постановка задачи.** Разработать для применения в базах знаний БОСЭС оперативный метод многокритериального выбора предпочтительной альтернативы из оперативно сгенерированного множества альтернатив  $A_1, \dots, A_i, \dots, A_n$  по априорно заданному вектору приоритетов критериев  $K_1, \dots, K_j, \dots, K_s$ , не требующий привлечения экспертов и не загружающий экипаж антропоцентрического объекта необходимыми процедурами его взаимодействия с БОСЭС. При этом на каждом такте работы БОСЭС с учетом сложившейся внешней обстановки должна быть обеспечена в ее базе знаний возможность изменения (без участия экипажа!) состава альтернатив и возможность оперативной корректировки экипажем приоритетов критериев.

**2. Оперативный способ решения задач многокритериального выбора альтернативы в базах знаний БОСЭС.** Сопоставим по этапам решения задачи процедуры работы экспертов, применяемые при использовании ими метода Т. Саати, и подлежащие разработке соответствующие процедуры базы знаний БОСЭС.

2.1. Этап “Формулировка задачи МКВА”. Эксперты назначают альтернативы решения возникшей задачи и критерии оценки альтернатив. При решении задачи выбора из заданного множества альтернатив  $A_1, \dots, A_i, \dots, A_n$  предпочтительной по критериям  $K_1, \dots, K_j, \dots, K_s$  альтернативы экспертам в процессе достижения согласованности матриц парных сравнений альтернатив и достижения согласованности матрицы парных сравнений критериев приходится прибегать к корректировке постановки задачи – пересматривать состав альтернатив и состав критериев (левый столбец табл. 1). Потребность в этой корректировке возникает при необходимости тщательнее учитывать текущие возможности постановщика задачи и тщательнее интерпретировать его предпочтения.

Для замены знаний экспертов на этом этапе решения задачи в базе знаний БОСЭС должны появиться: (1) блок “Генерирования альтернатив”, в котором постоянно генерируются альтернативы по априорно заданным их типам и по текущей информации о внешней обстановке; каждая альтернатива должна содержать состав действующих в ней объектов и тип их взаимодействия; (2) блок “Оперативная корректировка вектора приоритетов критериев”.

На этом этапе решения проблемы экипажу предоставляется возможность оперативно корректировать вектор приоритетов заданных критериев, необходимость которой диктуется сложившейся внешней обстановкой (правый столбец табл. 1).

2.2. Этап “Определение матрицы приоритетов альтернатив по критериям”. В методе МКВА знания экспертов используются при составлении согласованных матриц парных сравнений альтернатив по каждому критерию. Результатом этой работы экспертов является матрица приоритетов альтернатив  $A_1, \dots, A_i, \dots, A_n$  по критериям  $K_1, \dots, K_j, \dots, K_s$  (левый столбец табл. 2).

**Таблица 1.** Оперативная корректировка постановки задачи многокритериального выбора альтернативы

Работает группа экспертов в методе Т. Саати	Работают процедуры базы знаний БОСЭС	Работает экипаж с БОСЭС
Назначение и пересмотр состава альтернатив для достижения согласованности матриц парных сравнений альтернатив по каждому критерию	Блок “Генерирование альтернатив”, в котором генерируются альтернативы по априорно заданным их типам и по текущей информации о внешней обстановке	Нет
Назначение и пересмотр состава критериев для достижения согласованности матрицы парного сравнения критериев	Корректировка по требованию экипажа приоритетов априорно заданного вектора приоритетов критериев	Оперативная (по решению экипажа) корректировка приоритетов критериев
Результат: скорректированная постановка задачи МКВА		

**Таблица 2.** Конструирование матрицы приоритета альтернатив по критериям

Работает группа экспертов в методе Т. Саати	Работают процедуры базы знаний БОСЭС	Работает экипаж с БОСЭС
Конструирование согласованных матриц парных сравнений альтернатив $A_i$ (из множества $A_1, \dots, A_i, \dots, A_n$ ) по каждому критерию $K_j$ (из множества $K_1, \dots, K_j, \dots, K_s$ )	Блок “Интеллектуальные агенты”, в котором содержатся Интел/агенты, действующие в альтернативах. Блок “Сценарий использования альтернативы”, в котором проходит мат/моделирование сценария использования каждой альтернативы $A_i$ (из множества $A_1, \dots, A_i, \dots, A_n$ ) с расчетом для нее значений критериев $K_j$ (из множества $K_1, \dots, K_j, \dots, K_s$ .)	Нет
Использование мат/процедур расчета собственных векторов матриц парных сравнений альтернатив $A_i$ по критериям $K_j$	Процедура не требуется	Нет
Конструирование матрицы приоритетов альтернатив $A_i$ по критериям $K_j$	Составление по результатам мат/моделирования всех альтернатив матрицы приоритетов альтернатив $A_i$ по критериям $K_j$	Нет
Результат: матрица приоритетов альтернатив $A_1, \dots, A_i, \dots, A_n$ по критериям $K_1, \dots, K_j, \dots, K_s$		

Эта работа экспертов заменяется в базе знаний БОСЭС процедурами, реализованными в двух блоках базы знаний: блок “Интеллектуальные агенты” и блок “Сценарий использования альтернативы”.

Блок “Интеллектуальные агенты” содержит интеллектуальные агенты (Интел/агенты), имитирующие возможности соответствующих им реальных объектов: (а) по составу информации о текущей внешней обстановке, доступной реальному объекту через его бортовые информационные системы, (б) по функциональным возможностям реальных объектов в части выполнения ими задач миссии, в части способов решения ими возникающих задач оперативного целеполагания и задач конструирования способа достижения оперативно назначенной текущей цели функционирования; (в) по возможностям его бортовых исполнительных систем реализовать управляющие сигналы, выработанные в (б). Содержащиеся в п.(а) и (в) имитаторы реальных бортовых систем реальных объектов параметрически настраиваются на функциональные возможности систем соответствующих наблюдаемых реальных объектов.

В блоке “Сценарий использования альтернативы” производится математическое моделирование применения каждой сгенерированной альтернативы с одновременным вычислением по результатам моделирования значений критериев  $K_1, \dots, K_j, \dots, K_s$  ее оценки. После последовательного моделирования всех сгенерированных альтернатив в базе знаний БОСЭС составляется мат-

Таблица 3. Расчет итоговых приоритетов альтернатив

Работает группа экспертов в методе Т. Саати	Работают процедуры базы знаний БОСЭС	Работает экипаж с БОСЭС
Конструирование согласованной матрицы парных сравнений критериев $K_1, \dots, K_j, \dots, K_s$	Используется априорно заданный вектор приоритетов критериев или вектор приоритетов критериев, скорректированный экипажем	Оперативная корректировка экипажем вектора приоритетов критериев (при необходимости)
Использование мат/процедуры расчета собственного вектора матрицы парных сравнений критериев	Процедура не требуется	Нет
Использование мат/процедуры определения итоговых приоритетов альтернатив $A_1, \dots, A_j, \dots, A_n$	Определение итоговых приоритетов альтернатив $A_1, \dots, A_j, \dots, A_n$ . Сохраняется процедура, указанная в левом столбце	Нет
Результат: матрица итоговых приоритетов альтернатив $A_1, \dots, A_j, \dots, A_n$		

рица приоритетов альтернатив  $A_1, \dots, A_j, \dots, A_n$  по критериям  $K_1, \dots, K_j, \dots, K_s$  (средний столбец табл. 2). На этом этапе привлечение экипажа к работе БОСЭС не требуется.

