

# ЛОГИКО-ЛИНГВИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ВЫБОРА МАРШРУТА ДВИЖЕНИЯ БТС С МИНИМАЛЬНОЙ ВЕРОЯТНОСТЬЮ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ<sup>1</sup>

А.Е. Городецкий, И.Л. Тарасова, В.Г. Курбанов

**Аннотация.** Формирование оптимальных законов управления движением беспилотных транспортных средств (БТС) на основе анализа сенсорных данных об окружении выбора, т. е. о параметрах окружающей среды и БТС, является неотъемлемой частью процесса формирования систем их ситуационного управления. Плохо предсказуемая изменчивость среды функционирования БТС и несовершенство средств измерений снижает возможность получения исчерпывающей информации о состоянии окружающей среды, что приводит к ситуации, когда принятие решения о маршруте движения с минимальными временем движения и вероятностью аварии производится в условиях неполной определенности. Одним из эффективных путей решения данной проблемы является использование логико-вероятностных и логико-лингвистических моделей и алгоритмов. Цель исследования заключается в разработке новых методов оптимизации маршрута движения БТС с учетом оценки вероятности аварии на основе логико-лингвистической классификации участков движения. Для достижения поставленной цели применяются следующие методы: создание строк параметров и характеристик эталонных участков движения и сопоставление их с логико-вероятностными и логико-лингвистическими параметрами и характеристиками классифицируемых участков маршрутов движения с учетом их значимости при принятии решения. На базе предложенных логико-вероятностных и логико-лингвистических методов после обработки сенсорных и статистических данных получены оценки вероятностей аварий, сформированы функционал и метод его минимизации, позволяющие повысить точность и скорость выбора оптимального маршрута движения БТС. Результаты исследований могут быть использованы в центральной нервной системе интеллектуальных роботов для классификации участков маршрутов движения, полученных на основе анализа сенсорных и статистических данных, что обеспечит повышение качества управления движением в условиях неполной определенности окружающей среды.

**Ключевые слова:** оптимизация, законы управления, вероятность аварии, сенсорные и статистические данные, атрибуты эталонов, логико-вероятностный и логико-лингвистический анализ и классификация.

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время крайне востребованными становятся разработки беспилотных транспортных средств (БТС), в том числе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1, 2]. Направления развития разработок БТС определяются следующими ключевыми проблемами:

- 1) увеличение длительности автономной работы;
- 2) улучшение систем навигации;
- 3) увеличение полезной нагрузки;
- 4) повышение автономности на основе применения искусственного интеллекта.

Четвертая проблема в последнее время связывается в основном с использованием нейросетевых технологий [3–7], существенными недостатками которых являются противоречивые проблемы выбора достаточной обучающей выборки, не приводящей к переобучению нейронной сети, и пробле-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания по контракту № FFNF-2021-0008121112500304-4.

ма охвата наибольшего числа возможных ситуаций выбора при принятии решений [8]. Кроме того, при формировании принципов и алгоритмов управления учитываются проблемы информационной безопасности БТС [9], но не учитываются вопросы безопасности движения при выборе оптимальных маршрутов [10, 11]. Однако предотвращение аварийных ситуаций – это главный принцип работы систем управления движением БТС и других робототехнических устройств, способных передвигаться в автоматическом режиме [12]. Для реализации этого принципа необходимо разработать алгоритмы оценки вероятности аварии на маршруте движения и выбора наиболее безопасного маршрута с учетом имеющихся ограничений. Кроме того, при решении задачи управления движением нужно учитывать дополнительные сложности, связанные с необходимостью обеспечения координации между участниками движения, каждый из которых должен удовлетворять своим кинематическим уравнениям, а также существующим фазовым ограничениям, включая динамические ограничения [13, 14], обеспечивающие минимизацию вероятности столкновения и связанных с ним рисков.

Оценки рисков носят прогнозный характер, так как их неопределенность связана с влиянием множества факторов, которые не поддаются точной оценке. Неопределенность прогнозируемых рисков вызывает возникновение ситуаций, снижающих вероятность безаварийного движения БТС по маршруту.

При оценке рисков в условиях неопределенности используют качественные и количественные методы [15–17]. Причем при качественном подходе определяются возможные виды рисков аварий на рассматриваемом маршруте, а также определяются области возникновения и источники возможных рисков [18]. Далее такой подход может служить основой для получения количественных оценок рисков. При количественном подходе определяется численное значение как отдельных рисков на отрезках маршрута, так и на маршруте в целом [19, 20]. При этом обычно используются методы, основанные на теории вероятностей и математической статистики. В этом случае необходим анализ сценариев, в рамках которых моделируется и анализируется одновременное непротиворечивое изменение всех факторов на участках маршрута с учетом их взаимозависимости. При этом множество условий реализации алгоритмов управления БТС предполагает экспертное описание условий реализации управления либо в форме сценариев (например, пессимистический, оптимистический и

наиболее вероятный), либо в виде системы ограничений на значения основных параметров реализуемого маршрута и отвечающих им показателей, характеризующих вероятность аварии.

