

Сведения об авторах

Демин Александр Викторович, Ростехнадзор, Заместитель руководителя, 105066, г. Москва, ул. А. Лукьянова, д. 4, стр. 1, Телефон: +7 (495) 532-15-29, rostehnadzor@gosnadzor.ru

Махутов Николай Андреевич, главный научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН). E-mail: kei51@mail.ru. Тел. +7(495)930-80-78

Иванов Валерий Иванович, ЗАО «НИИИИ МНПО «Спектр», Москва, проф., гл. научн. сотр., 119048, г. Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1, Телефон: +7 (906) 043-11-94

Гаденин Михаил Матвеевич, ведущий главный научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН); 101000, Москва, Малый Хари-тоньевский переулок, д.4. E-mail: safety@imash.ru.

УДК 623.094

DOI: 10.36535/0869-4179-2021-03-2

**ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ЖИВУЧЕСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ
РАЗВЕДКИ ЗОНЫ ЧС: НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДИЧЕСКОГО
ПОДХОДА**

Доктор техн. наук Р.А. Дурнев, А.С. Гусева
ФГБУ РАРАН

И.В. Жданенко
ФГБУВНИИГОЧС (ФЦ)

А.В. Рогачева
ФГБОУ ВО

**«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

Выполнена априорная логико-вероятностная оценка живучести и эффективности мини-БПЛА при проведении разведки зоны ЧС с помощью нового методического подхода. Показана принципиальная возможность его использования для обоснования технологии применения мини-БПЛА при воздействии поражающих факторов источников ЧС.

Ключевые слова: логико-вероятностная оценка, живучесть элементов, беспилотный летательный аппарат, этапы применения, поражающие факторы источников чрезвычайных ситуаций.

**LOGICAL-PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE SURVIVABILITY
AND EFFECTIVENESS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES DURING
THE EXPLORATION OF THE EMERGENCY ZONE: SOME POSSIBILITIES
OF THE METHODOLOGICAL APPROACH**

Dr. (Tech.) R.A. Durnev, A.S. Guseva
FGBU RARAN

I.V. Zhdanenko
FC VNII GOCHS EMERCOM of Russia

A.V. Rogacheva
MOSCOW AVIATION INSTITUTE (NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY)

A priori logical-probabilistic assessment of the survivability and effectiveness of mini-UAVs during the exploration of the emergency zone was performed using a new methodological approach. The principal possibility of its use to justify the technology of using mini-UAVs under the influence of damaging factors of emergency sources is shown.

Keywords: logical-probabilistic assessment, survivability of elements, unmanned aerial vehicle, application stages, striking factors of emergency sources.

В работе [1] представлен методический подход, позволяющий учитывать живучесть беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) к воздействию поражающих факторов (ПФ), в том числе источников ЧС, на отдельные элементы и подсистемы при конкретных способах и условиях применения БПЛА.

В настоящей статье с применением указанного методического подхода, в основу которого положен адаптированный к решаемой задаче логико-вероятностный метод (ЛВМ) [2], проведена условная оценка живучести и эффективности мини-БПЛА при проведении разведки в зоне ЧС. Ее условность определяется произвольным выбором элементов рассматриваемого летательного аппарата типа "квадрокоптер", не отражающим их конкретный состав в реальных образцах, и, соответственно, гипотетичностью рассматриваемой структурно-логической схемы (СЛС), выбором абстрактных элементов полета и этапов применения мини-БПЛА, а также неопределенностью данных по изменению живучести элементов при воздействии на них различных ПФ источников ЧС. В целом необходимо отметить, что все оценки осуществляются только в методических целях, для принципиальной оценки возможностей данного подхода.

Основная СЛС, учитывающая живучесть элементов мини-БПЛА, их структуру (взаимное расположение с учетом материальных, информационных и энергетических связей), а также тактические особенности использования указанного летательного аппарата, показана на рис. 1. Построение этой и последующих СЛС, а также все расчеты осуществлялись с использованием программного комплекса (ПК) "Арбитр" на основе схем, приведенных в [1].