2.3. Этап “Определение итоговых приоритетов альтернатив”. В методе МКВА знания экспертов используются и при нахождении итоговых приоритетов альтернатив. Экспертам следует составить матрицу парных сравнений критериев и добиться ее согласованности (левый столбец табл. 3). Процедурой перемножения матрицы приоритетов альтернатив  $A_1, \dots, A_j, \dots, A_n$  по критериям  $K_1, \dots, K_j, \dots, K_s$  на вектор приоритетов критериев (левый столбец табл. 3) эксперты получают вектор итоговых приоритетов альтернатив  $A_1, \dots, A_j, \dots, A_n$ . Альтернатива с наибольшим итоговым приоритетом является решением задачи.

Эта работа экспертов в базе знаний БОСЭС заменяется аналогичной процедурой перемножения матрицы приоритетов альтернатив  $A_1, \dots, A_j, \dots, A_n$  по критериям  $K_1, \dots, K_j, \dots, K_s$ , полученной в результате моделирования всех альтернатив, на вектор приоритетов критериев, который (1) априорно задан или (2) оперативно скорректирован экипажем (правый столбец табл. 3).

Итак, на каждом такте своей работы БОСЭС рекомендует экипажу способ решения оперативно возникшей проблемы, полученный с помощью метода МКВА.

Экипаж знаком с базой знаний БОСЭС. Он знает, что из задания на миссию Антр/объекту в базу знаний БОСЭС:

- вводятся допустимые типы альтернатив, по которым в базе знаний в зависимости от текущей обстановки генерируется различный набор альтернатив  $A_1, \dots, A_j, \dots, A_n$  заданных типов, которые экипаж не знает (наборы) и менять их состав не может;
- вводится вектор приоритета критериев  $K_1, \dots, K_j, \dots, K_s$ . Содержание каждого критерия экипаж знает, изменять их состав и содержание не может, но может оперативно корректировать приоритеты критериев, ориентируясь на текущую внешнюю обстановку.

Знания экспертов позволяют им в процессе решения проблемы (см. табл. 1–3): (1) корректировать постановку задачи МКВА, (2) составлять согласованные матрицы парных сравнений альтернатив по каждому критерию, (3) составлять согласованную матрицу парных сравнений критериев, (4) определять приоритеты альтернатив по каждому критерию и составлять матрицу приоритетов альтернатив по критериям, (5) находить приоритеты критериев и (6) определять итоговые приоритеты альтернатив. Знания экспертов замещаются в базе знаний БОСЭС процедурами, которые размещаются в следующих блоках базы знаний БОСЭС: “Генерирование альтернатив”, “Интеллектуальные агенты”, “Сценарий использования альтернативы”, “Расчет итоговых приоритетов альтернатив” и “Оперативная корректировка вектора приоритета критериев” (рис. 1).

Опишем взаимодействие этих блоков, которое реализуется на каждом такте работы БОСЭС.



**Рис. 1.** База знаний БОСЭС (решение проблемы методом МКВА): (1) – транспарант оперативного конструирования экипажем вектора приоритетов критериев, (2) – скорректированный экипажем вектор приоритета критериев

В начале каждого такта работы БОСЭС в блок “Генерирование альтернатив” поступает текущая информация о сложившейся внешней обстановке (наблюдаемые типы и количество активных объектов, их текущее взаимодействие) и априорная информация о допустимых типах альтернатив. Полученные в блоке альтернативы передаются в блок “Интеллектуальные агенты”, в котором входящие в альтернативу Интел/агенты параметрически настраиваются по текущей информации о сложившейся внешней обстановке на наблюдаемые объекты.

В блоке “Сценарий использования альтернативы”: (1) последовательно вызывается из блока “Генерирование альтернатив” очередная альтернатива; (2) выполняется моделирование сценария применения выбранной альтернативы; (3) по результатам моделирования вычисляются значения критериев  $K_1, \dots, K_j, \dots, K_s$  для смоделированной альтернативы; (4) далее для моделирования вызывается следующая альтернатива и для нее также вычисляются значения критериев  $K_1, \dots, K_j, \dots, K_s$ ; (5) в результате моделирования всех сгенерированных альтернатив конструируется матрица приоритетов альтернатив по каждому критерию. Столбцы матрицы содержат значения приоритетов альтернатив по критерию, которым помечен этот столбец. Полученная матрица передается в блок “Расчет итоговых приоритетов альтернатив”.

В блоке “Расчет итоговых приоритетов альтернатив” по этой матрице и вектору приоритетов критериев (априорно заданному или оперативно скорректированному экипажем) определяется

вектор итоговых приоритетов сгенерированных альтернатив. Альтернатива с наибольшим итоговым приоритетом рекомендуется экипажу для реализации.

Отдельно остановимся на блоке “Оперативная корректировка вектора приоритетов критериев”. По запросу экипажа БОСЭС предъявляет ему на информационно управляющем поле (ИУП) транспарант (стрелка (1) на рис. 1). Используя транспарант, экипаж не более чем двумя ручными операциями корректирует вектор приоритетов критериев. Скорректированный вектор по мнению экипажа наиболее соответствует текущей внешней обстановке. Этот вектор передается (стрелка (2) рис. 1) в блок “Расчет итоговых приоритетов альтернатив”. Из этого блока на ИУП экипажу передается рекомендуемая альтернатива.

Представим блоки базы знаний БОСЭС.

**3. Блок “Генерирование альтернатив”.** В этом блоке базы знаний БОСЭС имеется фиксированный набор типов возможных альтернатив. Каждый тип содержит (априорная информация): (1) набор имен возможных активных деятелей той предметной области, для которой разрабатывается БОСЭС, (2) набор типов взаимодействий пар активных деятелей, допустимых в этой предметной области.

В блоке по информации о текущей внешней обстановке, в которой установлен тип каждого наблюдаемого активного объекта и тип выполняемых взаимодействий между этими объектами, задаются (из числа допустимых) различные варианты взаимодействий (альтернативы) между наблюдаемыми активными объектами.

Таким образом, в блоке на каждом такте работы БОСЭС генерируется текущий набор альтернатив решения возникшей проблемы. В каждой альтернативе определен состав парных взаимодействий, наблюдаемых в текущий момент активных объектов в текущей внешней обстановке.

Этот состав альтернатив определен на основе априорных знаний предметной области (набор активных агентов и набор взаимодействий между ними) и поступившей в базу знаний БОСЭС текущей информации о внешней обстановке (см. этап 1, описанный во Введении, и табл. 1 из разд. 2).

Пример реализации блока “Генерирование альтернатив”, входящего в базу знаний конкретной БОСЭС, представлен в разд. 8.

