



Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

A. S. Bogomolov, Prevention of accidental combinations of events in the control of human-machine systems, *Izv. Saratov Univ. Math. Mech. Inform.*, 2019, Volume 19, Issue 2, 196–206

DOI: 10.18500/1816-9791-2019-19-2-196-206

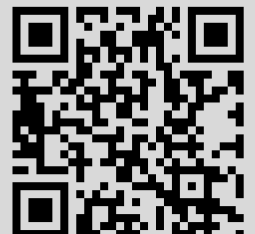
Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<http://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.170

February 6, 2025, 14:58:36



# ИНФОРМАТИКА

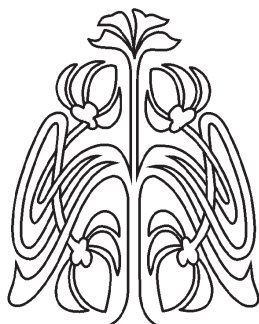
УДК 007

## Предотвращение аварийных комбинаций событий при управлении человеко-машинными системами

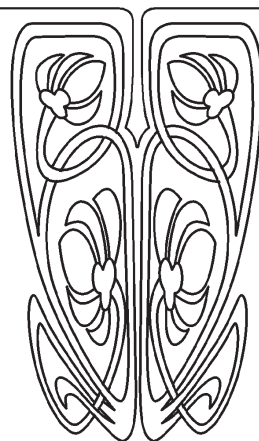
**А. С. Богомолов**

Богомолов Алексей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия, 410029, Саратов, ул. Рабочая, д. 24; доцент кафедры математической кибернетики и компьютерных наук, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, д. 83, alexbogomolov@ya.ru

В работе исследуется проблема аварийных комбинаций событий. Аварийной комбинацией событий называется совокупность дефектов техники, программного обеспечения и человеческих ошибок, относительно неопасных по отдельности, но приводящих к аварии при возникновении в определенном порядке на определенном отрезке времени. Современные средства предупреждения могут парировать преимущественно отдельные неблагоприятные воздействия, а для эффективного предотвращения критических режимов необходимо математическое обеспечение системного анализа аварийных комбинаций событий на различных интервалах времени. Задача управления предотвращением аварийных комбинаций событий поставлена как задача вариационного исчисления на условный экстремум. Предлагается метод решения поставленной задачи на основе анализа деревьев отказов и путей успешного функционирования. Предлагаемый метод позволяет выделять минимальные множества неблагоприятных событий, парирование которых дает возможность снизить вероятность аварийных комбинаций до безопасного уровня. Определены и доказаны свойства путей успешного функционирования, включая точные оценки для их количества, что позволяет ранжировать задачи по временной сложности и повысить эффективность их решения. Разработаны эвристические подходы, позволяющие учитывать порядок возникновения событий при управлении процессом предотвращения их аварийных комбинаций. Заданные последовательности инцидентов учитываются за счет выделения подграфов и агрегирования событий. Полученные результаты предназначены для использования в системах поддержки принятия решения на различных уровнях при управлении предотвращением критических режимов и аварий человек-машинных и организационных систем.



**НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ**





**Ключевые слова:** комбинация событий, человеко-машинная система, дерево отказов, вероятность аварии, путь успешного функционирования, порядок событий.

Поступила в редакцию: 09.09.2018 / Принята: 07.10.2018 / Опубликовано онлайн: 28.05.2019

DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2019-19-2-196-206>

## 1. ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Исследуется проблема аварийных комбинаций событий при управлении человеко-машинными системами. Полагаем, что события  $e_1$  и  $e_2$  находятся в аварийной комбинации, если событие  $e_1$  вызывает нехватку ресурса для реакции  $R(e_2)$  системы на событие  $e_2$ . Таким образом, аварийные комбинации снижают безопасность системы за счет влияния некоторых событий на возможность парирования других событий. В настоящей работе для решения проблемы аварийных комбинаций событий при управлении человеко-машинными системами рассматривается задача со следующей формальной постановкой.

Пусть  $\bar{A} = \{A_1, \dots, A_n\}$  — множество ситуаций, вызываемых аварийными комбинациями событий на отрезке времени  $[t_n, t_k]$ ,  $P(A, t)$  — вероятность аварии  $A \in \bar{A}$ ,  $s(t)$  — состояние системы,  $x(t)$  — состояние внешней среды,  $u(t)$  — управляющие воздействия на систему в момент времени  $t$ ,  $s(t) \in S(t)$ ,  $x(t) \in X(t)$ ,  $u(t) \in U(x)$ .

