

Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" <http://mathmod.esrae.ru/>

URL статьи: mathmod.esrae.ru/39-146

Ссылка для цитирования этой статьи:

Косицын А.А., Богомолов А.С. Задача управления процессом предупреждения развития аварийных комбинаций событий при использовании беспилотных летательных аппаратов // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2022. №3

УДК 629.067.8 : 621.315.1

DOI: 10.24412/2541-9269-2022-3-11-16

ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ РАЗВИТИЯ АВАРИЙНЫХ КОМБИНАЦИЙ СОБЫТИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Косицын А.А.¹, Богомолов А.С.¹

¹ Институт проблем точной механики и управления – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Саратовский научный центр Российской Академии Наук», Россия, Саратов, kositzyn@gmail.com

THE TASK OF MANAGING THE PROCESS OF PREVENTING THE DEVELOPMENT OF EMERGENCY COMBINATIONS OF EVENTS WHEN USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

Kositzyn A.A.¹, Bogomolov A.S.¹

¹ Institute of Precision Mechanics and Control – Subdivision of the Federal State Budgetary Research Institution Saratov Federal Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Russia, Saratov, kositzyn@gmail.com

Аннотация. В работе рассматривается проблема предупреждения аварий вследствие развития комбинаций относительно неопасных событий при обследовании промышленных объектов беспилотными летательными аппаратами. Предлагается подход к решению на основе логико-вероятностного анализа деревьев отказов, их минимальных сечений и путей успешного функционирования, а также концепция перспективной информационно-советующей системы, реализующей такой подход.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, дерево отказов, аварийная комбинация событий, авария, логико-вероятностный анализ безопасности.

Abstract. The paper considers the problem of preventing accidents due to the development of combinations of relatively non-hazardous events during the inspection of industrial facilities by unmanned aerial vehicles. An approach to the solution is proposed based on a logical-probabilistic analysis of fault trees, their minimum sections and ways of successful operation, as well as the concept of a promising information-advising system that implements such an approach.

Keywords: unmanned aerial vehicle, failure tree, emergency combination of events, accident, logical-probabilistic security analysis

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в настоящее время находят все более широкое применение в различных сферах: фермерское хозяйство, животноводство, обследование линий электропередачи, патрулирование местности, помощь при устранении чрезвычайных ситуаций, доставка небольших грузов и др. Актуальным является вопрос предупреждения сбоев функционирования беспилотных систем. Такие сбои и аварийные ситуации вызывают срыв выполнения полетных заданий и потери дорогостоящей аппаратуры. Согласно концепции критических (аварийных) комбинаций событий и их предупреждения [1-2], аварии в сложных человеко-машинных и организационно-технических системах являются следствиями развития комбинаций относительно неопасных по отдельности событий различного происхождения. Такие события, ошибки операторов, погодные воздействия и небольшие технические сбои, по отдельности или в ином контексте могут не являться фатальными, поэтому меры защиты или предупреждения их не рассматриваются как первоочередные. Тем более что ввиду их большого количества событий полный комплекс таких мер нереализуем в условиях ограниченных материальных ресурсов и времени. Актуальна задача разработки математических моделей и алгоритмов для определения критических комбинаций событий и целенаправленных мер по предупреждению их развития через воздействия на отдельные события. В настоящее время беспилотные системы оснащены рядом средств защиты от сбоев на разном уровне, однако это преимущественно единичные неисправности с известной степенью опасности. Защиты же от угроз, связанных с аварийными комбинациями событий, как правило, не предусмотрено. Доклад посвящен этой проблеме.

Формальная постановка задачи. Пусть $\bar{A} = \{A_1, \dots, A_n\}$ – множество аварийных ситуаций, вызываемых аварийными комбинациями событий в беспилотной системе промышленного мониторинга на отрезке времени $[t_n, t_k]$, $P(A, t)$ – вероятность (риск, оцениваемая возможность) возникновения ситуации $A \in \bar{A}$ в момент времени t , $s(t)$, $x(t)$ – состояние системы и внешней среды, $u(t)$ – управляющие воздействия на систему в момент $t \in [t_n, t_k]$, $S(t)$, $X(t)$, $U(t)$ – множества возможных значений $s(t)$, $x(t)$, $u(t)$. Требуется определить управляющие воздействия $u(t_1), \dots, u(t_k)$ на отрезке времени $[t_n, t_k]$, при которых для всех $t \in [t_n, t_k]$ справедливо

$$P(A_i, t) < \varepsilon, i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где ε – заданное число (максимальная допустимая вероятность аварии), и выполняется условие