**4. Блок “Интеллектуальные агенты”.** Каждый реальный активный объект, участвующий в выполняемом этапе миссии, в базе знаний БОСЭС представляется интеллектуальным агентом (Интел/агентом) [3, 4].

Интел/агентом описываются реальные возможности соответствующего ему реального активного объекта. Интел/агент представляется тремя компонентами.

1. Информационной компонентой, имитирующей фактические возможности бортовых информационных систем реального объекта получать информацию о сложившейся внешней обстановке.

2. Компонентой миссии, имитирующей работу бортовых алгоритмов реального объекта решения задач этапов миссии и алгоритмов решения возникающих при этом задач оперативного целеполагания и задач конструирования способа достижения оперативно назначаемых текущих целей функционирования каждого реального объекта, который будет действовать в сгенерированной альтернативе.

3. Исполнительной компонентой, имитирующей фактические возможности бортовых исполнительных систем реального объекта реализовать решения, принятые компонентой миссии.

Информационная компонента Интел/агента состоит из математических моделей (далее мат/моделей) бортовых измерительных систем реального объекта. Мат/модели имитируют состав и информационные возможности его измерительных систем. Мат/модель каждой измерительной системы описывает зону внешнего пространства, из которой эта система получает информацию, состав и содержание той информации, которую имитируемая измерительная система реального объекта может передать компоненте миссии. Мат/модели бортовых измерительных систем параметрически настраиваются на возможности бортовых измерительных систем каждого наблюдаемого реального объекта.

Компонента миссии Интел/агента состоит из моделей бортовых алгоритмов реального объекта, которые имитируют бортовые алгоритмы выполнения этапов заданной объекту миссии, и алгоритмы решения возникающих при этом тактических задач [1] (задачи оперативного целеполагания и задачи конструирования способа достижения оперативно назначенной текущей цели функционирования Антр/объекта).

Исполнительная компонента Интел/агента состоит из мат/моделей исполнительных систем реального объекта, которые реализуют решения, принятые компонентой миссии Интел/агента. Мат/модели параметрически настраиваются на исполнительные системы каждого наблюдаемого активного объекта.

Пример реализации блока “Интеллектуальные агенты”, входящего в базу знаний конкретной БОСЭС, представлен в разд. 8.

**5. Блок “Сценарий использования альтернативы”.** В блоке реализованы мат/модели взаимодействий Интел/агентов, состав которых и тип их взаимодействий определены альтернативой, которая моделируется.

В блок “Сценарий использования альтернативы” входят:

- Интел/агенты, параметрически настроенные на наблюдаемые активные объекты [4];
- мат/модели взаимодействия этих Интел/агентов, взаимодействие которых определено моделируемой альтернативой;
- алгоритмы расчета (по результатам моделирования) значения априорно заданных критериев  $K_1, \dots, K_j, \dots, K_s$  для моделируемой альтернативы;
- процедура составления (по результатам моделирования всех сгенерированных альтернатив) матрицы приоритетов альтернатив по критериям, каждый столбец которой – вектор приоритета альтернатив по критерию, которым помечен этот столбец.

Итог работы блока “Сценарий использования альтернативы” после последовательного моделирования на нем всех альтернатив, сгенерированных в блоке “Генерирование альтернатив”, – матрицы приоритетов альтернатив по критериям.

Моделирование сгенерированного набора альтернатив в блоке “Сценарий использования альтернативы” заменяет работу группы экспертов, в результате которой эксперты получают матрицу приоритетов альтернатив по каждому критерию (см. этап 2, описанный во Введении, и табл. 2 из разд. 2).

Пример реализации блока “Сценарий использования альтернативы” в базе знаний конкретной БОСЭС представлен в разд. 8.

**6. Блок “Оперативная корректировка вектора приоритета критериев”.** В этом блоке по решению экипажа, принятого им на основе анализа наблюдаемой внешней обстановки, производится оперативная корректировка вектора приоритетов критериев, поступившего в базу знаний БОСЭС из задания на миссию.

Процедура корректировки экипажем вектора приоритетов критериев должна быть максимально простой и понятной экипажу, чтобы он мог быстро и безошибочно произвести требуемую корректировку.

В работе [5] показано, как для трех критериев  $K_1, K_2, K_3$  можно такой процедурой оперативно определить вектор приоритета критериев при получении от экипажа информации только об относительности важности этих критериев (см. табл. 4 из [5]).

Реализация процедуры оперативной корректировки экипажем вектора приоритета критериев выполняется на транспаранте, предъявляемом ему БОСЭС (стрелка (1) на рис. 1) на информационной части ИУП кабины экипажа (рис. 2).

На верхней строке транспаранта экипаж должен сначала назначить тип относительной важности критериев:

- “=” – одинаковая важность всех трех критериев;
- “ $1 > 2$ ” – один критерий важнее двух других;
- “ $2 > 1$ ” – два критерия важнее одного.

На нижней строке транспаранта указаны порядковые номера критериев, под которыми они предъявляются в априорно заданном векторе критериев. Экипаж должен выбрать порядковый номер того критерия, который он предпочел на первой строке транспаранта. Так, если экипажем:

- а) выбран вариант “=”, то это значит, что все критерии одинаково важны;
- б) выбран вариант “ $1 > 2$ ”, то это значит, что один критерий важнее двух остальных. Экипаж должен выбрать на нижней строке транспаранта номер этого приоритетного критерия;
- в) выбран вариант “ $2 > 1$ ”, то это значит, что два критерия важнее одного. Экипаж должен выбрать на нижней строке транспаранта номер наименее важного критерия.



Таблица 4. Относительная важность критериев

Номер варианта	Вариант назначения важности заданных критериев	Выделение критерия из заданных критериев $K_1, K_2, K_3$	Количество ручных операций	Координаты вектора приоритетов заданных критериев $K_1, K_2, K_3$
1	Одинаковая важность критериев (на рис. 2 обозначение: =)	Выделений нет	1	0.33 все
2	Один критерий важнее двух других (на рис. 2 обозначение: $1 > 2$ )	Выделить важный критерий	2	0.611 для выделенного критерия, 0.194 для двух остальных критериев
3	Два критерия важнее одного (на рис. 2 обозначение: $2 > 1$ )	Выделить два важных критерия	2	0.444 для важных критериев, 0.111 для неважного критерия

Еще раз отметим, что даже при отсутствии поступления в базу знаний БОСЭС скорректированного вектора приоритетов критериев (стрелка (2) на рис. 1) рекомендуемая экипажу альтернатива, определенная по априорно заданному вектору приоритетов альтернатив, всегда будет предьявляться ему на ИУП (рис. 1).

**7. Блок “Расчет итоговых приоритетов альтернатив”.** В блоке с использованием матрицы приоритетов альтернатив по критериям, полученной из блока “Сценарий использования альтернативы”, и заданного или скорректированного экипажем вектора приоритетов критериев рассчитываются итоговые приоритеты заданных альтернатив [2].

*Альтернатива с наибольшим итоговым приоритетом является решением проблемы. Она предьявляется экипажу антропоцентрического объекта на ИУП и рекомендуется для реализации (рис. 1).*

Пример реализации блока “Расчет итоговых приоритетов альтернатив”, входящего в базу знаний конкретной БОСЭС, представлен в разд. 8.