Требуется определить управляющие воздействия  $u(t_1), \dots, u(t_k)$  на  $[t_n, t_k]$ , при которых справедливо

$$\forall t \in [t_n, t_k] \quad \forall x(t) \in X(t) \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad p(A_i, t) \leq \varepsilon; \quad (1)$$

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

где  $\varepsilon$  — заданное достаточно малое число (ограничение для вероятности аварий),  $F(s(t), x(t), u(t), t)$  — заданная функция, определяющая затраты заданного ЛПР подмножества ресурсов системы, и выполняются граничные условия, определяющие поведение системы в начальный и конечный моменты времени:

$$F_n(s(t_n), x(t_n), u(t_n), t_n) = 0, \quad F_k(s(t_k), x(t_k), u(t_k), t_k) = 0,$$

и ограничения

$$C(t) \leq F_p(s(t), x(t), u(t), t) \leq D(t),$$

связанные с функционированием системы соответственно ее целям и нормативам, где  $F_n(s(t), x(t), u(t), t)$ ,  $F_k(s(t), x(t), u(t), t)$ ,  $C(t)$ ,  $D(t)$ ,  $F_p(s(t), x(t), u(t), t)$  — заданные функции.

## 2. РАЗРАБОТАННОСТЬ ПРОБЛЕМАТИКИ

Для анализа влияния различных событий на функционирование сложных систем используются методы общей теории систем и системного анализа, дискретной и непрерывной математики, теории вероятностей и математической статистики, применяемые для количественного и качественного решения задач на различных этапах жизненного цикла. Определены в стандартах и исследованы методы анализа логических деревьев отказов (FTA, Fault Tree Analysis) и событий (ETA, Event



Tree Analysis), анализа видов и критичности отказов (FME(C)A, Failure Modes Effects (and Criticality)), анализа работоспособности системы (HAZOP, Hazard and Operability Studies) и анализа структурных схем надежности (RBD, Reliability Block Diagram). Существующие системы предупреждения критических режимов работают с отдельными неблагоприятными событиями без количественного и качественного анализа их суммарного эффекта, взаимодействия с уже произошедшими событиями и рекомендаций по предотвращению наступающих аварийных комбинаций событий. Определенный анализ возможного совокупного эффекта разнородных неблагоприятных событий осуществляется, как правило, на этапах проектирования, а системы, действующие в процессе эксплуатации, в качестве результата анализа опасности выдают значения качественных характеристик.

В исследовании нарушений функционирования человеко-машинных систем и определении методов предупреждения таких нарушений получен широкий диапазон значимых результатов, которые лежат как преимущественно в технической области [1, 2], так и в области анализа человеческого фактора [3] и социотехнических систем [4]. При этом в качестве причин, обуславливающих негативное воздействие человека в системе, рассматриваются как физические недомогания, возникающие из-за условий работы [5, 6], так и умышленное причинение вреда [7–9]. В области изучения совместного действия неблагоприятных событий достаточно давно задокументирован и широко исследуется «эффект домино» (Domino Effect, каскадный эффект) [10–13], являющийся частным случаем развития рассматриваемых в настоящей работе опасных комбинации событий. Для случаев пожароопасных и взрывоопасных производств, а также природных катаклизмов каскадные эффекты исследовались методами анализа риска и вероятностными методами. Критические сочетания событий первоначально рассматривались преимущественно для авиационных транспортных систем [14–18]. При этом определялась вероятность возникновения критического сочетания в случае, если порядок событий неважен. Для этого использовались деревья отказов, графы событий и системы линейных дифференциальных уравнений Колмогорова – Чепмена [19, 20]. При этом под отказами понимались проявление дефектов техники, ошибки операторов, компьютерных программ, а также неблагоприятные внешние события, комбинации которых приводят к инцидентам, авариям и катастрофам. Для представления модели аварийных комбинаций событий используются минимальные сечения деревьев отказов, характеризующих развитие аварий из заданного множества  $\bar{A}$ . Для каждого минимального сечения из  $m$  элементов составлялась система из  $2^m$  уравнений Колмогорова – Чепмена относительно  $P_0(t), \dots, P_{2^m-1}(t)$  — вероятностей событий, соответствующих вершинам графа событий  $G_m$ , отражающего возможные варианты последовательностей развития событий из заданной комбинации. Для построения такой системы дифференциальных уравнений должны быть известны векторы  $\lambda$  и  $\mu$  значений интенсивности возникновения и парирования отказов, представляемых концевыми вершинами дерева. При этом  $\lambda$  понимались как выражение возмущающих воздействий, а мероприятия, позволяющие обеспечить значения  $\mu$ , при которых будет выполняться условие (1), понимались как искомые управляющие воздействия  $u(t)$ .