Реализация такого подхода требует использования экспертных оценок, получаемых путем применения сложных процедур [21], начиная с выбора количества и квалификации экспертов. Результаты многоэтапной процедуры обрабатываются методами статистики и качественного анализа. Для более полного анализа рисков применяются инструменты регрессионного и корреляционного анализа, а для детализации и анализа структурно сложных маршрутов – методы в рамках логико-вероятностного подхода [22].

При прогнозировании рисков с учетом ограниченности статистических данных целесообразно создание базы эталонных участков маршрута движения, содержащей качественные атрибуты участков и их экспертные количественные оценки в виде значений функций принадлежности указанных атрибутов и значений коэффициентов их значимости, как это предлагается при логико-лингвистической классификации [23]. Тогда при сценарном подходе, использующем методы теории нечетких множеств для вычисления значений функций принадлежности, возможно ранжирование совокупности сценариев реализации маршрута путем сопоставления его с эталонными маршрутами из базы данных [24]. При этом для оценки вероятности аварии на эталонных участках маршрута движения можно использовать имитационное компьютерное моделирование движения БТС в условиях неопределенности [25], генерирующее сотни возможных комбинаций аварийных ситуаций, и имеющиеся статистические данные. Тогда после анализа результатов моделирования и данных статистики можно получить распределения вероятностей аварий на эталонных участках движения и дать интегральную оценку эффективности управления и уровня интеллекта БТС [26] после выбора оптимального маршрута движения. В частности, такой подход был применен для определения вероятностей аварий на эталонных участках движения при формировании базы данных эталонов в предлагаемом логико-лингвистическом методе. При этом ставится задача разработки метода выбора системой автоматического управления (САУ) оптимального маршрута движения БТС в процессе его движения в условиях неопределенности с применением логико-лингвистических методов отнесения участков движения к тем или иным эталонным моделям, для которых ранее были определены оценки рисков или вероятностей возникновения аварийных ситуаций.



## 1. ЗАДАЧА РАНЖИРОВАНИЯ МАРШРУТОВ ДВИЖЕНИЯ

Обычно при решении задачи поиска наилучших сочетаний законов управления движением БТС требуется найти такое управление, которое обеспечивало бы минимизацию функционала

$$J_i = k_T T_i + k_R P_i,$$

где  $T_i = t_{if} - t_{i0}$  – время перевода  $i$ -го ( $i=1,2,\dots$ ) БТС, находящегося в момент времени  $t_0$  в точке  $s_i$  окружающего ограниченного пространства  $L^3 \subset E^3$ , ( $E^3$  – трехмерное евклидово пространство), в целевую точку  $f_i$  этого пространства к моменту времени  $t_f$ ;  $k_T$  – коэффициент значимости скорости достижения цели, значение которого устанавливается экспертом или группой экспертов;  $P_i$  – оценка вероятности аварии с участием  $i$ -го БТС при движении по маршруту за время  $T_i$ ;  $k_P$  – коэффициент значимости оценки вероятности аварии, значение которого устанавливается экспертом или группой экспертов.

В предлагаемом методе САУ БТС вначале необходимо определить время движения БТС на всех возможных маршрутах движения. Поэтому с учетом имеющихся логико-вероятностных, логико-лингвистических и других ограничений для вычисления произведения  $J(R_v) = k_T T_i$  на каждом маршруте движения  $R_v$ , САУ БТС необходимо вычислить значение функционала [3]

$$J(R_v) = k_T \left( \sum_{i,j} a \frac{L_{ij}}{V_{ij}} + \sum_{i,j} b \frac{\Psi_{ij}}{W_{ij}} + \sum_{i,j} c \tau_{i,j} \right), \quad (1)$$

где  $a, b, c$  – коэффициенты предпочтения;  $V_{ij}$  – линейная и  $W_{ij}$  – угловая скорости движения, связанные с окружающей средой, – например, влажностью воздуха и температурой;  $\tau_{ij}$  – время задержки на перекрестке, зависящее от типа и загрузки перекрестка,  $\Psi_{ij}$  – углы поворота на перекрестках;  $L_{ij}$  – длины участков между перекрестками.

Как показано в работе [23], значения  $(i,j)$  – это элемент упорядоченного множества, характеризующий рассматриваемый маршрут движения от начальной точки к конечной.

После вычисления значений функционала (1) для всех возможных маршрутов движения БТС из точки  $s_i$  в точку  $f_i$  они могут быть ранжированы по времени прибытия в точку  $f_i$ . Однако наиболее быстрый маршрут может оказаться и наиболее аварийно опасным. Поэтому следующим шагом в поиске оптимального маршрута движения должно быть ранжирование маршрутов  $R_v$  по вероятности аварии  $P_i(R_v)$ .

## 2. БАЗА ДАННЫХ ЭТАЛОНОВ УЧАСТКОВ ДВИЖЕНИЯ

В предлагаемом методе при определении вероятности аварии на маршрутах движения БТС и, соответственно, произведения  $k_R P_i$  применяется алгоритм логико-лингвистической классификации участков маршрутов движения, т. е. отнесения анализируемого участка движения БТС к одному из эталонов. Этот алгоритм, как показано в работе [23], обладает высокой скоростью и эффективностью работы. Для его реализации в процессе разработки САУ БТС создается база данных эталонов участков движения, содержащая строки их параметров (атрибутов) и значения вероятности аварии на участке движения, определенные заранее на основе имитационного моделирования и статистических данных. При этом в строках атрибутов наличие какого-либо атрибута соответствует единице, а отсутствию – нулю.