На рисунке функциональными вершинами обозначены следующие элементы блоков мини-БПЛА:

двигательный блок: 1, 3, 5, 7 - двигатели; 2, 4, 6, 8 - электронные контроллеры скорости вращения;

энергетический блок: 25 - аккумуляторная батарея; 24 - плата распределения питания (ПРП);

блок бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ): 58 - синхронизатор; 59 - блок цифровой обработки; 60 - устройство ввода-вывода;

блок телеметрии и связи: 55 - бортовой модуль телеметрии; 54 - бортовая антенна; 53 - модуль мобильной связи; 52 - модуль связи на базе Wi-Fi(Wi-Max, LTE); 51 - модуль спутниковой связи;

блок инерциальной навигационной системы: 26 - гироскоп; 27 - магнитометр; 28 - датчик абсолютного давления; 29 - датчик угловой скорости; 30 - акселерометр; 31 - датчик разности давлений;

блок спутниковой навигации: 39 - антенна спутниковой навигации; 40 - модуль спутниковой навигации;

оптико-электронный блок: 45 - тепловизор; 46 - ПЗС - матрица; 47 - лазерный указатель.

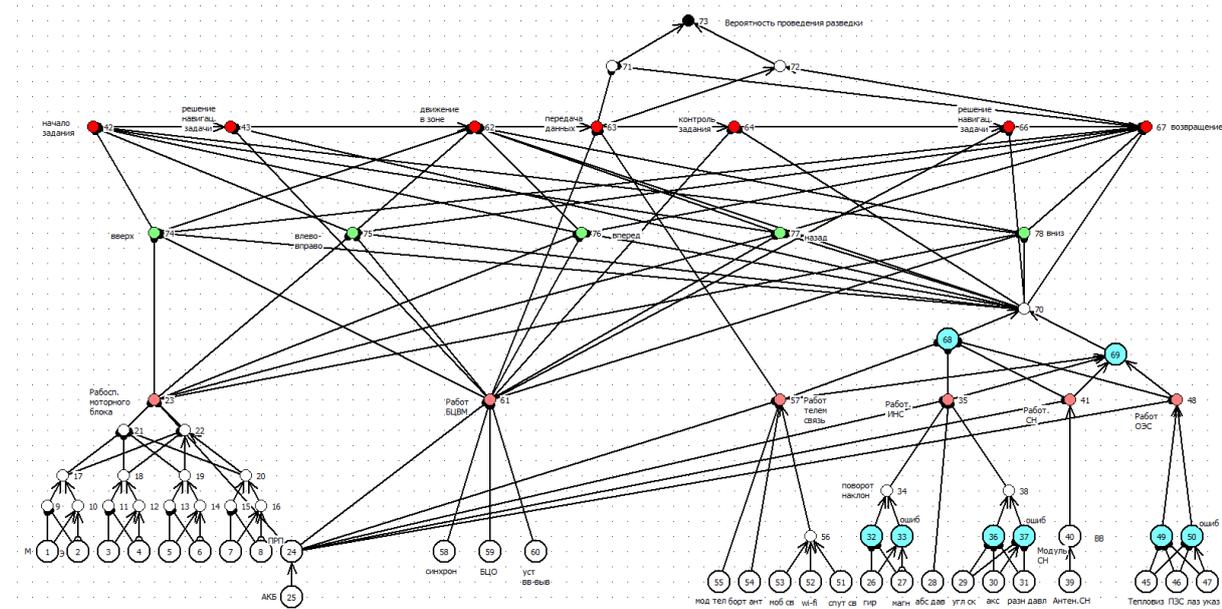


Рис. 1. СЛС выполнения задачи по разведке зоны ЧС с использованием мини-БПЛА

Фиктивными вершинами 23, 61, 57, 35, 41 и 48 показаны "сборки отказов" вследствие потери живучести соответственно блоков двигательного, БЦВМ, телеметрии и связи, инерциальной навигационной системы, спутниковой навигации и оптико-электронного блока.

