

# МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ СОЧЕТАНИЙ СОБЫТИЙ В АВИАЦИОННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

А.С. Богомолов, В.А. Иващенко, В.А. Кушников, А.Ф. Резчиков,  
А.Д. Цвиркун, Л.Г. Цесарский, Л.Ю. Филимонюк

Разработан подход к обеспечению безопасности авиационных транспортных систем на основе анализа возникающих неблагоприятных сочетаний событий с помощью предлагаемого моделирующего комплекса. Разработанный подход позволяет оценить вероятность возникновения критических сочетаний событий, приводящих к авариям, и определить меры по их предотвращению. Предложена информационно-логическая схема решения проблемы неблагоприятных сочетаний событий в авиационных транспортных системах, включающая в себя подсистемы поддержки принятия решений для экипажей, диспетчеров и другого персонала.

**Ключевые слова:** авиационная транспортная система, аварийная ситуация, неблагоприятное сочетание событий, информационно-логическая схема, поддержка принятия решений, моделирующий комплекс.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие отечественного авиастроения, выход на зарубежные рынки авиаперевозок, надежное обеспечение обороноспособности страны невозможны без повышения уровня безопасности функционирования авиационных транспортных систем (АТС), снижения численности и тяжести аварий и катастроф, происходящих с воздушными судами (ВС). Один из перспективных путей решения данной задачи связан с применением современных средств обработки информации и совершенствования математического обеспечения АТС в целях анализа и предотвращения неблагоприятных сочетаний событий [1–7], приводящих к авариям и катастрофам.

Несмотря на большие успехи в области анализа надежности при проектировании [8–10], а также развития систем управления эксплуатацией АТС [11], актуальной проблемой остается возникновение аварийных ситуаций из-за непредвиденных неблагоприятных сочетаний событий, неопасных по отдельности. В настоящее время практически отсутствуют сведения об автоматизированных ком-

плексах, позволяющих осуществлять моделирование процессов функционирования АТС в целях управления по критерию безопасности полетов при возникновении неблагоприятных сочетаний событий.

Приведенные соображения обуславливают теоретическую и практическую значимость исследований, направленных на разработку моделирующего комплекса, включающего в себя модели и алгоритмы для решения задачи поддержки принятия решений при управлении АТС по критерию безопасности с учетом неблагоприятных сочетаний событий. Ниже предлагается формальная постановка задачи предотвращения неблагоприятных сочетаний событий.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ СОЧЕТАНИЙ СОБЫТИЙ

Пусть задан список аварийных и катастрофических ситуаций  $\bar{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ , каждая из которых возникает в результате неблагоприятных сочетаний событий, характерных для данного типа



АТС. Для каждого  $A_i \in \bar{A}$  на основе анализа происшедших аварий построено дерево событий, характеризующее процесс возникновения и развития их неблагоприятных сочетаний. Множество всех деревьев событий обозначим через  $\bar{D} = \{D_1, D_2, \dots, D_m\}$ ,  $E = \{e_1, \dots, e_k\}$  — множество их терминальных вершин.

Пусть также известны интенсивности  $\lambda_i(t)$ ,  $i = \overline{1, k}$ , возникновения событий из множества  $E = \{e_1, \dots, e_k\}$ . Через  $\mu_i(t)$  обозначим интенсивности потоков парирования событий из множества  $E = \{e_1, \dots, e_k\}$ . Полагаем, что каждому значению  $\mu_i(t)$  соответствует комплекс инструкций  $Q(\mu_i(t))$ , предназначенных для экипажа и других лиц, принимающих решения (ЛПР). Пусть  $x(t)$  — состояние окружающей среды.

Требуется:

— на моделирующем комплексе при подготовке к полету для любого момента  $t \in [t_n, t_k]$ ,  $t_n$  и  $t_k$  — начало и конец заданного интервала времени, определить вероятности  $p_i(\lambda(t), x(t), \mu(t))$ ,  $i = \overline{1, n}$ , характеризующие возможность возникновения аварий и катастроф  $\bar{A}$ ;

— для аварий и катастроф из множества  $\bar{A}$  определить вектор воздействий  $\mu(t) \in M(t)$ , при которых на заданном интервале времени  $[t_n, t_k]$  при всех допустимых состояниях окружающей среды  $x(t) \in X(t)$  вероятности аварий не превышают заданных пределов:

$$\forall i \in \{1, \dots, n\} \quad p_i(\lambda(t), x(t), \mu(t)) \leq \varepsilon_i \quad (1)$$

где  $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n$  — заданные неотрицательные числа, предельные значения вероятностей аварий и катастроф.