**8. Пример.** Используем оперативный метод многокритериального выбора альтернативы в базе знаний БОСЭС этапа полета истребителей сопровождения (ИС) “Ввод группы истребителей сопровождения в воздушный бой с истребителями противника”.

Группа ИС получила полетное задание (задание на миссию) на сопровождение ударных самолетов (УС). На этапе выполняемой миссии “Маршрут” командир группы истребителей сопровождения К(ИС)-I обнаружил истребители противника (ИП), изготовившиеся к атаке на УС. К(ИС)-I принял решение “Атаковать ИП всей группой ИС”. Интеллектуальную поддержку ему при детализации этого решения оказывает БОСЭС этапа полета “Ввод группы в воздушный бой (ВГБ) с ИП” (далее БОСЭС(ИС)-ВГБ). Эта система среди прочих рекомендаций должна рекомендовать К(ИС)-I предпочтительный вариант распределения ИП по ИС (вариант целераспределения). В базе знаний БОСЭС(ИС)-ВГБ определение наиболее предпочтительного варианта целераспределения (предпочтительной альтернативы) выполняется описанным выше методом оперативного многокритериального выбора альтернативы.

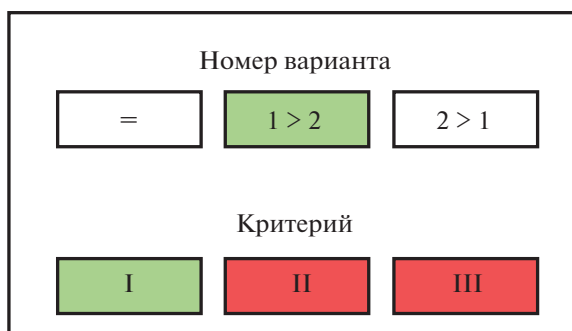


Рис. 2. Транспарант оперативной корректировки экипажем вектора приоритетов критериев

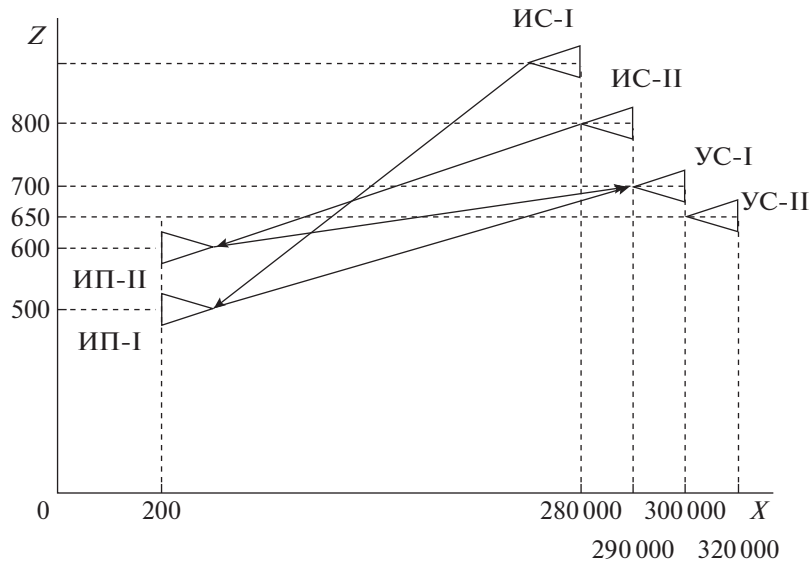


Рис. 3. Вариант целераспределения 1

Представим блоки базы знаний БОСЭС(ИС)-ВГБ (см. также рис. 1), которые реализуют представленный выше оперативный метод МКВА.

8.1. Блок “Генерирование альтернатив (вариантов целераспределения)”. Входная информация в блок поступает:

а) из задания на миссию: типы вариантов целераспределения, состав группы ИС: количество ИС, ранги в группе (командир группы К(ИС)-I, командиры подгрупп К(ИС)-II), типы ракет “воздух–воздух” на борту ИС;

б) текущая информация из бортовых измерительных систем ИС, на котором размещена БОСЭС(ИС)-ВГБ:

– обнаруженные ИП: их типы, векторы скоростей, координаты расположения, предполагаемые типы ракет “воздух–воздух” на борту ИП;

– УС: векторы скоростей, координаты расположения, траектория полета;

– ИС (по состоянию на текущий момент): количества ИС в группе, их ранги в группе (командир группы К(ИС)-I, командиры подгрупп К(ИС)-II), векторы скоростей, координаты расположения, наличные типы ракет “воздух–воздух”.

Иллюстративный пример работы блока генерирования альтернатив (вариантов целераспределения).

В примере каждые ИС, ИП и УС одного ранга и помечены их порядковыми номерами I, II.

Пусть для априорно заданного типа вариантов целераспределения “Каждому ИС назначается свой ИП” сгенерировано в блоке два варианта целераспределения (рис. 3 и 4). В вариантах указано взаимодействие объектов (кто кого атакует) следующим образом: (обозначение атакующего) – (обозначение атакуемого). Например, если ИП-I атакует УС-I, то это взаимодействие обозначается (ИП-I) – (УС-I).

Вариант целераспределения 1 (рис. 3) представим двумя следующими пересекающимися по объектам фрагментами: фрагмент 1.1: (ИП-I) – (УС-I), (ИС-I) – (ИП-I); фрагмент 1.2: (ИП-II) – (УС-I); (ИС-II) – (ИП-II).

Вариант целераспределения 2 (рис. 4) представим двумя следующими непересекающимися по объектам фрагментами: фрагмент 2.1 (ИП-I) – (УС-II), (ИС-I) – (ИП-I); фрагмент 2.2 (ИП-II) – (УС-I), (ИС-II) – (ИП-II).

8.2. Блок “Интеллектуальные агенты”. В вариантах целераспределения действуют наблюдаемые на борту К(ИС)-I объекты: ИС, УС, ИП, ракеты R (воздух–воздух). Эти объекты в базе знаний БОСЭС(ИС)-ВГБ представляются интеллектуальными агентами (Интел/агентами), которые востребованы в мат/модели блока “Сценарий использования альтернативы”.

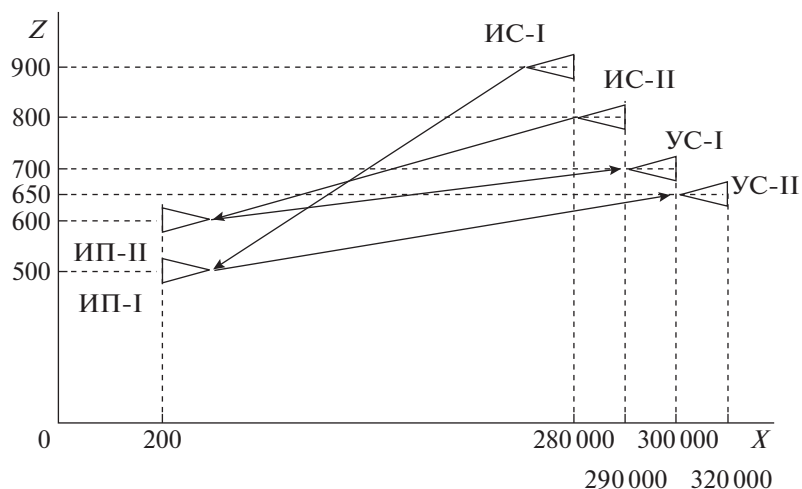


Рис. 4. Вариант целераспределения 2

Напомним, что каждый Интел/агент, представляющий функциональные возможности реального объекта, содержит три компонента: информационную компоненту, компоненту миссии, исполнительную компоненту [4]. Первая и вторая компоненты параметрически настраиваются на возможности соответствующих бортовых систем каждого наблюдаемого реального объекта.