Фиктивными вершинами 74-78 обозначены такие условные элементы полета мини-БПЛА, как "вверх", "влево-вправо", "вперед", "назад" и "вниз". Необходимость рассмотрения данных элементов полета определяется тем, что при них могут быть задействованы различные элементы (комплексы оборудования) рассматриваемого летательного аппарата. Воздействие ПФ источников ЧС по отдельным элементам мини-БПЛА будет приводить к их отказам и, соответственно, к потере возможности выполнять некоторые элементы полета, т.е. к потере функциональности образца. Это, в свою очередь, негативно скажется на реализации таких условных этапов применения мини-БПЛА, как "начало задания" (42), "решение навигационной задачи" (43), "движение к зоне" (62), "передача данных" (63), "контроль задания" (64), "решение навигационной задачи" (66) и "возвращение" (67).

Остальные вершины обозначают логически сложные события, связанные с дублированием некоторых функций, возможностью сохранения частичной работоспособности мини-БПЛА даже при отказе определенных элементов и т.п. Так, например, фиктивная вершина 71 связана с событием успешной передачи данных разведки зоны ЧС в режиме

он-лайн и получения (в режиме оф-лайн) разведанных с внешнего носителя информации, например, флэш-карты, при возвращении к месту базирования. Аналогично, вершина 72 определяет событие, связанное с возможностью реализации только одного из двух указанных режимов:

только он-лайн, если мини-БПЛА не возвращается к месту базирования;

только оф-лайн, если данный летательный аппарат не был способен передавать данные разведки в процессе выполнения задания, но на базу возвратился с работоспособным внешним носителем информации.

Следует отметить, что в рамках ЛВМ вначале осуществляется построение "функций работоспособности системы" (ФРС), под которой понимается "точное и однозначное представление множества состояний системы, в которых реализуется соответствующий критерий" [2] (в нашем случае - вероятность проведения разведки (73)). Очевидно, что в данном алгоритме должен быть предусмотрен перебор практически всех "маршрутов" СЛС, число которых растет экспоненциально от числа вершин и связей между ними. Это подтверждается и авторами [2], которые говорят о том, что "методы определения ФРС имеют очень высокую, экспоненциальную сложность, особенно для высокоразмерных системных объектов".

Также и следующий этап ЛВМ - преобразование ФРС в вероятностную функцию, "обладает экспоненциальной сложностью, т.е. является алгоритмически неэффективным" [2]. Все это позволяет предположить, что это NP-задача, время решения которой в геометрической прогрессии (экспоненциально) растет с увеличением объема данных. В этой связи при превышении времени авторского терпения в получении результатов расчетов по схеме на рис. 1 были предприняты попытки упростить, в том числе декомпозировать, данную задачу.

Для этого вначале производился расчет вероятности безотказной работы мини-БПЛА в зависимости от живучести его элементов, т.е. без учета тактических особенностей его применения. Абсолютное значение указанной вероятности зависит, в основном, от конкретных значений живучести (вероятностей безотказной работы) элементов. Тривиально увеличивая данные значения можно добиться повышения живучести мини-БПЛА в целом. В этой связи большой интерес представляла оценка вкладов различных элементов в обеспечение живучести рассматриваемого образца с учетом их дублирования и резервирования, конкретной структуры связей и т.п. (рис. 2). Под вкладом понимается значение абсолютного изменения системного показателя (вероятности безотказной работы мини-БПЛА) при изменении значения показателя элемента (живучести) от нуля до единицы.

Расчеты показывают (столбчатая диаграмма на рис. 2), что в наибольшей степени живучесть мини-БПЛА зависит от живучести ПРП, составных частей БЦВМ, бортового модуля телеметрии, а также датчиков абсолютного давления, угловой скорости, разности давлений, акселерометра; в несколько меньшей (примерно на 5-7%) - антенны и модуля спутниковой навигации, тепловизора, ПЗС - матрицы, лазерного указателя, гироскопа. На 10% ниже (от уровня ПРП) живучесть данного ЛА зависит от живучести каждого из двигателей (в связи с принятым допущением о том, что возможность передвижения квадрокоптера сохранится при выходе из строя одного двигателя) и аккумулятора. Значительно ниже вклад магнитометра и других элементов. Эти данные могут позволить как обосновать мероприятия по повышению живучести отдельных элементов и их блоков, так и технологии применения мини-БПЛА при воздействии поражающих факторов источников ЧС.