Таким образом, в основе решения обозначенной выше проблемы рассматривалась следующая задача. Пусть известно дерево отказов, описывающее множество аварий  $\bar{A} = \{A_1, \dots, A_n\}$ , и вектор  $\lambda$  интенсивности возникновения отказов  $E = \{e_1, \dots, e_k\}$ ,



приводящих к авариям из  $\bar{A}$ . Требуется найти вектор  $\mu$  значений интенсивности парирования отказов  $E = \{e_1, \dots, e_k\}$ , при котором для вероятностей аварий из множества  $\bar{A}$  будут выполняться условия (1), (2), а также требуемые граничные и начальные условия.

Следует заметить, что если при известных  $\lambda$  и  $\mu$  вероятности аварий можно при определенных условиях найти из решения систем уравнений Колмогорова – Чепмена, то подходы к снижению перебора для нахождения таких векторов  $\mu$ , которые при известных значениях векторов  $\lambda$  приводили бы в исходной задаче к выполнению условия (1), не были разработаны в достаточной степени. Без таких методов решение задачи является затруднительным, так как показано, что для мощности  $N(T)$  множества минимальных сечений дерева  $T$  справедливы точные оценки

$$|Or(T)| + 1 \leq |N(T)| \leq \prod_{d \in Or(T)} |\deg(d)|,$$

где  $Or(T)$  — множество вершин дерева  $T$ , связанных с оператором дизъюнкции,  $\deg(d)$  — множество вершин, входящих в вершину  $d$  дерева  $T$ . Это означает, что количество уравнений Колмогорова – Чепмена может быть достаточно велико уже для одной аварии. В случае большой мощности множества аварий  $\bar{A}$  переборный поиск одного вектора  $\mu$ , доставляющего условие (1) для всех минимальных сечений, еще менее продуктивен.

Для преодоления указанных ограничений предлагается следующий подход, позволяющий выделять минимальные множества событий для предотвращения заданных аварийных комбинаций с учетом того значения, которое имеет порядок возникающих событий.

### 3. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

Предлагаемый подход основывается на использовании путей успешного функционирования (ПУФ) дерева  $T$ , множество которых  $M(T)$  находится по тем же алгоритмам, что и множество минимальных сечений  $N(T)$ , применяемым к инвертированному дереву. ПУФ представляют собой минимальные подмножества  $E = \{e_1, \dots, e_k\}$ , каждый из которых пересекается со всеми минимальными сечениями дерева  $T$ . ПУФ считается реализованным, если все события, входящие в него, не произошли. Соответственно, если ПУФ реализуется, то минимальные сечения реализоваться не могут.

Показано, что количество ПУФ подчиняется точной оценке

$$|And(T)| + 1 \leq |M(T)| \leq \prod_{d \in And(T)} |\deg(d)|,$$

где  $And(T)$  — множество вершин дерева  $T$ , связанных с оператором конъюнкции.

Предлагается в упомянутой выше задаче искать вектор  $\mu'$  интенсивностей парирования событий из некоторого ПУФ  $E' \subseteq E = \{e_1, \dots, e_k\}$  такой, что вероятность реализации этого ПУФ будет

$$\forall t \in [t_n, t_k] \quad \forall x(t) \in X(t) \quad p(E', t) \geq 1 - \varepsilon, \tag{3}$$

где  $\varepsilon$  — заданное достаточно малое число из (1).