*Объект ИП в ранге командира группы К(ИП)-I представляется Интел/агентом ИП с компонентой миссии, учитывающей его ранг.*

Информационная компонента Интел/агента ИП обеспечивает для ИП полную информацию о внешней обстановке (обеспечена осмотрительность и ситуационная осведомленность ИП [1]).

Компонента миссии Интел/агента ИП в ранге командира группы К(ИП)-I. Командир К(ИП)-I находится на этапе “Маршрут”, реализуемый группой ИП в соответствии с полученным заданием на миссию. Группа ИП установила информационный контакт с УС и ИС. Командир К(ИП)-I принял решение “Атаковать противника: УС и ИС всей группой ИП”. Для реализации этого решения К(ИП)-I должен выбрать вариант целераспределения, в котором назначаются цели (УС или ИС) для всех подчиненных ему К(ИП)-II, в том числе и для себя. Выбранный вариант целераспределения командир К(ИП)-I передает подчиненным ему К(ИП)-II и после этого меняет свой ранг К(ИП)-I на ранг К(ИП)-II.

Траектория полета группы ИП на этапе “Маршрут” задана в полетном задании.

В исполнительной компоненте Интел/агента ИП:

1) траекторию, заданную в полетном задании, реализует бортовая исполнительная система автоматического управления (САУ);

2) исполняет команду “Передать принятое целераспределение каждому К(ИП)-II”, реализует телекодированная система (ТКС);

3) меняет ранг К(ИП)-I на ранг К(ИП)-II исполнительная система “летчик + ИУП кабины экипажа”;

4) обеспечивают осмотрительность и ситуационную осведомленность К(ИП)-I исполнительные системы: ТКС, интеллектуальная информационная система “Ситуационная осведомленность экипажа (ИИС СОЭ)” [1].

*Объект ИП в ранге командира подгруппы К(ИП)-II представляется Интел/агентом ИП с компонентой миссии, учитывающей его ранг.*

Информационная компонента Интел/агента ИП обеспечивает полную информацию о внешней обстановке (реализована осмотрительность и ситуационная осведомленность К(ИП)-II [1]).

Компонента миссии Интел/агента ИП в ранге командира подгруппы К(ИП)-II. Решение для К(ИП)-II первоначальной задачи оперативного целеполагания получено от командира К(ИП)-I “Атаковать заданную цель”. При получении от К(ИП)-I цели на атаку К(ИП)-II назначает этап полета “Дальний воздушный бой с заданной целью” (далее “Атака ИП – название цели”).

*Решение задач оперативного целеполагания, выполняемое самим К(ИП)-II, и алгоритмами, реализованными в компоненте миссии Интел/агента К(ИП)-II.*

При выполнении К(ИП)-II назначенного этапа полета могут появиться коллизии “Выполняемый этап полета (выполняемая типовая ситуация (ТС)) – непосредственная угроза (НУГ)”. Каждая коллизия потребует: (1) решения соответствующей задачи оперативного целеполагания и (2) задачи конструирования способа достижения этой оперативно назначенной текущей цели полета.

Перечислим для К(ИП)-II возможные коллизии при выполнении им этапа полета ТС “Атака ИП-УС”.

Появление НУГ-1: ИС на траектории атаки на К(ИП)-II.

Коллизия “Этап полета “Атака ИП-УС” – НУГ-1”.

Решение К(ИП)-II: при отсутствии пуска ракеты  $R(ИС-ИП)$  с ИС продолжить этап полета “Атака ИП-УС”.

Появление НУГ-2: ИС осуществил пуск ракеты  $R(ИС-ИП)$ .

Коллизия “Этап полета “Атака ИП-УС” – НУГ-2”.

До попадания  $R(ИП-УС)$  в заданный ему ударный самолет К(ИП-II) решает продолжать наведение  $R(ИП-УС)$ .

В момент попадания  $R(ИП-УС)$  в атакуемый УС в случае нахождения  $R(ИС-ИП)$  от К(ИП)-II на дальности, большей  $D_{г.о}(R(ИС))$  К(ИП)-II вырабатывает последовательно решения: (1) этап полета “Противодействовать  $R(ИС-ИП)$  противоракетным маневром (обозначим “гарантированный отворот”, далее в тексте и в индексах “г.о”), и затем реализует этап полета “Атаковать атакующий ИС” (в мат. модели блока “Сценарий использования альтернативы” атака не моделируется, фиксируется только факт такой атаки).

Появление НУГ-3: ИП “свободен”.

Коллизия “ИП завершил этап полета “Атака ИП-УС” – НУГ-3”.

Решение К(ИП)-II: назначить этап полета “Полет в точку встречи ИП” (точка из задания на миссию ИП).

Появление НУГ-4: обнаружен никем не атакованный УС.

Коллизия “Этап полета “Полет в точку встречи” – НУГ-4”.

Решение К(ИП)-II: назначить этап полета “Атаковать УС”.

Исполнительная компонента Интел/агент ИП (мат/модель ИП: полет с постоянной скоростью):

1) траекторию, заданную в полетном задании, и траекторию полета в точку встречи ИП реализует САУ;

2) траектории этапа полета “Атаковать заданную цель” (мгновенный разворот ИП на траекторию параллельного сближения с заданной целью и полет по этой траектории) реализует исполнительная система САУ;

3) исполнение команды “Пуск ракеты с максимальной дальности пуска  $D_{рmax}(R(ИП-УС))$  по заданной цели” реализует система “БЦВМ-алгоритм + летчик”;

4) обеспечивают осмотрительность и ситуационную осведомленность К(ИП)-II исполнительные системы ТКС и ИИС СОЭ.

Объект ИС в ранге командира группы К(ИС)-I представляется Интел/агентом ИС с компонентой миссии, учитывающей его ранг.

Информационная компонента Интел/агента ИС обеспечивает полную информацию о внешней обстановке (обеспечена осмотрительность и ситуационная осведомленность К(ИС)-I [1]).

Компонента миссии Интел/агента ИС в ранге командира группы К(ИС)-I. Командир К(ИС)-I находится на этапе полета “Маршрут”, реализуемый в соответствии с полученным им заданием на миссию. Командир принял решение “Атаковать ИП всей группой ИС”, что соответствует подготовке этапа полета “Ввод группы ИС в воздушный бой”, который будет реализовываться группой ИС после назначения каждому ИС целей на атаку (задача целераспределения). БОСЭС(ИС)-ВГБ рекомендует К(ИС)-I для реализации вариант целераспределения. В варианте назначаются цели (ИП) для всех подчиненных ему К(ИС)-II, в том числе и для себя. После этого командир К(ИС)-I меняет свой ранг К(ИС)-I на ранг К(ИС)-II.