В целях одновременного учета технических и тактических особенностей применения мини-БПЛА задача была декомпозирована на две составляющие - оценка живучести блоков элементов (рис. 3) и оценка вероятности выполнения задачи мини-БПЛА (разведка зоны ЧС) с учетом значений живучести блоков элементов (рис. 4).

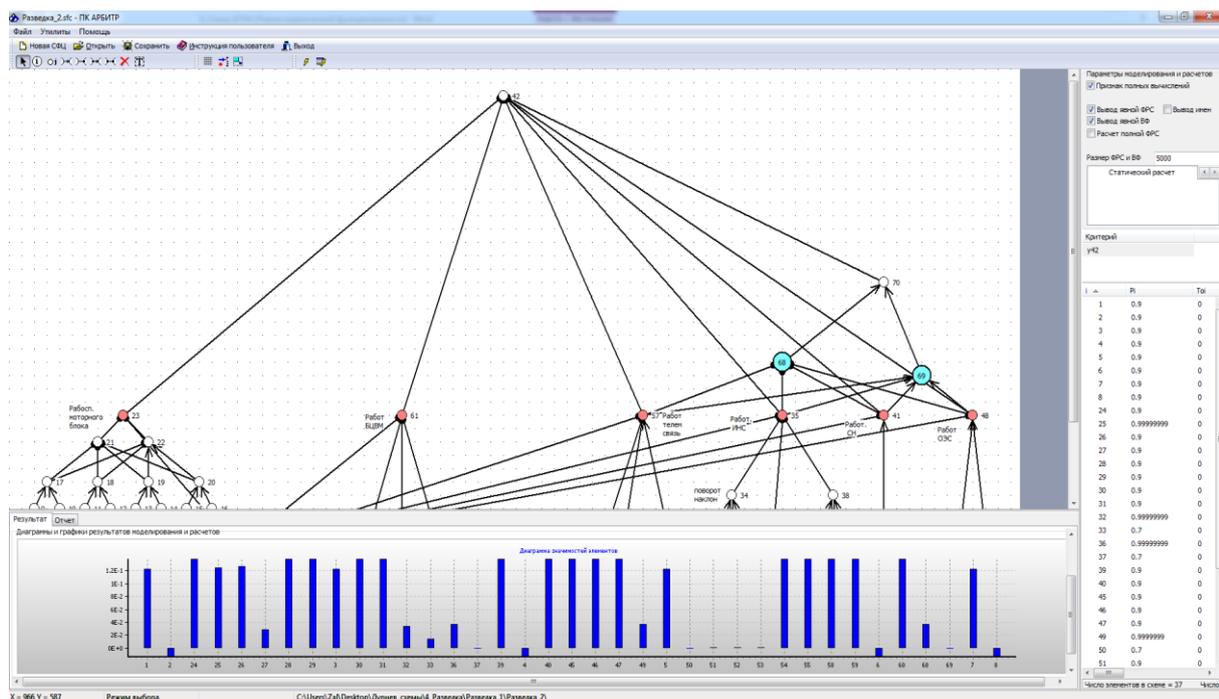


Рис. 2. СЛС выполнения задачи по разведке зоны ЧС с использованием мини-БПЛА

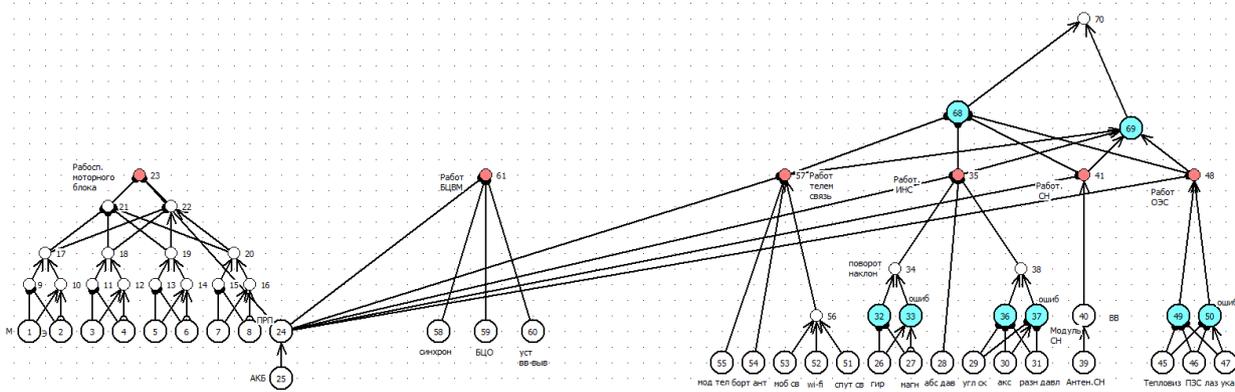


Рис. 3. СЛС для оценки живучести блоков элементов

Вершины 23, 61, 57, 35, 41 и 48 определены ранее. Вершина 68 учитывает возможность одновременной работоспособности блоков телеметрии и связи, инерциальной навигационной системы, спутниковой навигации и оптико-электронного блока. Вершина 69 позволяет учесть частичное дублирование (взаимодополнение, пересечение) функций указанных блоков телеметрии и связи, навигации, распознавания маршрутов, объектов, местности и т.п. 70-я вершина объединяет через логическое "или" события 68 и 69.