Каждый маршрут содержит некоторое количество участков движения на перекрестке и участков движения между перекрестками. Поэтому в базе данных будут строки, характеризующие движение на перекрестке, и строки, характеризующие движение между перекрестками. Приведем пример эталонных строк из базы данных (табл. 1–8).

### 2.1. База данных эталонных строк для перекрестков

Таблица 1

Варианты проезда перекрестков

Строка базы данных	Вид перекрестка, направление движения	Вероятность аварии
$C_1 = /10000000000/$	┘ с проездом направо	$P_{C1} = 0,12$
$C_2 = /01000000000/$	┘ с проездом налево	$P_{C2} = 0,15$
$C_3 = /00100000000/$	┘ с проездом прямо	$P_{C3} = 0,13$
$C_4 = /00010000000/$	┘ с проездом направо	$P_{C4} = 0,11$
$C_5 = /00001000000/$	┘ с проездом прямо	$P_{C5} = 0,14$
$C_6 = /00000100000/$	┘ с проездом налево	$P_{C6} = 0,17$
$C_7 = /00000010000/$	┘ с проездом прямо	$P_{C7} = 0,18$
$C_8 = /00000001000/$	┘ с проездом направо	$P_{C8} = 0,16$
$C_9 = /00000000100/$	┘ с проездом налево	$P_{C9} = 0,20$
$C_{10} = /00000000010/$	┘ с проездом налево	$P_{C10} = 0,10$
$C_{11} = /00000000001/$	┘ с проездом направо	$P_{C11} = 0,09$

Таблица 2

**Углы поворота**

Строка базы данных	Угол и направление поворота	Вероятность аварии
$\Psi_1 = /100000000/$	$-180^\circ$ (налево)	$P_{\Psi_1} = 0,11$
$\Psi_2 = /010000000/$	$-135^\circ$ (налево)	$P_{\Psi_2} = 0,12$
$\Psi_3 = /001000000/$	$-90^\circ$ (налево)	$P_{\Psi_3} = 0,13$
$\Psi_4 = /000100000/$	$-45^\circ$ (налево)	$P_{\Psi_4} = 0,14$
$\Psi_5 = /000010000/$	$0^\circ$ (прямо)	$P_{\Psi_5} = 0,06$
$\Psi_6 = /000001000/$	$+45^\circ$ (направо)	$P_{\Psi_6} = 0,10$
$\Psi_7 = /000000100/$	$+90^\circ$ (направо)	$P_{\Psi_7} = 0,09$
$\Psi_8 = /000000010/$	$+135^\circ$ (направо)	$P_{\Psi_8} = 0,08$
$\Psi_9 = /000000001/$	$+180^\circ$ (направо)	$P_{\Psi_9} = 0,07$

Таблица 3

**Угловые скорости**

Строка базы данных	Угловая скорость, град./с	Вероятность аварии
$W_1 = /1000/$	2	$P_{W_1} = 0,10$
$W_2 = /0100/$	4	$P_{W_2} = 0,11$
$W_3 = /0010/$	6	$P_{W_3} = 0,12$
$W_4 = /0001/$	8	$P_{W_4} = 0,13$

Таблица 4

**Число полос движения**

Строка базы данных	Число полос движения	Вероятность аварии
$S_1 = /1000/$	1	$P_{S_1} = 0,10$
$S_2 = /0100/$	2	$P_{S_2} = 0,12$
$S_3 = /0010/$	3	$P_{S_3} = 0,13$
$S_4 = /0001/$	4	$P_{S_4} = 0,14$

**2.2. База данных эталонных строк для участков движения между перекрестками**

Таблица 5

**Скорость движения**

Строка базы данных	Скорость движения, м/с	Вероятность аварии
$V_1 = /1000/$	5	$P_{V_1} = 0,10$
$V_2 = /0100/$	10	$P_{V_2} = 0,11$
$V_3 = /0010/$	15	$P_{V_3} = 0,12$
$V_4 = /0001/$	20	$P_{V_4} = 0,13$

Таблица 6

**Число полос движения**

Строка базы данных	Число полос движения	Вероятность аварии
$S_1 = /1000/$	1	$P_{S_1} = 0,10$
$S_2 = /0100/$	2	$P_{S_2} = 0,12$
$S_3 = /0010/$	3	$P_{S_3} = 0,13$
$S_4 = /0001/$	4	$P_{S_4} = 0,14$

Таблица 7

**Время суток**

Строка базы данных	Время суток	Вероятность аварии
$T_1 = /10000/$	от 0 до 6 часов	$P_{T_1} = 0,10$
$T_2 = /01000/$	от 6 до 10 часов	$P_{T_2} = 0,13$
$T_3 = /00100/$	от 10 до 15 часов	$P_{T_3} = 0,15$
$T_4 = /00010/$	от 15 до 20 часов	$P_{T_4} = 0,14$
$T_5 = /00001/$	от 20 до 24 часов	$P_{T_5} = 0,20$