Рекомендуемый К(ИС)-I вариант целераспределения вырабатывается в блоках базы знаний БОСЭС(ИС)-ВГБ: “Генерирование вариантов целераспределения”, “Интеллектуальные аген-

ты”, “Сценарий использования варианта целераспределения (альтернативы)” и “Расчет итоговых приоритетов вариантов целераспределения”.

В исполнительной компоненте Интел/агент ИС:

- 1) реализует траекторию, заданную в полетном задании, исполнительная система САУ;
- 2) исполняет команду “Передать принятое целераспределение по принадлежности каждому К(ИС)-II”, реализует система ТКС;
- 3) меняет ранг К(ИС)-I на ранг К(ИС)-II исполнительная система “Летчик + ИУП кабины экипажа”;
- 4) обеспечивают осмотрительность и ситуационную осведомленность К(ИС)-I исполнительные системы ТКС и ИИС СОЭ [1].

*Объект ИС в ранге командира подгруппы К(ИС)-II представляется Интел/агентом ИС с компонентой миссии, учитывающей его ранг.*

Информационная компонента Интел/агента ИС обеспечивает полную информацию о внешней обстановке (обеспечена осмотрительность и ситуационная осведомленность К(ИП)-II [1]).

Компонента миссии Интел/агента ИС в ранге командира подгруппы К(ИС)-II. Решение для К(ИС)-II первоначальной задачи оперативного целеполагания получено от командира К(ИС)-I. При получении от К(ИС)-I цели на атаку К(ИС)-II назначает этап полета “Дальний воздушный бой с заданной целью” (этап полета “Атака ИС–ИП, который атакует УС”).

При выполнении К(ИС)-II назначенного этапа полета могут появиться коллизии “Выполняемый этап полета – НУГ”, каждая из которых потребует от К(ИС)-II решения соответствующей задачи оперативного целеполагания и задачи конструирования способа достижения этой оперативно назначенной текущей цели полета.

Перечислим для К(ИС)-II возможные коллизии при выполнении им этапа полета “Атака ИС–ИП, атакующего УС” на стадии наведения ракеты  $R(ИС-ИП)$ .

Появление НУГ-1: ИП закончил атаку УС, а  $R(ИС-ИП)$  находится в этот момент на таком удалении от ИП, когда ее наведение ИП может сорвать противоракетным маневром. ИП совершает этот маневр и затем атакует ИС.

Коллизия “Этап полета “ИС–ИП” – НУГ-1”.

Рекомендация БОСЭС(ИС)-ВГБ/решение К(ИС)-II: продолжить этап полета “Атака ИС–ИП”. В мат/модели блока “Сценарий использования альтернативы” фиксируется только факт такой атаки ИП, который используется для определения значения одного из критериев оценки альтернативы.

Появление НУГ-2: ИП закончил атаку УС, а  $R(ИС-ИП)$  находится в этот момент на таком удалении от ИП, когда ее наведение ИП уже не может сорвать противоракетным маневром и ИП будет уничтожен.

Коллизия “Этап полета “ИС–ИП” – НУГ-2”.

Рекомендация БОСЭС (ИС)-ВГБ/решение К(ИС)-II: продолжить этап полета “Атака ИС-ИП” до уничтожения ИП.

Появление НУГ-3: ИС “свободен”. Он завершил атаку ИП.

Коллизия “Завершение атаки ИС-ИП – НУГ-3”.

Рекомендация БОСЭС(ИС)-ВГБ/решение К(ИС)-II: назначить этап полета “Возврат в строй ИС”.

Появление НУГ-4: “новый” ИП на траектории атаки на УС.

Коллизия “ТС “Возврат в строй ИС” – НУГ-4: ИП свободно (безнаказанно) атакует УС”. Рекомендация БОСЭС (ИС)-ВГБ/решение К(ИС)-II: “Атаковать УС”.

В исполнительной компоненте Интел/агент ИС:

- 1) траекторию, заданную в полетном задании, реализует САУ;
- 2) команду “Атаковать заданную цель” (мгновенный разворот ИС на траекторию параллельного сближения с заданной целью и полет по этой траектории) реализует САУ;
- 3) команду “Пуск ракеты с максимальной дальности пуска  $D_{pmax}(R(ИС-ИП))$  по заданной цели” реализует система “БЦВМ-алгоритм + летчик”;
- 4) команду “Возврат в строй ИС” реализует САУ (мгновенный разворот ИС на выбранный УС, траектория параллельного сближения с УС и полет по этой траектории);

5) обеспечивают осмотрительность и ситуационную осведомленность К(ИС)-II системы ТКС и ИИС СОЭ.

Объект УС представляется Интел/агентом УС.

Информационная компонента. Не требуется.

Компонента миссии.

УС реализует полетное задание и не реагирует ни на какие коллизии.

Исполнительная компонента. САУ реализует прямолинейную траекторию из задания на миссию УС.

Объект ракета R(воздух–воздух) представляется Интел/агентом R(воздух–воздух).

Информационная компонента Интел/агента R(воздух–воздух):

а) R(воздух–воздух) на борту истребителя К(ИС)-II или К(ИП)-II:

– при получении соответственно от Интел/агента К(ИС)-II или Интел/агента К(ИП)-II координат цели и сигнала “Пуск R(ИС/ИП – заданная цель)” ракета переходит в состояние п. б);

б) R(воздух–воздух) в полете (ракета наводится на заданную цель):

– при получении от бортового измерительного устройства ракеты сигнала “Цель применила противоракетный маневр “г.о” на дальности ракеты до цели большей  $D_{г.о}(R(ИС))$ ” ракета перестает наводиться на цель (цель не поражена),

– при получении от бортового измерительного устройства ракеты сигнала “Попадание в цель” ракета уничтожает цель.

Компонента миссии Интел/агента R(воздух–воздух).

До момента поступления сигнала “Пуск R(ИС/ИП – заданная цель)” ракета находится на борту К(ИС)-II или К(ИП)-II (состояние п. а). При поступлении этой команды ракета выполняет этап полета “Наведение на заданную цель” (состояние п. б).

Исполнительная компонента Интел/агент R(воздух–воздух).

1. САУ ракеты реализует траекторию параллельного сближения с заданной целью. Полет происходит с постоянной заданной средней скоростью. При отсутствии противоракетного маневра цели на дальности до цели большей  $D_{г.о}(R(ИС))$  ракета уничтожает цель.

2. При реализации атакуемой целью противоракетного маневра “г.о” на интервале времени от момента старта ракеты до момента достижения ею дальности до цели  $D_{г.о}(ИС–ИП)$  наведение ракеты срывается и цель остается непораженной.

8.3. Блок “Сценарий использования варианта целераспределения”.  
Входная информация в блок:

– запрашиваемый вариант целераспределения, содержащий набор парных взаимодействий Интел/агентов;

– параметры для настройки мат/моделей бортовых измерительных систем и бортовых исполнительных систем наблюдаемых объектов ИС, ИП, УС, ракет R(воздух–воздух), используемых соответственно в информационных и исполнительных компонентах соответствующих Интел/агентов.