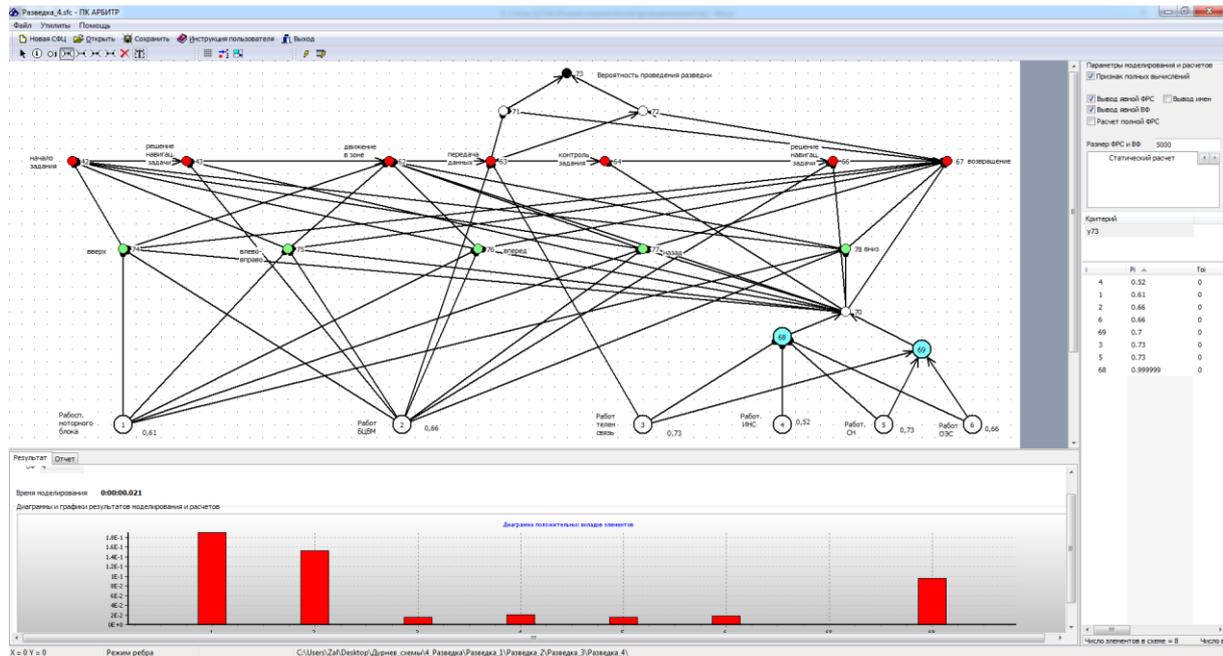


Рис. 4. Скриншот окна ПК "Арбитр" по расчету вкладов блоков элементов в выполнение задачи по разведке зоны ЧС с использованием мини-БПЛА (синие столбцы гистограммы)

На рис. 4 на нижнем уровне показаны функциональные вершины, содержащие значения живучести блоков элементов (1 - двигательного, 2 - БЦВМ), а также значение, полученное в вершине 70 на рис. 3.

Расчеты показывают, что влияние блоков элементов на вероятность проведения разведки зоны ЧС с использованием мини-БПЛА можно ранжировать (от большего к меньшему) следующим образом:

- 1 - двигательный блок
- 2 - БЦВМ;
- 3 - совместно блоки телеметрии и связи, инерциальной навигационной системы, спутниковой навигации и оптико-электронного блока.

Указанная процедура декомпозиции имеет определенную методическую ценность, наверное, тем большую, чем больше вершин и ребер рассматривается. Но, к сожалению, при её применении теряется часть информации о влиянии живучести элементов на вероятность проведения разведки в зоне ЧС с использованием мини-БПЛА, т.к. для основной СЛС (рис. 1) перебираются не все возможные комбинации вариантов. В этой связи в целях получения дополнительной информации оценивалось влияние живучести элементов на каждый из этапов применения мини-БПЛА. Это является вполне корректным, т.к. этапы выполняются последовательно и каждый из них безусловно важен для выполнения задачи в целом.

Вклады живучести отдельных элементов мини-БПЛА в вероятность реализации этапа "начало задания" показаны на столбчатой диаграмме на рис. 5, построенной по результатам моделирования в ПК "Арбитр".