В силу несовместимости реализации минимальных сечений и ПУФ условие (3) предполагается заменой для условия (1). Эта замена, с одной стороны, позволяет рассматривать в случае каждого отдельно взятого ПУФ только одну систему дифференциальных уравнений Колмогорова – Чепмена. С другой стороны, множество ПУФ доставляет совокупность вариантов, каждый из которых потенциально может быть использован для решения задачи и нахождения необходимых значений  $\mu'$ . Выбор конкретного варианта ПУФ связан с требованием (2), а также граничными и начальными условиями задачи. При выборе ПУФ следует учитывать, что ни один ПУФ не пересекается одновременно со всеми остальными ПУФ и ни один ПУФ дерева  $T$  не совпадает ни с одним минимальным сечением дерева  $T$ , если дерево нетривиально. Выбор ПУФ для решения задачи упрощается также за счет использования операции сокращения числа элементов в ПУФ.

### Использование сокращенных ПУФ

Наблюдение, на котором основана предлагаемая эвристика, заключается в том, что не всегда требуется предотвратить реализацию всех минимальных сечений дерева  $T$ . На практике в ряде случаев требуется противодействовать реализации некоторого подмножества  $N' \subseteq N(T)$  множества минимальных сечений. В этом случае использовать ПУФ полностью не требуется и показано, что для любого множества подмножества  $N' \subseteq N(T)$  множества минимальных сечений дерева  $T$  справедливы следующие утверждения:

1) если  $E_0 \in M(T)$ , то множество  $E'_0 = \bigcup_{B \in N'} B \cap E_0$  является ПУФ для предупреждения реализации сечений из  $N'$ ,  $B$  — элементы множества  $N'$ ;

2) если  $E'$  — ПУФ для  $N'$ , то  $E' \subseteq E_0$ , где  $E_0$  — некоторый ПУФ для исходного дерева  $T$ .

Таким образом, для заданного подмножества минимальных сечений  $N' \subseteq N(T)$  по указанной выше формуле для  $E'_0$  можно получить все варианты ПУФ, которые представляют собой усеченные варианты ПУФ из  $M(T)$ . Так как для реализации усеченных вариантов при тех же ограничениях требуется меньше ресурсов, чем для реализации полных ПУФ, приведенные результаты позволяют расширить возможности для решения задачи для различных подмножеств  $N(T)$ .

Ниже предлагаются эвристические методы, позволяющие учесть порядок событий в аварийных комбинациях и снизить количество решаемых систем уравнений Колмогорова – Чепмена.

## 4. ЭВРИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДЛЯ УЧЕТА ПОРЯДКА СОБЫТИЙ В АВАРИЙНЫХ КОМБИНАЦИЯХ

При нахождении вероятностей реализации минимальных сечений из  $m$  элементов традиционно решаются системы из  $2^m$  уравнений Колмогорова – Чепмена. При решении этих систем порядок событий в минимальном сечении не учитывается, что может не согласовываться с практикой: не все  $m!$  последовательностей из событий  $e_1, \dots, e_m$  обычно являются аварийной комбинацией. Вычисляемая в результате решения этих систем вероятность без учета порядка больше вероятности комбинаций в определенных порядках. Заметим, что если вычисляемые вероятности мажорируются заданным  $\varepsilon$  как в условии (1), то и вероятности комбинаций в определенных порядках также подпадают под это условие.





Однако иногда порядок наступления событий в аварийной комбинации более важен. Например, к пожару обычно приводит ситуация, когда сначала выходит из строя противопожарное средство, а уже затем происходит возгорание, а не наоборот. Для таких случаев имеет смысл разрабатывать подходы, позволяющие определять вероятность наступления событий в заданном (полностью или частично) порядке.

Ниже предлагается концепция эвристических методов, позволяющих учитывать порядок событий и вместе с тем сокращать количество дифференциальных уравнений, решаемых для определения вероятностей развития аварийных комбинаций событий.

### Агрегирование событий

Пусть требуется найти вероятность реализации набора событий  $e_1, \dots, e_m$ , которые составляют минимальное сечение или ПУФ. При этом известно, что события  $e_1, \dots, e_{m'}$  для некоторого  $m' < m$  должны произойти до событий  $e_{m'+1}, \dots, e_m$ . Такая ситуация может иметь место в случае, если порядок событий в аварийной комбинации важен. Например, именно события  $e_1, \dots, e_{m'}$  приводят к невозможности парирования событий  $e_{m'+1}, \dots, e_m$  и, таким образом, весь набор составляет аварийную комбинацию.