В блоке содержится мат/модель сценария использования варианта целераспределения, на которой производится моделирование взаимодействия Интел/агентов тех ИС, ИП, УС и атакующих их ракет, которые входят в поступивший вариант целераспределения. В блоке имеется процедура расчета (по результатам моделирования варианта целераспределения) значений критериев оценки вариантов целераспределения (альтернатив):

–  $K_1$ : количество сорванных атак ИП-УС (т.е. атакованный УС остался цел),

–  $K_2$ : количество сбитых ИП и ИП, отвлеченных на блокирование ИС (т.е. ИП реализовал противоракетный маневр “г.о”),

–  $K_3$ : количество сохраненных УС.

Для всех критериев справедливо: “чем больше, тем лучше”.

8.4. Пример определения приоритетного варианта целераспределения в базе знаний БОСЭС (ИС) – ВГБ. Для демонстрации работы мат/ модели в блоке “Сценарий использования альтернативы” авторы статьи разработали алгоритм имитации работы Интел/агентов во фрагментах целераспределения ИС-ИП-УС. Программная реализация этого алгоритма представлена в [6].

Моделирование фрагмента в программе [6] начинается с момента получения каждым К(ИС)-II цели на атаку в соответствии с принятым от К(ИС)-I вариантом целераспределения. При моделировании ранги истребителей К(ИС)-II и К(ИП)-II не обозначаются, а соответствующие ИС, ИП обозначаются условными порядковыми номерами (например, ИС-I, ИС-II), которые в ряде случаев опускаются. Условные порядковые номера присваиваются и УС.

Блок базы знаний БОСЭС(ИС)-ВГБ. “Сценарий использования варианта целераспределения”. В земной системе координат ХОZ на плоскости на борту К(ИС)-I наблюдаются летящие на одной высоте ИП, ИС, УС.

В блок поступает текущая информация:

- координаты и векторы скоростей ИП, ИС, УС,
- варианты целераспределения ИС (рис. 3, 4).

Все объекты (УС, ИС, ИП,  $R(ИС)$ ,  $R(ИП)$ ) в вариантах целераспределения действуют в горизонтальной плоскости ХОZ и имеют постоянные по модулю скорости полета.

Рассмотрим вариант целераспределения, имеющий следующие независимые фрагменты:

Фрагмент варианта целераспределения типа (ИС-ИП-УС):

– атака ИП-УС (ИП мгновенно ложится на траекторию параллельного сближения с УС, который летит прямолинейно с постоянным вектором скорости). На ИП  $R(ИП-УС)$  пускается с максимальной дальности пуска  $D_{pmax}(R(ИП-УС))$  и сразу летит по траектории параллельного сближения с постоянной средней скоростью  $V_{cp}(R(ИП))$ . Фиксируется время пуска (ниже это событие отмечаем индексом “п”) ракеты  $t_p(R(ИП-УС))$  и время  $t_{поп}(R(ИП-УС))$  ее попадания в УС (событие “попадание” отмечено индексом “поп”).

Начальные условия для моделирования этой части фрагмента: координаты  $x, z$  для УС, ИП; модули скоростей  $V(УС)$ ,  $V(ИП)$ , причем всегда  $V(УС) < V(ИП)$ ;  $D_{pmax}(R(ИП-УС))$ ,  $V_{cp}(R(ИП))$ .

Моделирование фрагмента завершается в момент времени  $t_{stop} = t_{поп}(R(ИП-УС))$ .

В мат/модели сценария использования варианта целераспределения реализуется:

– атака ИС-ИП (ИС мгновенно ложится на траекторию параллельного сближения с ИП); на ИС  $R(ИС-ИП)$  пускается с  $D_{pmax}(R(ИС-ИП))$  и сразу летит по траектории параллельного сближения с постоянной средней скоростью  $V_{cp}(R(ИС))$ ;

– фиксация при моделировании времени  $t_p(R(ИС-ИП))$  пуска  $R(ИС-ИП)$ , времени  $t_{г.о}(R(ИС-ИП))$  достижения  $R(ИС-ИП)$  дальности  $D_{г.о}(R(ИС))$  до атакуемого ИП и времени  $t_{поп}(R(ИС-ИП))$  попадания  $R(ИС-ИП)$  в ИП.

Для определения значения критериев  $K_1, K_2, K_3$  для этого фрагмента строится временная шкала, на которой откладываются времена пуска ракет  $R(ИП-УС)$ ,  $R(ИС-ИП)$ , время  $t_{поп}(R(ИП-УС))$  попадания  $R(ИП-УС)$  в УС, время  $t_{г.о}(R(ИС-ИП))$  достижения  $R(ИС-ИП)$  дальности  $D_{г.о}(R(ИС))$  до ИП, время  $t_{поп}(R(ИС-ИП))$  попадания  $R(ИС-ИП)$  в ИП.

В мат/модели “Сценарий использования альтернативы” результаты моделирования альтернативы обрабатываются следующим алгоритмом:

а) при  $t_{поп}(R(ИП-УС)) > t_{поп}(R(ИС-ИП))$ .

*Итог для оценки значения критериев:  $K_1$  – атака ИП-УС сорвана;  $K_2$  – ИС блокирован;*

*$K_3$  – УС не сбит.*

Если событие п. а) не случилось (моделирование фрагмента завершилось раньше определения  $t_{поп}(R(ИС-ИП))$ ), то рассматриваются следующие п. б) и в):

б) при  $t_{поп}(R(ИП-УС)) < t_{г.о}(R(ИС-ИП))$  и нет п. а):

– УС сбит (атака ИП-УС успешна), ИП и ИС целы (атака ИС-ИП сорвана, так как ИП довел свою ракету до УС и сорвал противоракетным маневром “г.о” наведение  $R(ИС-ИП)$ ).

*Использование ИП этого противоракетного маневра “г.о” в блоке “Сценарий использования варианта целераспределения” не моделируется. Фиксируются только факты его использования и атаки/блокировки ИС истребителем ИП.*