Таблица 8

**Длина участка движения**

Строка базы данных	Длина участка движения	Вероятность аварии
$L_1 = /10000/$	очень короткая, 200 м	$P_{L_1} = 0,10$
$L_2 = /01000/$	короткая, 400 м	$P_{L_2} = 0,12$
$L_3 = /00100/$	средняя, 600 м	$P_{L_3} = 0,13$
$L_4 = /00010/$	большая, 800 м	$P_{L_4} = 0,14$
$L_5 = /00001/$	очень большая, 1000 м	$P_{L_5} = 0,15$

**3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ АВАРИИ НА МАРШРУТЕ ДВИЖЕНИЯ**

Для ранжирования маршрутов  $R_i$  по вероятности аварии  $P_i(R_i)$  САУ БТС для каждого анализируемого маршрута движения создает список входящих в них перекрестков. Затем для каждого из списка перекрестков сенсорная система САУ БТС определяет примерные значения их параметров, соответствующих атрибутам эталонных строк, и путем фаззификации этих значений определяет значения функций принадлежности к атрибутам соответствующих эталонных строк. После этого САУ БТС проводит классификацию анализируемых строк для перекрестков путем сопоставления их с эталонными строками из базы данных по алгоритму, описанному в работе [23], и присваивает значения вероятностей аварий, соответствующие выявленным эталонам, и далее вычисляет вероятности аварий на всех перекрестках и суммарную вероятность аварии на перекрестках по всему маршруту.

Например, некоторый анализируемый перекресток характеризуется следующими значениями параметров (атрибутов): вид  $\perp$  с проездом прямо; число полос движения 1; угол поворота  $30^\circ$ ; угловая скорость 5,6 град./с.

В этом случае характеризующая вид проезда перекрестка строка будет иметь вид /00001000000/ и в результате классификации с применением ло-



гико-лингвистического алгоритма [23] она будет отнесена к эталону  $C_5$ , для которого вероятность аварии  $P_{C_5} = 0,14$ . Характеризующая число полос движения строка /1000/ будет классифицирована как эталон  $S_1$  с вероятностью аварии  $P_{S_1} = 0,10$ . Характеризующая угол поворота строка после фаззификации примет вид /0 0 0 0 0,3 0,7 0 0 0/ и будет классифицирована как эталон  $\Psi_6$  с вероятностью аварии  $P_{\Psi_6} = 0,10$ . Характеризующая угловую скорость строка после фаззификации примет вид /0 0,3 0,7 0 / и будет классифицирована как эталон  $W_3$  с вероятностью аварии  $P_{W_3} = 0,12$ .

При проезде перекрестка возможны аварии либо при событии  $C_i$  ( $i=1,2,\dots$ ), либо при  $\Psi_j$  ( $j=1,2,\dots$ ), либо при  $W_q$  ( $q=1,2,\dots$ ), либо при  $S_g$  ( $g=1,2,\dots$ ), которым соответствуют вероятности аварий  $P_{C_i}$ ,  $P_{\Psi_j}$ ,  $P_{W_q}$  и  $P_{S_g}$ . Тогда в соответствии с правилами вычисления вероятности логической функции, логическая функция  $F_{1,2,\dots,n}$  в алгебре Жегалкина [27] имеет вид:

$$F_{1,2,\dots,n} \leftrightarrow f_1 \oplus f_2 \oplus f_3 \oplus \dots \oplus f_n,$$

где  $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$  – логические функции или переменные (события); символ  $\oplus$  обозначает сложение по модулю 2, а символ  $\leftrightarrow$  – эквивалентность. В соответствии с изложенным в работе [24] вероятность аварии при проезде такого перекрестка ( $n = 4$ ) будет равна

$$\begin{aligned} P = & (-2)^0(P_{C_i} + P_{\Psi_j} + P_{W_q} + P_{S_g}) + \\ & + (-2)^1(P_{C_i}P_{\Psi_j} + P_{C_i}P_{W_q} + P_{C_i}P_{S_g} + P_{\Psi_j}P_{W_q} + \\ & + P_{\Psi_j}P_{S_g} + P_{W_q}P_{S_g}) + (-2)^2(P_{C_i}P_{\Psi_j}P_{W_q} + \\ & + P_{C_i}P_{\Psi_j}P_{S_g} + P_{C_i}P_{W_q}P_{S_g} + P_{\Psi_j}P_{W_q}P_{S_g}) + \\ & + (-2)^3(P_{C_i}P_{\Psi_j}P_{W_q}P_{S_g}). \end{aligned} \quad (2)$$

При большом количестве логических функций ( $n > 8$ ) можно, согласно изложенному в работе [24], воспользоваться приближенным вычислением вероятности, ограничившись 8–10 членами ряда. Если на маршруте движения будет  $N$  перекрестков, то для каждого из них аналогично с использованием фаззификации, классификации и формулы вида (2) вычисляются значения вероятностей аварии, а затем по формуле вида (2) вычисляется вероятность аварии на всех перекрестках маршрута  $P_N$ .