Для решения системы Колмогорова – Чепмена требуются начальные условия, а также интенсивности возникновения  $\lambda_1, \dots, \lambda_m$  и парирования  $\mu_1, \dots, \mu_m$  событий  $e_1, \dots, e_m$ .

Рассмотрим два события  $\bar{e}_1, \bar{e}_2$ , которые получаются объединением событий

$$e_1, \dots, e_m: \bar{e}_1 = e_1, \dots, e_{m'}, \bar{e}_2 = e_{m'+1}, \dots, e_m.$$

Задачу нахождения вероятности комбинации событий  $e_1, \dots, e_m$  представим как задачу нахождения вероятности комбинации двух событий  $\bar{e}_1, \bar{e}_2$ . Вероятности  $\bar{e}_1, \bar{e}_2$  можно определить отдельно как вероятности комбинации событий  $e_1, \dots, e_{m'}$  и  $e_{m'+1}, \dots, e_m$  путем решения систем Колмогорова – Чепмена из  $2^{m'} + 2^{m-m'} + 4$  уравнений соответственно, а вероятность комбинации событий  $\bar{e}_1, \bar{e}_2$  — путем решения системы из четырех аналогичных уравнений. Общее количество решаемых уравнений, таким образом, будет равно  $2^{m'} + 2^{m-m'} + 4$ , что при росте  $m$  существенно меньше  $2^m$ , и, кроме того, при небольших значениях  $m'$  соответствующей системы дифференциальных уравнений могут решаться аналитически.

Ограничением описанного подхода является первенство событий  $e_1, \dots, e_{m'}$  и то, что после решения систем Колмогорова – Чепмена, в которых будут найдены вероятности событий  $\bar{e}_1$  и  $\bar{e}_2$ , нужно будет установить частоты их возникновения и парирования в виде постоянных величин  $\bar{\lambda}_1, \bar{\lambda}_2, \bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2$ , а также начальные условия для решения системы из четырех уравнений для определения вероятности наступления комбинации событий  $\bar{e}_1, \bar{e}_2$ . Сделать это можно, используя эвристические соображения, связанные с начальными условиями для исходной системы и поведением найденных вероятностей  $P_{\bar{e}_1}(t), P_{\bar{e}_2}(t)$ . Например, если эти вероятности достаточно мало меняются на исследуемых отрезках, полагать их практически постоянными при некоторых условиях.

### Учет заданного порядка событий

Пусть требуется определить вероятность аварийной комбинации, в которой события идут в заданном порядке  $e_1, \dots, e_m$ . В этом случае из графа событий предлагает-



ся высечь только один путь, соответствующий заданной последовательности развития событий, и уравнения Колмогорова – Чепмена строятся только для вероятностей событий  $P_0(t), P_{e_1}(t), P_{e_1, e_2}(t), \dots, P_{e_1, e_2, \dots, e_m}(t)$  соответственно в количестве  $m + 1$ . Это количество существенно меньше  $2^m$ , что снижает количество дифференциальных уравнений в системе. Ограничение данного подхода заключается в том, что требуется определить условия для выполнения эвристик, касающихся вероятностей возникновения событий  $e_1, \dots, e_m$  в прочих порядках, отличных от заданного.

При соблюдении условий, допускающих применение предлагаемых эвристических методов, эти методы могут комбинироваться (в том числе применяясь неоднократно) и существенно снижать сложность вычисления вероятностей развития аварийных комбинаций событий в случаях, когда задан порядок или несколько его вариантов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагается метод определения управляющих воздействий по предотвращению аварийных комбинаций событий в человеко-машинных системах. В предлагаемом подходе используются пути успешного функционирования системы, позволяющие определять минимальные множества событий для предотвращения аварийных комбинаций. Предлагаются эвристические методы, позволяющие учесть порядок событий в аварийной комбинации и снизить количество дифференциальных уравнений, решаемых для определения вероятностей развития аварийных комбинаций событий.