При решении задачи рассматриваемый отрезок времени  $[t_n, t_k]$  функционирования АТС разбивается на части таким образом, что на каждой из этих частей значения  $\lambda_i(t)$ ,  $i = \overline{1, k}$ , рассматриваются как постоянные, что дает возможность применения однородной марковской модели. Число таких частей зависит от условий функционирования конкретной АТС.

## 2. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

*Этап 1.* Построение моделей процессов возникновения неблагоприятных сочетаний событий и разработка алгоритмов решения задачи.

1.1. Определение множества  $\bar{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$  аварийных и катастрофических ситуаций.

1.2. Построить множество деревьев отказов  $\bar{D} = \{D_1, D_2, \dots, D_m\}$ , соответствующих авариям и катастрофам из множества  $\bar{A}$ , с множеством элементарных событий  $E = \{e_1, \dots, e_k\}$ .

*Этап 2.* Моделирование неблагоприятных сочетаний событий.

2.1. Построение комплексов для моделирования неблагоприятных сочетаний событий на различных этапах функционирования АТС.

2.2. Моделирование неблагоприятных сочетаний событий и уточнение вероятности их возникновения.

2.3. Занесение информации в базу данных и корректировка модели по результатам моделирования.

2.4. Разработка рекомендаций для экипажей, диспетчеров и другого персонала на различных этапах функционирования АТС.

## 3. ИНФОРМАЦИОННО-ЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В АТС ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ СОЧЕТАНИЙ СОБЫТИЙ

Предлагается информационно-логическая схема решения задачи предотвращения неблагоприятных сочетаний событий, рис. 1.

На рис. 1 приняты обозначения: 1, 2 — параметры, характеризующие процесс функционирования ВС и состояние экипажа соответственно; 3, 4 — параметры АТС, определяемые службами управления воздушным движением (УВД) и подготовки полета соответственно; 5 — сбор информации о процессе функционирования АТС, поступающей от датчиков и устройств локальной автоматики; 6 — запись информации в базу данных (БД) и базу знаний (БЗ); 7 — оценка ситуации при значительном отклонении параметров процесса функционирования АТС от заданных значений; 8 — идентификация текущих событий, влияющих на безопасность функционирования АТС; 9 — определение списка минимальных сечений, включающих в себя события из поз. 8; 10 — определение выполнимости критерия безопасности полета (1); 11 — критерий безопасности полета (1) нарушен?; 12 — сообщение о том, что критерий безопасности полета (1) не нарушен; 13 — занесение информации о опасных сочетаниях событий на сервер службы УВД; 14 — сообщение о том, что критерий (1) безопасности полета нарушен; 15 — занесение информации об опасных сочетаниях событий на сервер службы УВД; 16 — решение задачи предотвращения неблагоприятных сочетаний событий;