После этого для каждого анализируемого маршрута движения САУ БТС создает список входящих в них участков между перекрестками. Для каждого из списка участков между перекрестками сенсорная система САУ БТС определяет примерные значения их параметров, соответствующих атрибутам эталонных строк, и путем фаззификации этих значений определяет значения функций принадлежности к атрибутам соответствующих

эталонных строк. После этого САУ БТС проводит классификацию анализируемых строк для участков между перекрестками путем сопоставления их с эталонными строками из базы банных по алгоритму, описанному в работе [24], присваивает значения вероятностей аварий, соответствующие выявленным эталонам и далее вычисляет значения вероятностей аварий на всех участках между перекрестками и суммарную вероятность аварии на участках между перекрестками по всему маршруту.

Например, некоторый анализируемый участок между перекрестками характеризуется следующими значениями параметров (атрибутов): число полос движения 1; время проезда 8 часов; линейная скорость 12,7 м/с; протяженность 500 м.

В этом случае характеризующая число полос движения строка будет иметь вид /1000/ и будет классифицирована как эталон  $S_1$  с вероятностью аварии  $P_{S_1} = 0,10$ . Характеризующая время проезда строка будет иметь вид /01000/ и будет классифицирована как эталон  $T_2$  с вероятностью аварии  $P_{T_2} = 0,13$ . Характеризующая линейную скорость строка после фаззификации примет вид /0 0,45 0,55 0/ и будет классифицирована как эталон  $V_3$  с вероятностью аварии  $P_{V_3} = 0,12$ . Характеризующая протяженность участка строка после фаззификации примет вид /0 0,5 0,5 0 / и в результате классификации может быть отнесена в равной степени к эталону  $L_2$  с вероятностью аварии  $P_{L_2} = 0,12$  или к эталону  $L_3$  с вероятностью аварии  $P_{L_3} = 0,13$ . Поэтому вероятность аварии, связанной с протяженностью участка между перекрестками, будем оценивать по среднему значению  $(P_{L_2} + P_{L_3})/2 = 0,125$ .

При проезде участка между перекрестками возможны аварии либо при событии  $T_i$  ( $i=1,2,\dots$ ) либо при  $V_j$  ( $j=1,2,\dots$ ), либо при  $L_q$  ( $q=1,2,\dots$ ), либо при  $S_g$  ( $g=1,2,\dots$ ), которым соответствуют вероятности аварий  $P_{T_i}$ ,  $P_{V_j}$ ,  $P_{L_q}$  и  $P_{S_g}$ . Тогда в соответствии с изложенным в работе [12] вероятность аварии при проезде такого перекрестка ( $n = 4$ ) будет равна

$$\begin{aligned} P = & (-2)^0(P_{T_i} + P_{V_j} + P_{L_q} + P_{S_g}) + \\ & + (-2)^1(P_{T_i}P_{V_j} + P_{T_i}P_{L_q} + P_{T_i}P_{S_g} + P_{V_j}P_{L_q} + \\ & + P_{V_j}P_{S_g} + P_{L_q}P_{S_g}) + (-2)^2(P_{T_i}P_{V_j}P_{L_q} + \\ & + P_{T_i}P_{V_j}P_{S_g} + P_{T_i}P_{L_q}P_{S_g} + P_{V_j}P_{L_q}P_{S_g}) + \\ & + (-2)^3(P_{T_i}P_{V_j}P_{L_q}P_{S_g}). \end{aligned} \quad (3)$$

Если на маршруте движения будет  $M$  участков между перекрестками, то для каждого из них аналогично с использованием фаззификации, классификации и формулы вида (3) вычисляются значе-

ния вероятностей аварии, а затем по формуле вида (3) вычисляется вероятность аварии  $P_M$  на всех участках между перекрестками маршрута.

Далее производится вычисление вероятности аварии на всех анализируемых маршрутах  $R_v$  по формуле

$$P(R_v) = P_N(R_v) + P_M(R_v) - 2 P_N(R_v) P_M(R_v).$$

#### 4. РАНЖИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТОВ ДВИЖЕНИЯ

В связи с неполной определенностью окружающей среды при движении БТС по анализируемому маршруту при вычислении функционала (1) необходимо учитывать ограничения, описываемые в виде логико-вероятностных и логико-лингвистических уравнений по модулю 2 [25]. Эти ограничения, как показано в работе [14], можно свести к логико-интервальным. В этом случае для каждого анализируемого маршрута  $R_v$  будут получены два значения функционала (1),  $\min J(R_v)$  и  $\max J(R_v)$ . Поэтому выбрав значения коэффициента  $k_p$ , в целях ранжирования маршрутов  $R_v$  нужно для каждого маршрута вычислить по два значения функционалов:

$$\min J_v = \{\min\{k_T J_T(R_v)\} + \min\{k_P P(R_v)\}\}; \quad (6)$$

$$\max J_v = \{\max\{k_T J_T(R_v)\} + \max\{k_P P(R_v)\}\}. \quad (7)$$

Обычно значения  $\min\{k_P P(R_v)\}$  и  $\max\{k_P P(R_v)\}$  совпадают, а  $\min\{k_T J_T(R_v)\}$  и  $\max\{k_T J_T(R_v)\}$  – нет. Поэтому ранжирование проводят по минимуму и максимуму или по среднему значению:

$$J_v = 1/2(\max J_v + \min J_v).$$

При этом выбор оптимального маршрута движения БТС может зависеть от мнения эксперта или группы экспертов.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выборе оптимального маршрута движения беспилотных транспортных средств необходимо исходить из условия минимизации вероятности возникновения аварийных ситуаций. Для этого разрабатываются различные алгоритмы оценок рисков аварий на каждом этапе планирования маршрута движения с учетом «воспринимаемого» на нем участка местности.