Расчеты показывают (рис. 5), что в наибольшей степени вероятность реализации этапа "начало задания" зависит от живучести ПРП, а также составных частей БЦВМ. В несколько меньшей (примерно на 10%) указанная вероятность зависит от живучести каждого из двигателей и аккумулятора. Совместный вклад элементов телеметрии и связи,

инерциальной навигационной системы, спутниковой навигации и оптико-электронного блока примерно на 30% ниже уровня ПРП.

Логико-вероятностное моделирование реализации этапов "решение навигационной задачи" (вершины 43 и 66) показывает, что вклады живучести отдельных элементов мини-БПЛА в вероятность их реализации значительны только для ПРП и составных частей БЦВМ.

Для этапа "движение в зоне", как показывают расчеты, наибольшее влияние оказывают ПРП, составные части БЦВМ, блок бортовой телеметрии и связи. Несколько меньшее влияние (примерно на 10%) у каждого из двигателей и аккумулятора. На 45-50% ниже значения совместного вклада блоков телеметрии и связи, инерциальной навигационной системы, спутниковой навигации и оптико-электронного блока (от уровня ПРП). Еще меньше вклад у остальных элементов мини-БПЛА.

Вероятность реализации этапа "передача данных" в большей степени зависит от БЦВМ, блока телеметрии и связи, в меньшей - от оптико-электронного блока и других элементов.

Для этапа "контроль задания", как показывают расчеты, наибольшее влияние оказывают элементы БЦВМ и блоки телеметрии и связи, инерциальной навигационной системы, спутниковой навигации и оптико-электронного блок, частичное дублирование (взаимодополнение, пересечение) функций которых определяется сложным событием с вершиной 70.