$$\sum_{i=1}^k F(s(t_i), x(t_i), u(t_i), t_i) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $F(s(t), x(t), u(t), t)$ – заданная функция, описывающая затраты некоторого вида ресурсов или характеристики выполнения задания (например, время выполнения, погрешностью или точность отображения объектов, соблюдение заданных условий полета и др.). Требуемые граничные условия для начального и конечного положения БПЛА, грузов, рассматриваемого объекта и др.:

$$F_H(s(t_H), x(t_H), u(t_H), t_H) = 0, \quad (3)$$

$$F_K(s(t_K), x(t_K), u(t_K), t_K) = 0, \quad (4)$$

где $F_H(s(t_H), x(t_H), u(t_H), t_H)$, $F_K(s(t_K), x(t_K), u(t_K), t_K)$, и ограничения

$$C(t) \leq F_1(s(t), x(t), u(t), t) \leq D(t), \quad (5)$$

связанные с целями и нормативами выполнения задания, где $F_1(s(t), x(t), u(t), t)$, $C(t)$, $D(t)$ – заданные на $[t_H, t_K]$ функции.

Содержательно задача состоит в определении управляющих воздействий по снижению вероятности развития аварий из рассматриваемого множества.

Подход к решению задачи. Полагаем, что аварии являются следствиями развития критических комбинаций сравнительно неопасных событий [3]. В качестве вспомогательной решается задача мониторинга [4]. Перспективная система мониторинга должна на основании имеющейся информации об уже произошедших событиях определять потенциальные комбинации, в которые эти события могут входить, и выдавать информацию о наиболее вероятных из них.

Формально, нам требуется в каждый момент t_i , $i = 1, \dots, m$, по запросу лица, принимающего решения, определять и выдавать:

- данные о множестве всех ситуаций $\bar{A}(t_i) \subseteq \bar{A}$, для каждой из которых по текущей оценке $P(A, t) > \varepsilon$ в некоторый момент $t \in [t_i, t_k]$;

- для каждого сценария из множества $C(A)$, соответствующего каждой ситуации $A \in \bar{A}(t_i)$ – данные о множестве событий, входящих в этот сценарий и

произошедших к моменту t_i и данные о множестве событий $E \setminus E(C(A, t_i))$, где $E(C(A, t_i))$ – подмножество E , включающее все его события из сценариев множества $C(A)$, зарегистрированные ранее.

Для выполнения этой задачи строится множество событий $E = \{e_1, \dots, e_n\}$, из которых могут складываться исследуемые аварийные комбинации и сценарии развития аварий. Частоту λ_i появления каждого события e_i полагаем постоянной на рассматриваемом интервале. Через μ_i обозначим интенсивность противодействия появлению события e_i . Мы предполагаем наличие для каждого

из этих событий определенного комплекса средств $Q_i(t)$ средств предупреждения. В общем случае такое множество может быть пусто в некоторые моменты времени (средства неприменимы или отсутствуют в этот момент). При этом глубина декомпозиции событий при построении множества E предполагается достаточно большой для того, чтобы можно было рассматривать комплексы конкретных средств и мероприятий по их предупреждению.

Для изображения связи между авариями и событиями из E будем использовать логико-вероятностный анализ безопасности (FTA, Fault Tree Analysis, [5,6]) и рассматривать деревья отказов с их минимальными сечениями.

Наша модель учитывает не только потенциальные поломки аппарата, но и неблагоприятные воздействия среды, сбои ПО, а также ошибки персонала. Состав аварийных комбинаций событий характеризуется минимальными сечениями деревьев отказов. Определив их множество, при появлении каких-либо событий можно определить, в какие минимальные сечение они входят и какие из событий должны произойти дальше для реализации аварийных комбинаций

Мониторинг развития аварийных комбинаций событий подразумевает выявление наиболее вероятных из них. Чтобы определить вероятности их развития, используются графы событий и системы дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена. Граф событий отображает возможные варианты развития соответствующих комбинаций относительно порядка их составляющих. Пример такого графа для трех событий показан на рисунке 1.