Оценки рисков носят прогнозный характер, так как их неопределенность связана с влиянием множества факторов, которые не поддаются точным

математическим описаниям. Поэтому при создании базы данных эталонов участков движения численные значения вероятностей аварий на эталонных участках определяются на этапе проектирования САУ БТС путем использования имитационного моделирования и статистических данных. При этом прогнозирование рисков аварии при ограниченности статистических данных целесообразно осуществлять с применением логико-лингвистических и логико-вероятностных методов, для реализации которых создаются базы данных эталонных участков маршрута движения, содержащих качественные атрибуты участков и полученные после моделирования значения вероятностей аварий.

При определении САУ БТС вероятности аварии на маршруте движения сенсорная система САУ БТС определяет количественные значения атрибутов на участках движения. Далее путем их фаззификации система определяет значения функций принадлежности для указанных атрибутов и создает из них строки, аналогичные эталонным строкам из базы данных. Затем САУ БТС находит для каждого анализируемого участка движения наиболее близкую эталонную строку из базы данных и присваивает анализируемому участку значение вероятности аварии, соответствующее выбранному эталону. Используя полученные значения вероятностей аварий на участках движения, САУ БТС вычисляет вероятность аварии на всем маршруте с использованием правил вычисления вероятности логических функций «либо».

При выборе оптимального маршрута движения необходимо соблюдать компромисс между временем движения по маршруту и вероятностью аварии и осуществлять поиск минимума функционала, представляющего собой сумму времени движения, умноженного на установленный коэффициент значимости, и вероятности аварии, также умноженной на установленный коэффициент значимости. Указанные коэффициенты значимости устанавливаются экспертами и заносятся в базу данных САУ БТС на этапе ее формирования. Обычно вычисленный функционал имеет интервальное значение, поэтому выбор оптимального маршрута будет зависеть от предпочтений эксперта.

Рассмотренные задачи потребуют, наряду с применением традиционных подходов, использования технологий искусственного интеллекта при определении вероятностей аварий на эталонных участках. Подчеркнем, что ранее задачи поиска оптимальных маршрутов рассматривались только ограниченно и вероятности возникновения аварийных ситуаций не учитывались.