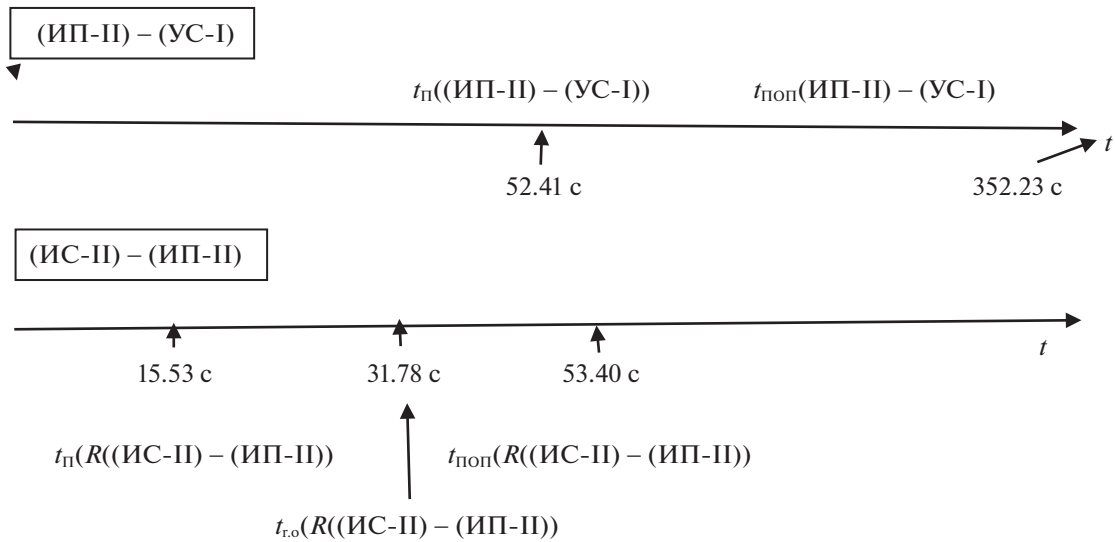


Рис. 5. Шкала абсолютного времени с результатами мат/моделирования варианта целераспределения

Итог для оценки значения критериев:  $K_1$  – атака ИП-УС не сорвана;  $K_2$  – ИС блокирован ИП;  $K_3$  – УС сбит;

в) при  $t_{\text{поп}}(R(\text{ИП-УС})) \geq t_{r.o}(R(\text{ИС-ИП}))$  и нет п. а):

– УС сбит (атака ИП-УС не сорвана), ИП сбит (атака ИС-ИП успешна, противоракетный маневр “г.о” в этих условиях не может сорвать наведение  $R(\text{ИС-ИП})$ ), ИС цел.

Итог для оценки значения критериев:  $K_1$  – атака ИП-УС не сорвана, УС сбит;  $K_2$  – ИС цел;  $K_3$  – ИП сбит.

Для примера работы блока “Сценарий использования варианта целераспределения (альтернативы)” приведем результаты мат/моделирования варианта целераспределения в группе двух УС (УС-I и УС-II) и двух ИС (ИС-I и ИС-II). Эту группу атакуют два ИП (ИП-I и ИП-II). Моделируется вариант целераспределения, состоящий из двух независимых фрагментов (рис. 4):

- фрагмент 1: ИП-I атакует УС-II, а ИС-I атакует этот ИП-I,
- фрагмент 2: ИП-II атакует УС-I, ИС-II атакует этот ИП-II.

Размещение объектов взято из рис. 4. Результаты моделирования фрагмента 2 показаны на рис. 5 и в табл. 5.

Таблица 5. Значения критериев варианта целераспределения, показанного на рис. 4

Фрагмент варианта	Критерии оценки вариантов целераспределения		
	$K_1$	$K_2$	$K_3$
Фрагмент 1: атака (ИП-I–УС-II) и атака (ИС-I–ИП-I)	0 Атака (ИП-I–УС-II) не сорвана	1 ИП-I сбит	2-1 УС-II сбит
Фрагмент 2: атака (ИП-II–УС-I) и (ИС-II–ИП-II)	0 Атака (ИП-II–УС-I) не сорвана	1 ИП-II сбит	2-1 УС-I сбит
Итог: оценка варианта целераспределения	0	2	0



**Таблица 6.** Итоговая матрица приоритетов вариантов целераспределения по критериям  $K_1, K_2, K_3$ 

Вариант целераспределения	Приоритеты по критериям вариантов целераспределения (по результатам моделирования)		
	$K_1$	$K_2$	$K_3$
Вариант № 1 (это вариант, показанный на рис. 4, значения его критериев представлены в табл. 5)	0	2	0
Вариант № 2	1	1	1
Вариант № 3	2	2	2

Пусть было промоделировано в блоке “Сценарий использования варианта целераспределения (альтернативы)” три варианта целераспределения. Итоговая матрица приоритетов вариантов целераспределения по критериям  $K_1, K_2, K_3$  показана в табл. 6.

8.5. Блок “Расчет итоговых приоритетов вариантов целераспределения (альтернатив)” в базе знаний БОСЭС (ИС) – ВГБ. Итоговая (по результатам моделирования обоих фрагментов) матрица приоритетов вариантов целераспределения по критериям  $K_1, K_2, K_3$  (табл. 6) поступает в блок “Расчет итоговых приоритетов вариантов целераспределения (альтернатив)”. В блоке поступившая матрица преобразуется в матрицу приоритетов с нормированными на единицу столбцами – нормированную матрицу приоритетов, которая принимает вид

$$\begin{pmatrix} 0 & 0.4 & 0 \\ 0.32 & 0.2 & 0.33 \\ 0.67 & 0.4 & 0.67 \end{pmatrix}.$$

Пусть К(ИС)-I принял решение на корректировку вектора критериев и назначил критерий  $K_1$  предпочтительным двум остальным критериям. Тогда в результате оперативной корректировки экипажем приоритетов критериев, согласно табл. 4, взятой из [5], в базе знаний БОСЭС(ИС)-ВГБ появится скорректированный вектор приоритетов критериев:

$$\begin{pmatrix} 0.61 \\ 0.19 \\ 0.19 \end{pmatrix}.$$

В блоке производится расчет итоговых приоритетов смоделированных вариантов целераспределения:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0.4 & 0 \\ 0.32 & 0.2 & 0.32 \\ 0.67 & 0.4 & 0.67 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0.61 \\ 0.19 \\ 0.19 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.08 \\ 0.41 \\ 0.61 \end{pmatrix}.$$

На ИУП кабины предъявляется К(ИС)-I рекомендуемый вариант целераспределения № 3, который имеет наибольший итоговый приоритет 0.61.

**Заключение.** Разработан оперативный метод многокритериального выбора альтернативы, применение которого в базах знаний БОСЭС не требует непосредственного участия экипажа. Это позволяет использовать его в базах знаний интеллектуальных систем, размещаемых как на пилотируемых, так и на беспилотных объектах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Федунов Б.Е.* Бортовые интеллектуальные системы тактического уровня для антропоцентрических объектов (примеры для пилотируемых летательных аппаратов). М.: Де Либри, 2018. 246 с.
2. *Саати Т., Керн К.* Аналитическое планирование. Теория и практика. М.: Радио и связь, 1991.
3. *Городецкий В.И.* Самоорганизация и многоакцентные системы. I. Модели агентной самоорганизации // Изв. РАН. ТиСУ. 2012. № 2. С. 92–120.
4. *Федунов Б.Е.* Интеллектуальные агенты в базах знаний бортовых оперативно советующих экспертных систем типовых ситуаций функционирования антропоцентрического объекта // Изв. РАН. ТиСУ. 2019. № 6. С. 90–102.
5. *Пиявский С.А.* Формулы для вычисления универсальных коэффициентов при принятии многокритериальных решений // Онтология проектирования. 2019. Т. 9. № 2 (32). С. 282–298.
6. *Зуб В.П., Кордонский И.Т.* Компьютерная программа моделирования заданного фрагмента варианта целераспределения. 2020. ММОАЕС“<https://yadi.sk/d/amZLhg6kb2ZoQA>.