Для этапа "возвращение" расчеты показывают, что в наибольшей степени вероятность реализации этапа "начало задания" зависит от живучести ПРП, а также составных частей БЦВМ. Совместный вклад элементов телеметрии и связи, инерциальной навигационной системы, спутниковой навигации и оптико-электронного блока примерно на 30% ниже уровня ПРП. Примерно на 10% (от ПРП) ниже вклад каждого из двигателей и аккумулятора.

С учетом вышеприведенных результатов возможно оценить обобщенную значимость элементов мини-БПЛА с точки зрения влияния на вероятности реализации этапов применения данного летательного аппарата. В связи с условностью и приближенностью расчетов такая оценка проводилась по порядковой (ранговой) шкале (табл. 1).

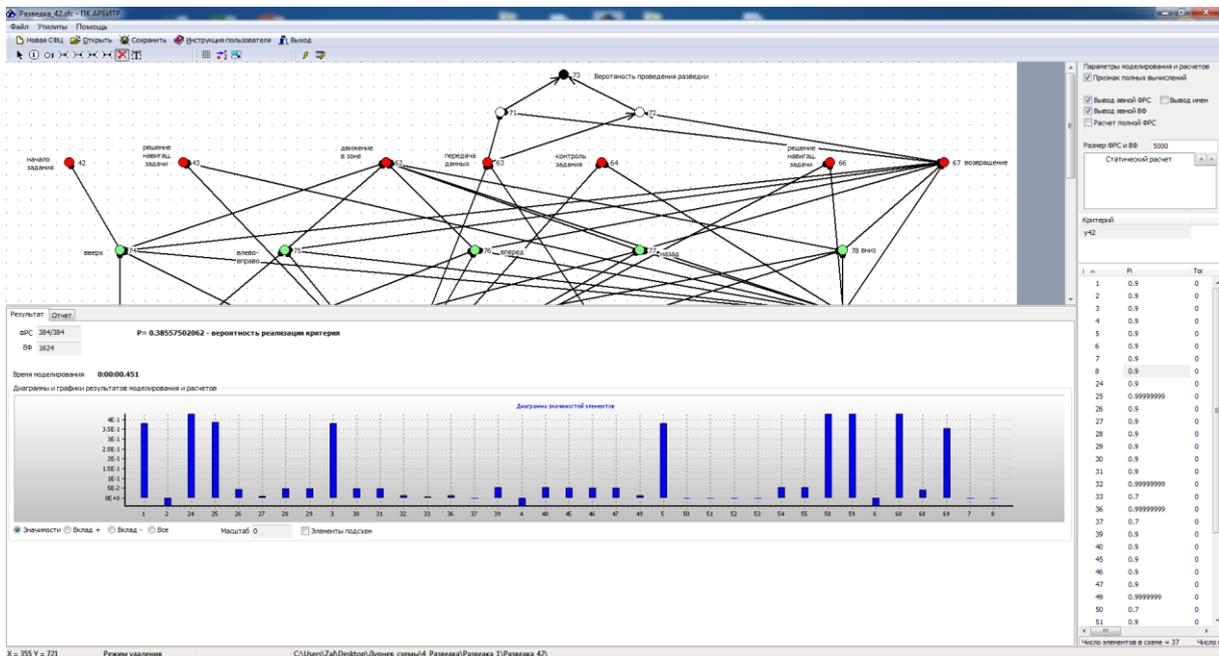


Рис. 5. Скриншот окна ПК "Арбитр" по расчету вкладов живучести отдельных элементов мини-БПЛА в вероятность реализации этапа применения "начало задания"

Оценка обобщенной значимости элементов мини-БПЛА

Блоки элементов (элементы)	Ранги блоков элементов для этапов применения						Сумма рангов	Обобщенная значимость
	начало задания	решение навигац. задачи	движение в зоне	передача данных	контроль задания	возвращение		
ПРП	1	1	1	2	2	1	8	1
двигательный блок	21	2	2	3	3	2	14	3
БЦВМ	3	1	1	3	1	1	8	1
блок телеметрии и связи	3	2	1	1	1	3	11	2
блок инерциальной навигационной системы	3	2	3	3	2	3	16	5
блок спутниковой навигации	3	2	3	3	2	3	16	5
оптико-электронный блок	3	2	3	2	2	3	15	4

С учетом данных табл. 1 возможно сделать следующие предварительные выводы.