## ЛИТЕРАТУРА

1. *Евтодьева М.Г., Целицкий С.В.* Беспилотные летательные аппараты военного назначения: тенденции в сфере разработок и производства // Пути к миру и безопасности. — 2019. — № 2 (57). — С. 104–111. [*Evtod'eva, M.G., Celickij, S.V.* *Bespilotnye letatel'nye apparaty voennogo naznacheniya: tendencii v sfere razrabotok i proizvodstva // Puti k miru i bezopasnosti.* — 2019. — № 2 (57). — S. 104–111. (In Russian)]
2. *Divis, D.A.* Military UAV Market to Top \$83B // Inside Unmanned Systems. 24.04.2018. URL: <http://insideunmannedsystems.com/military-uav-market-to-top-83b>.
3. *Li, C.* Artificial Intelligence Technology in UAV Equipment // 2021 IEEE/ACIS 20th International Fall Conference on Computer and Information Science (ICIS Fall). — Xi'an, China, 2021. — P. 299–302. — DOI: 10.1109/ICISFall51598.2021.9627359.
4. *Xia, C. and Yudi, A.* Multi — UAV Path Planning Based on Improved Neural Network // 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). — Shenyang, China, 2018. — P. 354–359. — DOI: 10.1109/CCDC.2018.8407158.
5. *Varatharasan, V., Rao, A.S.S., Toutounji, E., et al.* Target Detection, Tracking and Avoidance System for Low-cost UAVs using AI-Based Approaches // 2019 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED UAS). — Cranfield, UK, 2019. — P. 142–147. — DOI: 10.1109/REDUAS47371.2019.8999683.
6. *Zheng, L., Ai, P., and Wu, Y.* Building Recognition of UAV Remote Sensing Images by Deep Learning // IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. — Waikoloa, HI, USA, 2020. — P. 1185–1188. — DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323322.
7. *Zhang, Y., McCalmon, J., Peake, A., et al.* A Symbolic-AI Approach for UAV Exploration Tasks // 2021 7th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA). — Prague, Czech Republic, 2021. — P. 101–105. — DOI: 10.1109/ICARA51699.2021.9376403.
8. *Аггарвал Ч.* Нейронные сети и глубокое обучение: учебный курс. Пер. с англ. — СПб.: Диалектика, 2020. — 752 с. [*Aggarval, C.* *Neural Networks and Deep Learning. A Textbook.* — Springer International Publishing, 2018.]
9. *Kim, H., Ben-Othman, J., Mokdad, L., et al.* Research Challenges and Security Threats to AI-Driven 5G Virtual Emotion Applications Using Autonomous Vehicles, Drones, and Smart Devices // IEEE Network. — 2020. — Vol. 34, no. 6. — P. 288–294. — DOI: 10.1109/MNET.011.2000245.
10. *Ким М.Л., Костеренко В.Н., Певзнер Л.Д. и др.* Система автоматического управления тракторным движением шахтного беспилотного летательного аппарата // Горная промышленность. — 2019. — № 3 (145). — С. 60–64. [*Kim, M.L., Kosterenko, V.N., Pevzner, L.D., et al.* *Sistema avtomaticheskogo upravleniya traktornym dvizheniem shakhtnogo bespilotnogo letatel'nogo apparata // Gornaya promyshlennost'.* — 2019. — № 3 (145). — S. 60–64 (In Russian)]
11. *Кутахов В.П., Мещеряков Р.В.* Управление групповым поведением беспилотных летательных аппаратов: постановка задачи применения технологий искусственного интеллекта // Проблемы управления. — 2022. — № 1. — С. 67–74. [*Kutahov, V.P., Meshcheryakov, R.V.* *Group Control of Unmanned Aerial Vehicles: A Generalized Problem Statement of Applying Artificial Intelligence Technologies // Control Sciences.* — 2022. — No. 1. — P. 55–60. — DOI: <http://doi.org/10.25728/cs.2022.1.5>]
12. *Долгий П.С., Немыкин Г.И., Думитраш Г.Ф.* Беспилотное управление транспортными средствами // Молодой ученый. — 2019. — № 8.2 (246.2). — С. 13–15. [*Dolgiy, P.S., Nemykin, G.I., Dumitrash, G.F.* *Bespilotnoe upravlenie transportnymi sredstvami // Molodoi uchenyi.* — 2019. — No. 8.2 (246.2). — S. 13–15. (In Russian)]
13. *Власов С.М., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В.* Бесконтактные средства локальной ориентации роботов. — СПб.: Университет ИТМО, 2017. — 169с. [*Vlasov, S.M., Boikov, V.I., Bystrov, S.V., Grigor'ev, V.V.* *Beskontaktnye sredstva lokal'noi orientatsii robotov.* — SPb.: Universitet ITMO, 2017. — 169s. (In Russian)]
14. *Gorodetskiy A.E., Tarasova I.L., Kurbanov V.G.* Reduction of Logical-Probabilistic and Logical-Linguistic Constraints to Interval Constraints in the Synthesis of Optimal SEMS / In: Smart Electromechanical Systems. Group Interaction. Eds. Gorodetskiy Andrey E., Tarasova Irina L. / Studies in Systems, Decision and Control. — Springer International Publishing, 2019. — Vol. 174. — P. 77–90. — DOI:10.1007/978-3-319-99759-9\_7.
15. *Москвин В.А.* Риски инвестиционных проектов. — М.: Курс: ИНФРА-М, 2016. — 320 с. [*Moskvin, V.A.* *Riski investitsionnykh projektov.* — М.: Kurs: INFRA-M, 2016. — 320 s. (In Russian)]
16. *Решетняк Е.И.* Методы оценки инвестиционных рисков в бизнес-планировании // БИЗНЕС ИНФОРМ. — 2017. — №12. — С.189–194. [*Reshetnyak, E.I.* *Metody otsenki investitsionnykh riskov v biznes-planirovanii // BIZNES INFORM.* — 2017. — №12. — S.189–194. (In Russian)]
17. *Попова А.Ю.* Оценка риска инвестиционного проекта. // Научный журнал КубГАУ. — 2006. — №19. — С. 73–98. [*Popova, A.Yu.* *Otsenka riska investitsionnogo projekta. // Nauchnyi zhurnal KuBGU.* — 2006. — №19. — S. 73–98. (In Russian)]
18. *Кулик Ю. А., Волович В. Н., Привалов Н. Г., Козловский А. Н.* Классификация и качественная оценка рисков инновационных проектов // Записки Горного института. — 2012. — Т. 197. — С.124–128. [*Kulik, Yu.A., Volovich, V.N., Privalov, N.G., Kozlovskii, A.N.* *Klassifikatsiya i kachestvennaya otsenka riskov innovatsionnykh projektov // Zapiski Gornogo instituta.* — 2012. — Vol. 197. — S.124–128. (In Russian)]
19. *Ведмедь И.Ю.* Анализ количественных методов оценки рисков инвестиционных проектов // «Вероятностные математические модели экономических процессов»: XII конференция «Российские регионы в фокусе перемен»: Сборник трудов. — Екатеринбург, 2017. — С. 52–61. [*Vedmed', I.Yu.* *Analiz kolichestvennykh metodov otsenki riskov investitsionnykh projektov // «Veroyatnostnye matematicheskie modeli ehkonomicheskikh protsessov»: XII konferentsiya «Rossiiskie regiony v fokuse peremen»: Sbornik trudov.* — Ekaterinburg, 2017. — S. 52–61. (In Russian)]
20. *Королькова Е.М.* Риск-менеджмент: управление проектными рисками. — Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. — 159 с. [*Korol'kova, E.M.* *Risk-menedzhment: upravlenie projektными riskami.* — Tambov: FGBOU VPO «TGTU», 2013. — 159 s. (In Russian)]
21. *Миркин Б.Г.* Проблема группового выбора. — М.: Наука, 1974. — 256 с. [*Mirkin, B.G.* *Problema gruppovogo vybora.* — М.: Nauka, 1974. — 256 s. (In Russian)]
22. *Соложенцев Е.Д.* Управление риском и эффективностью в экономике: логико-вероятностный подход. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2009. — 242 с. [*Solozhentsev, E.D.* *Upravlenie riskom i ehffektivnost'yu v ehkonomike: logiko-veroyatnostnyi podkhod.* — SPb.:Izd-vo SPBGU, 2009. — 242 s. (In Russian)]