## Библиографический список

1. *Makhutov N. A.* Ranges of the Validity of Power Scaling Laws in the Description of Scale Effects of the Strength of Extended Elements of Machines and Structures // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2013. Vol. 42, iss. 5. P. 364–373. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1052618813050075>
2. *Makhutov N. A., Reznikov D. O.* A Criterion Base for Assessment of Strength, Lifetime, Reliability, Survivability, and Security of Machines and Man-Machine Systems // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2017. Vol. 46, iss. 2. P. 132–141. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1052618817020108>
3. *Braglia M., Di Donato L., Zhang L., Gabbriellini R., Marrazzini L.* The house of safety: A novel method for risk assessment including human misbehaviour // *Safety Science*. 2018. № 110. P. 249–264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.08.015>
4. *Avila S.* Reliability analysis for socio-technical system, case propene pumping // *Engineering Failure Analysis*. 2015. № 56. P. 177–184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.02.023>
5. *Bogomolov A. V., Sviridyuk G. A., Keller A. V., Zinkin V. N., Alekhin M. D.* Information-logical modeling of information collection and processing at the evaluation of the functional reliability of the aviation ergate control system operator // 2018 Third International Conference on Human Factors in Complex Technical Systems and Environments (ERGO)s and Environments (ERGO). St. Petersburg, 2018. P. 106–110. DOI: <https://doi.org/10.1109/ERGO.2018.8443849>
6. *Богомолов А. В.* Методика унификации медико-биологических эффектов комбинированного воздействия физических факторов // Системный анализ в медицине (САМ 2016) : материалы X междунар. науч. конф. / под общ. ред. В. П. Колосова. Благовещенск, 2016. С. 23–26.
7. *Makhutov N. A., Reznikov D. O., Khaziakhmetov R.* Basic scenarios of terrorist attacks at hydropower engineering facilities // *Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical*





- Infrastructure Management : Proceedings of the 3IWRDD-FORUM / ed. I. E. Bueno. CRC Press/Balkema ; Taylor & Francis Group, 2011. P. 389–395.
8. *Reznikov D. O.* Technological and Intelligent Terrorism: Specific Features and Assessment Approaches // Comparative Analysis of Technological and Intelligent Terrorism Impacts on Complex Technical Systems. 2012. № 102. P. 45–60. DOI: <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-131-1-45>
  9. *Reniers G. L. L., Audenaert A.* Preparing for major terrorist attacks against chemical clusters: Intelligently planning protection measures w.r.t. domino effects // Process Safety and Environmental Protection. 2014. Vol. 92, iss. 6. P. 583–589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2013.04.002>
  10. *Zhang L., Landucci G., Reniers G., Khakzad N., Zhou J.* DAMS: A Model to Assess Domino Effects by Using Agent-Based Modeling and Simulation // Risk Analysis. 2018. Vol. 38, № 8. P. 1585–1600. DOI: <https://doi.org/10.1111/risa.12955>
  11. *Chen C., Reniers G., Zhang L.* An innovative methodology for quickly modeling the spatial-temporal evolution of domino accidents triggered by fire // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018. № 54. P. 312–324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.04.012>
  12. *Khakzad N., Khan F., Amyotte P., Cozzani V.* Domino Effect Analysis Using Bayesian Networks // Risk Analysis. 2013. Vol. 33, № 2. P. 292–306. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01854.x>
  13. *Kadri F., Birregah B., Chatelet E., Cozzani V.* The Impact of Natural Disasters on Critical Infrastructures: A Domino Effect-based Study // Journal of Homeland Security and Emergency Management. 2014. Vol. 11, iss. 2. P. 217–241. DOI: <https://doi.org/10.1515/jhsem-2012-0077>
  14. *Богомолов А. С., Иващенко В. А., Кушников В. А., Резчиков А. Ф., Цвиркун А. Д., Цесарский Л. Г., Филимонюк Л. Ю.* Моделирующий комплекс для анализа неблагоприятных сочетаний событий в авиационных транспортных системах // Проблемы управления. 2018. Вып. 1. С. 74–79.
  15. *Rezchikov L. Yu., Kushnikov V. A., Ivashchenko V. A., Bogomolov A. S., Filimonjuk L. Yu.* Models and Algorithms of Automata Theory for the Control of an Aircraft Group // Automation and Remote Control. 2018. Vol. 79, iss. 10. P. 1863–1870. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0005117918100107>
  16. *Filimonjuk L. Yu.* The problem of critical events' combinations in air transportation systems // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2017. № 575. P. 244–254. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57261-1-38>
  17. *Резчиков А. Ф., Кушников В. А., Иващенко В. А., Богомолов А. С., Филимонюк Л. Ю., Шоломов К. И.* Представление динамических причинно-следственных связей в человеко-машинных системах // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2017. Т. 17, вып. 1. С. 109–116. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2017-17-1-109-116>
  18. *Богомолов А. С.* Анализ путей возникновения и предотвращения критических сочетаний событий в человеко-машинных системах // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2017. Т. 17, вып. 2. С. 219–230. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2017-17-2-219-230>
  19. *Ostreichovsky V. A., Shevchenko Y. N., Yurkov N. K., Kochegarov I. I., Grishko A. K.* Time Factor in the Theory of Anthropogenic Risk Prediction in Complex Dynamic Systems // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 944. P. 012085. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012085>