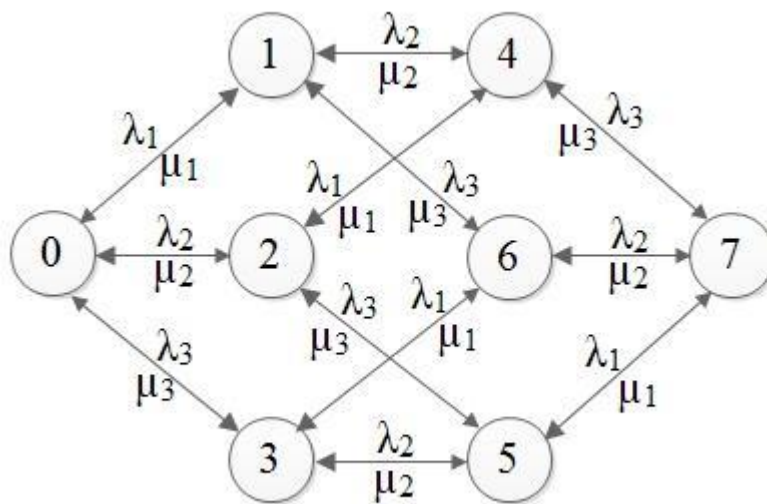


Рис.1.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: 0 – состояние, при котором ни одно событие не наступило; 1-3 – наступило одно соответствующее событие; 4-6 – наступило два события; 7 – наступили все события. Дуги графа

символизируют движение между этими состояниями, которое происходит за счет возникновения и парирования событий.

На основе графов событий строятся системы дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена [7], позволяющие определить вероятность развития аварийных комбинаций во времени в зависимости от интенсивности возникновения и парирования базовых событий этих комбинаций. Условием для использования данной модели является марковское свойство процесса наступления рассматриваемых событий: для каждого момента времени вероятность любого состояния объекта в будущем зависит только от состояния объекта в настоящий момент и не зависит от того, каким образом объект оказался в этом состоянии. Для случая переменных значений отрезков времени функционирования системы может разбиваться на части таким образом, что на каждой из них эти значения постоянны, что дает возможность применения гомогенной марковской модели. Количество отрезков разбиения зависит от условий функционирования конкретной системы.

Таким образом, концепция функционирования перспективной системы мониторинга на основе предлагаемого подхода заключается в следующем. Пусть во время выполнения системой задания происходит регистрация события e из множества E и E' – множество уже зарегистрированных во время выполнения текущего задания событий из E . Система оценивает вероятности развития аварийных комбинаций, связанных с событиями множества $E' + \{e\}$, учитывая, что эти события уже произошли. Пусть M – множество таких комбинаций, оцениваемая вероятность которых превышает заданное число ε на временном отрезке выполнения задания. Аварийные комбинации из множества M полагаются наиболее вероятными и опасными. По запросу ЛПР получает от системы мониторинга список событий из $E' + \{e\}$, а также список событий, возникновение которых приведет к развитию аварийных комбинаций из M .

Задача по управлению предупреждения развития аварий заключается в нахождении управляющих воздействий на события входящие в $E' + \{e\}$, которые позволят снизить вероятности развития комбинаций из M до значений ниже ε .

Заключение. Исследуется задача предупреждения развития аварийных комбинаций событий в процессе функционирования беспилотных летательных систем. Дана формальная постановка задачи по предотвращению развития аварий, определена вспомогательная задача их мониторинга. Описана концепция действия системы, которая распознает наиболее вероятные в текущий момент аварийные комбинации и выдает рекомендации по их предупреждению.

Литература

1. Резчиков А. Ф., Богомолов А.С. Критические сочетания событий – причины аварий в человеко-машинных системах. // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'201. Материалы Восьмой

- международной конференции: в 2 томах. ИПУ им. В.А.Трапезникова РАН; Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна, 2015. С. 130-135.
2. Bogomolov A.S. Analysis of the Ways of Occurrence and Prevention of Critical Combinations of Events in Man-machine Systems // Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics, 2017, V. 17. Iss. 2. P. 219-230.
 3. Kositzyn, A.A. et al. Modeling of Critical Combinations of Events in Industrial Monitoring by Unmanned Aerial Vehicles. In: Silhavy, R. (eds) Cybernetics Perspectives in Systems. CSOC 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol 503. Springer, Cham, 2022.
 4. Косицын А.А., Богомолов А.С., Кушников В.А., Иващенко В.А., Сердечный Д.В. Мониторинг аварийных комбинаций событий при обследовании промышленных объектов беспилотными летательными аппаратами// Системы управления и информационные технологии. №2(88). 2022. С. 65-70.
 5. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Политехника, 2000. 247 с.
 6. Диллон Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем. М.: Мир, 1984. 318 с.
 7. Rezchikov A.F., Kushnikov V.A., Ivashchenko V.A., Bogomolov A.S., Filimonyuk L.Yu.. Models and Algorithms of Automata Theory for the Control of an Aircraft Group // Automation and Remote Control. 2018. Vol. 79(10). P. 1863–1870.