23. Gorodetskiy, A.E., Tarasova, I.L., Kurbanov, V.G. Classification of Images in Decision Making in the Central Nervous System of SEMS / In: Smart Electromechanical Systems. Behavioral Decision Making. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova / Studies in Systems, Decision and Control. – Springer Nature Switzerland AG, 2021. – Vol. 352. – P. 187–196. – DOI: <http://doi.org/10.1007/978-3-030-68172-2-15>
24. Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л. Способ классификации изображений: Патент РФ № 2756778. Зарег. 05.10.2021. [Gorodetskiy, A.E., Kurbanov, V.G., Tarasova, I.L. Sposob klassifikatsii izobrazhenii. Patent RF no. 2756778. Registered 05.10.2021. (In Russian)]
25. Городецкий А.Е., Тарасова И.Л. Нечеткое математическое моделирование плохо формализуемых процессов и систем. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — 335 с. [Gorodetskiy, A.E., Tarasova, I.L. Nechetkoe matematicheskoe modelirovanie plokho formalizuemyykh protsessov i sistem. — SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2010. — 335 с. (In Russian)]
26. Gorodetskiy, A.E., Tarasova, I.L., Kurbanov, V.G. Assessment of UAV Intelligence Based on the Results of Computer Modeling/ In: Smart Electromechanical Systems. Eds. Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova / Studies in Systems, Decision and Control. – Springer Nature Switzerland AG, 2022. – Vol. 419. – P. 105–116. – DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-97004-8\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-97004-8_8)
27. Жегалкин И.И. Арифметизация символической логики // Математический сборник. — 1928. — Т. 35. — Вып. 3–4. — С. 311–377. [Zhegalkin, I.I. Arifmetizatsiya simvolicheskoi logiki // Matematicheskii sbornik. — 1928. — Vol. 35, iss. 3–4. — S. 311–377. (In Russian)]

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Р.В. Мецераковым.*

*Поступила в редакцию 20.04.2022,  
после доработки 23.08.22.  
Принята к публикации 5.09.2022.*

**Городецкий Андрей Емельянович** – д.т.н.,  
✉ [g27764@yandex.ru](mailto:g27764@yandex.ru)

**Тарасова Ирина Леонидовна** – к.т.н., ✉ [g17265@yandex.ru](mailto:g17265@yandex.ru)

**Курбанов Вугар Гариб оглы** – к.ф.-м.н.,  
✉ [vugar\\_borchali@yahoo.com](mailto:vugar_borchali@yahoo.com)

Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург





# A LOGICAL-LINGUISTIC ROUTING METHOD FOR UNMANNED VEHICLES WITH THE MINIMUM PROBABILITY OF ACCIDENTS

A.E. Gorodetskiy<sup>1</sup>, I.L. Tarasova<sup>2</sup>, and V.G. Kurbanov<sup>3</sup>

Institute for Problems in Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

<sup>1</sup>✉ g27764@yandex.ru, <sup>2</sup>✉ g17265@yandex.ru, <sup>3</sup>✉ vugar\_borchali@yahoo.com

**Abstract.** Forming optimal motion control laws for unmanned vehicles (UVs) by analyzing sensory data about the choice environment is an integral part of designing their situational control systems. The weakly predictable variability of the UV operating environment and the imperfection of measuring means reduce the possibility of obtaining comprehensive information about the environment state. Therefore, routing to minimize travel time and the probability of an accident is performed under uncertainty. An effective way to solve this problem is using logical-probabilistic and logical-linguistic models and algorithms. This paper is intended to develop new optimal routing methods for UVs with estimating the probability of an accident based on the logical-linguistic classification of route segments. For this purpose, the rows of parameters and characteristics of reference route segments are created and compared with the logical-probabilistic and logical-linguistic parameters and characteristics of classified route segments considering their significance for routing. After processing sensory and statistical data, the proposed logical-probabilistic and logical-linguistic methods are used to estimate the probabilities of accidents and minimize a performance criterion. As a consequence, the accuracy and speed of optimal routing for UVs are both increased. The results of this research can be used in the central nervous system of intelligent robots to classify route segments obtained by analyzing sensory and statistical data, which will improve the quality of motion control in an uncertain environment.

**Keywords:** optimization, control laws, the probability of an accident, sensory and statistical data, the attributes of reference route segments, logical-probabilistic and logical-linguistic analysis and classification.

**Funding.** This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the State order under contract No. FFNF-2021-00081281112500304-4.