20. Острейковский В. А. Математические методы и модели техногенного риска в теории безопасности атомных станций. Курган : Курганский Дом печати, 2017. 448 с.

---

**Образец для цитирования:**

Богомолов А. С. Предотвращение аварийных комбинаций событий при управлении человеко-машинными системами // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2019. Т. 19, вып. 2. С. 196–206. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2019-19-2-196-206>

---

## Prevention of Accidental Combinations of Events in the Control of Human-Machine Systems

A. S. Bogomolov

Aleksey S. Bogomolov, <https://orcid.org/0000-0002-6972-3181>, Institute of Precision Mechanics and Control, RAS, 24 Rabochaya St., Saratov 410028, Russia; Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, [alexbogomolov@ya.ru](mailto:alexbogomolov@ya.ru)

In the work the problem of accidental combinations of events is investigated. An accidental combination of events is a set of defects in equipment, software and human errors, relatively non-dangerous separately but leading to an accident when they occur in a certain order at a certain time interval. Modern warning tools can parry mainly individual adverse effects and to effectively prevent critical modes it is necessary to provide mathematical analysis of systems for accidental combinations of events at different time intervals. The task of managing the prevention of accidental combinations of events is set as the task of the variational calculus on the conditional extremum. A method for solving the problem based on the analysis of failure trees and ways of successful operation is proposed. The given method allows selecting the minimum set of adverse events, the parrying of which makes it possible to reduce the likelihood of emergency combinations to a safe level. The properties of the paths of successful functioning were determined and proved including accurate estimates for their number which allows ranking tasks by time complexity and increasing the efficiency of their solution. Heuristic approaches were developed which allow to take into account the order of occurrence of events when managing the process of preventing their emergency combinations. The specified sequence of incidents are taken into account by allocating graphs and event aggregation. The obtained results are intended for use in decision support systems at various levels in managing the prevention of critical conditions and accidents of human-machine and organizational systems.

*Keywords:* combination of events, human-machine system, tree of failures, probability of an accident, way of successful functioning, order of events.

Received: 09.09.2018 / Accepted: 07.10.2018 / Published online: 28.05.2019

### References

1. Makhutov N. A. Ranges of the Validity of Power Scaling Laws in the Description of Scale Effects of the Strength of Extended Elements of Machines and Structures. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2013, vol. 42, iss. 5, pp. 364–373. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1052618813050075>
2. Makhutov N. A., Reznikov D. O. A Criterion Base for Assessment of Strength, Lifetime, Reliability, Survivability, and Security of Machines and Man-Machine Systems. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2017, vol. 46, iss. 2, pp. 132–141. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1052618817020108>