1. Для мини-БПЛА, выполняющих разведку в зоне ЧС в условиях воздействия ПФ источников ЧС, необходимо предусмотреть меры по увеличению живучести ПРП, элементов БЦВМ, блока телеметрии и связи и двигательного блока (совместно с ЭКС). При этом очевидно, что поражающее воздействие по данным элементам на ранних этапах применения является катастрофическим и для реализации более поздних этапов.

2. Увеличение вероятности проведения разведки в зоне ЧС возможно путем:

физического повышения надежности данных элементов, их стойкости к ПФ источников ЧС;

дублирования данных элементов, особенно применительно к негабаритным ПРП и некоторым составным частям БЦВМ;

планирования применения дополнительных мини-БПЛА при выходе из строя основных; обоснования тактики применения мини-БПЛА с учетом параметрических и координатных законов воздействия ПФ источников ЧС (применение по высоте, дальности, времени нахождения в очаге критического воздействия ПФ).

3. Повышение живучести элементов мини-БПЛА особенно значимо:

для двигательного блока, системы телеметрии и связи - при ЧС, ПФ которых носят механический и барический характер (например, взрывы, ураганы и т.п.);

для ПРП, электронно-компонентной базы блоков телеметрии и связи, спутниковой навигации и других - при ЧС, ПФ которых носят радиационный и частично токсический характер (например, аварии на РОО, ХОО, техногенные пожары и т.п.);

практически для всех элементов - при ЧС, ПФ которых носят термический характер (например, техногенные и природные пожары, извержения вулканов, взрывы и т.п.).

4. В связи с ограничениями по расстоянию воздействия ПФ источников ЧС в качестве значимой меры повышения вероятности проведения разведки необходимо увеличение дальности действия ОЭЖ, чувствительности датчиков мониторинга обстановки.

Таким образом, показана принципиальная возможность использования методического подхода к оценке живучести БПЛА к воздействию ПФ источников ЧС для обоснования технологии их создания, модернизации и применения при разведке в зоне ЧС. В дальнейшем необходимо совершенствование данного подхода для обеспечения возможности учета физического влияния ПФ с различными параметрами на элементы мини-БПЛА.

Литература

1. Гусева А.С., Дурнев Р.А., Жданенко И.В., Свиридок Е.В. Оценка живучести беспилотных летательных аппаратов при чрезвычайных ситуациях: методические основы, подход // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2020, №6.

2. Поленин В.И., Рябинин И.А., Свиринок С.К., Гладкова И.А. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства / Под ред. А.С. Можаяева. СПб.: СПб-региональное отделение РАЕН. - 2011 г., стр. 416 с.

Сведения об авторах

Гусева Алена Сергеевна - главный специалист отдела организации НИОКР ФГБУ "Российская академия ракетных и артиллерийских наук", адрес учреждения: 107564, г. Москва, 1-я Мясниковская ул., дом 3, стр. 3, контактный телефон: 8(926) 144-67-69, e-mail: kot_alenka@mail.ru

Дурнев Роман Александрович - академик-секретарь секретариата президиума ФГБУ "Российская академия ракетных и артиллерийских наук", доцент, член-корреспондент РАН, адрес учреждения: 107564, г. Москва, 1-я Мясниковская ул., дом 3, стр. 3, контактный телефон: 8(903) 258-67-16, e-mail: rdurnev@rambler.ru

Жданенко Ирина Васильевна - старший научный сотрудник ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России» (Федеральный центр науки и высоких технологий), адрес учреждения: 121352, г. Москва, ул. Давыдовская, дом 7, контактный телефон: 8(909) 953-56-59, e-mail: izhdanenko@yandex.ru

Рогачёва Анна Владимировна - студентка 4-го курса МАИ, контактный телефон: 8(916) 353-92-17, e-mail: arogacheva1999@gmail.com