3. Braglia M., Di Donato L., Zhang L., Gabbrielli R., Marrazzini L. The house of safety: A novel method for risk assessment including human misbehaviour. *Safety Science*, 2018, no. 110, pp. 249–264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.08.015>
4. Avila S. Reliability analysis for socio-technical system, case propene pumping. *Engineering Failure Analysis*, 2015, no. 56, pp. 177–184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.02.023>
5. Bogomolov A. V., Sviridyuk G. A., Keller A. V., Zinkin V. N., Alekhin M. D. Information-logical modeling of information collection and processing at the evaluation of the functional reliability of the aviation ergate control system operator. *2018 Third International Conference on Human Factors in Complex Technical Systems and Environments (ERGO)s and Environments (ERGO)*. St. Petersburg, 2018, pp. 106–110. DOI: <https://doi.org/10.1109/ERGO.2018.8443849>
6. Bogomolov A. V. The technique of unification of medical and biological effects of the combination of effects of physical factors. *Sistemnyi analiz v meditsine (SAM 2016). Materialy X mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii [Systems Analysis in Medicine (SAM 16): Proc. X Int. Sci. Conf.]*. Blagoveschensk, 2016, pp. 23–26 (in Russian).
7. Makhutov N. A., Reznikov D. O., Khaziakhmetov R. Basic scenarios of terrorist attacks at hydropower engineering facilities. *Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management: Proceedings of the 3IWRDD-FORUM* / ed. I. E. Bueno. CRC Press / Balkema; Taylor & Francis Group, 2011, pp. 389–395.
8. Reznikov D. O. Technological and Intelligent Terrorism: Specific Features and Assessment Approaches. *Comparative Analysis of Technological and Intelligent Terrorism Impacts on Complex Technical Systems*, 2012, no. 102, pp. 45–60. DOI: <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-131-1-45>
9. Reniers G. L. L., Audenaert A. Preparing for major terrorist attacks against chemical clusters: Intelligently planning protection measures w.r.t. domino effects. *Process Safety and Environmental Protection*, 2014, vol. 92, no. 6, pp. 583–589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2013.04.002>
10. Zhang L., Landucci G., Reniers G., Khakzad N., Zhou J. DAMS: A Model to Assess Domino Effects by Using Agent-Based Modeling and Simulation. *Risk Analysis*, 2018, vol. 38, no. 8, pp. 1585–1600. DOI: <https://doi.org/10.1111/risa.12955>
11. Chen C., Reniers G., Zhang L. An innovative methodology for quickly modeling the spatial-temporal evolution of domino accidents triggered by fire. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, no. 54, pp. 312–324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.04.012>
12. Khakzad N., Khan F., Amyotte P., Cozzani V. Domino Effect Analysis Using Bayesian Networks. *Risk Analysis*, 2013, vol. 33, no. 2, pp. 292–306. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01854.x>
13. Kadri F., Birregah B., Chatelet E., Cozzani V. The Impact of Natural Disasters on Critical Infrastructures: A Domino Effect-based Study. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 2014, vol. 11, iss. 2, pp. 217–241. DOI: <https://doi.org/10.1515/jhsem-2012-0077>
14. Bogomolov A. S., Ivashchenko V. A., Kushnikov V. A., Rezchikov L. Yu., Tsvirkun A. D., Tsesarskiy L. G., Filimonyuk L. Yu. Modeling complex for critical events combinations analysis in aviation transport systems. *Control Sciences*, 2018, iss. 1, pp. 74–79 (in Russian).
15. Rezchikov L. Yu., 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, iss. 10, pp. 1863–1870. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0005117918100107>



16. Filimonyuk L. Yu. The problem of critical events' combinations in air transportation systems. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2017, no. 575, pp. 244–254. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57261-1-38>
17. Rezhnikov L. Yu., Kushnikov V. A., Ivashchenko V. A., Bogomolov A. S., Filimonyuk L. Yu., Sholomov K. I. The Dynamical Cause-effect Links' Presentation in Human-machine Systems. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Math. Mech. Inform.*, 2017, vol. 17, iss. 1, pp. 109–116 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2017-17-1-109-116>
18. Bogomolov A. S. Analysis of the Ways of Occurrence and Prevention of Critical Combinations of Events in Man-machine Systems. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Math. Mech. Inform.*, 2017, vol. 17, iss. 2, pp. 219–230 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2017-17-2-219-230>
19. Ostreikovskiy V. A., Shevchenko Y. N., Yurkov N. K., Kochegarov I. I., Grishko A. K. Time Factor in the Theory of Anthropogenic Risk Prediction in Complex Dynamic Systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 944, pp. 012085. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012085>
20. Ostreikovskiy V. A. *Matematicheskie metody i modeli tekhnogennogo riska v teorii bezopasnosti atomnykh stantsiy* [Mathematical methods and models of technogenic risk in the theory of safety of nuclear power plants]. Kurgan, Kurganskii Dom Pechati, 2017. 448 p. (in Russian).

---

**Cite this article as:**

Bogomolov A. S. Prevention of Accidental Combinations of Events in the Control of Human-Machine Systems. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Math. Mech. Inform.*, 2019, vol. 19, iss. 2, pp. 196–206 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2019-19-2-196-206>

---