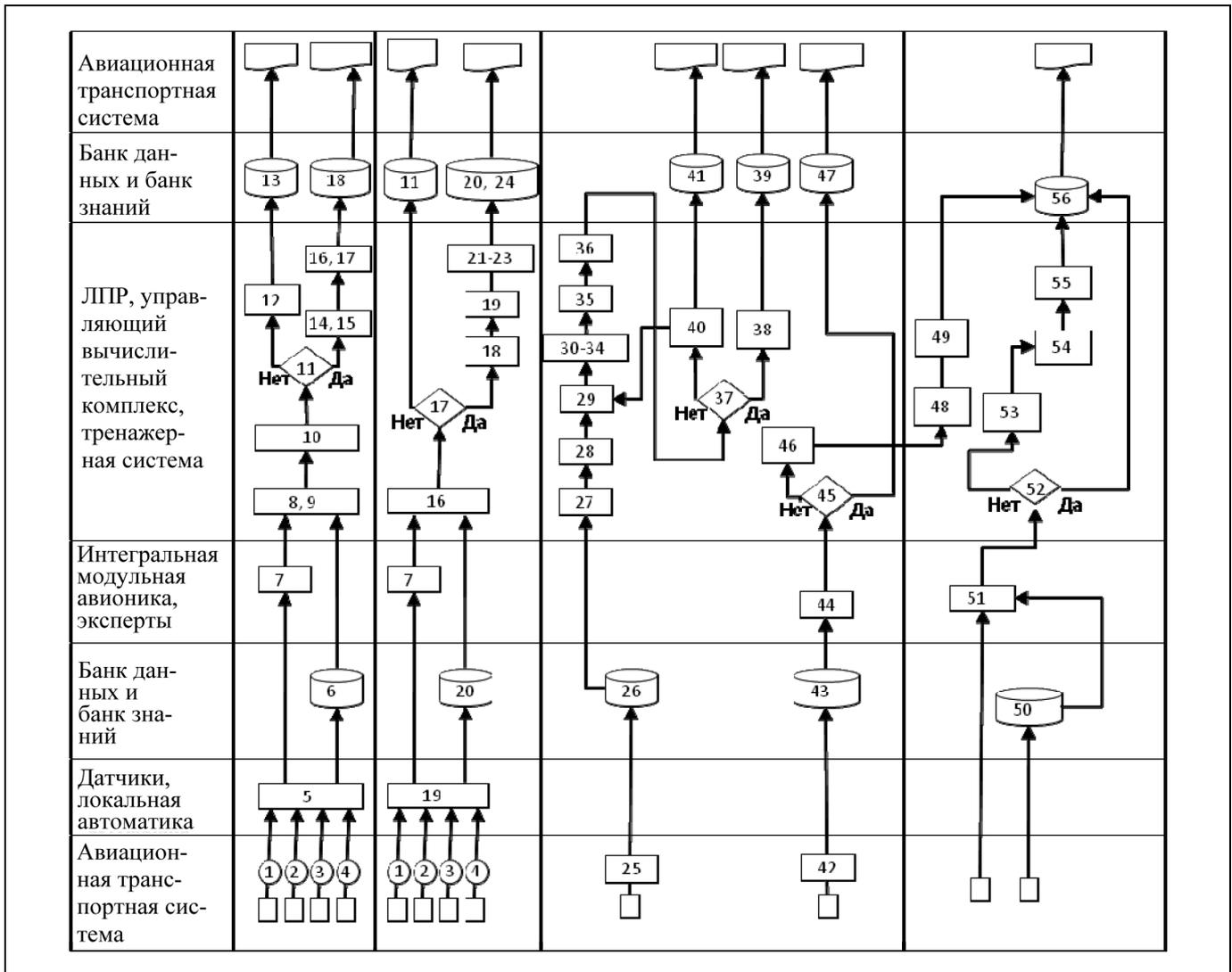


Рис. 1. Информационно-логическая схема принятия решений в АТС для предотвращения неблагоприятных сочетаний событий

17 — принятие и реализация решений экипажем или диспетчерами по устранению неблагоприятных сочетаний событий, которые могут привести к возникновению аварийных ситуаций; 18 — занесение информации о ситуации и принятых мерах по ее ликвидации на сервер службы УВД; 19 — сбор информации о текущем состоянии подсистем АТС; 20 — занесение информации в БД; 21 — выбор контролируемого списка неблагоприятных сочетаний событий; 22 — выдача сообщения о возникновении опасности неблагоприятного сочетания событий в процессе функционирования  $i$ -й подсистемы АТС; 23 — выдача рекомендации о действиях по устранению причин вероятной критической ситуации; 24 — занесение информации в БД; 25 — запуск тренажерной системы; 26 — вызов из БД дерева событий  $D^*$ , применяемого для обу-

чения экипажей и диспетчеров действиям при возникновении аварийных ситуаций, вызванных неблагоприятными сочетаниями событий; 27 — определение минимальных сечений дерева  $D^*$ , соответствующих различным сочетаниям событий; 28 — разработка алгоритмов решения задачи предотвращения неблагоприятных сочетаний событий для различных минимальных сечений; 29 — формирование блока тестовых заданий; 30 — построение диаграммы, характеризующей вероятности возникновения аварийных ситуаций при различных сочетаниях событий; 31 — определение перечня действий по устранению неблагоприятного сочетания событий; 32 — опрос обучаемого, какие неблагоприятные ситуации, по его мнению, необходимо учесть при принятии решений (выбрать из списка); 33 — ранжирование возникших



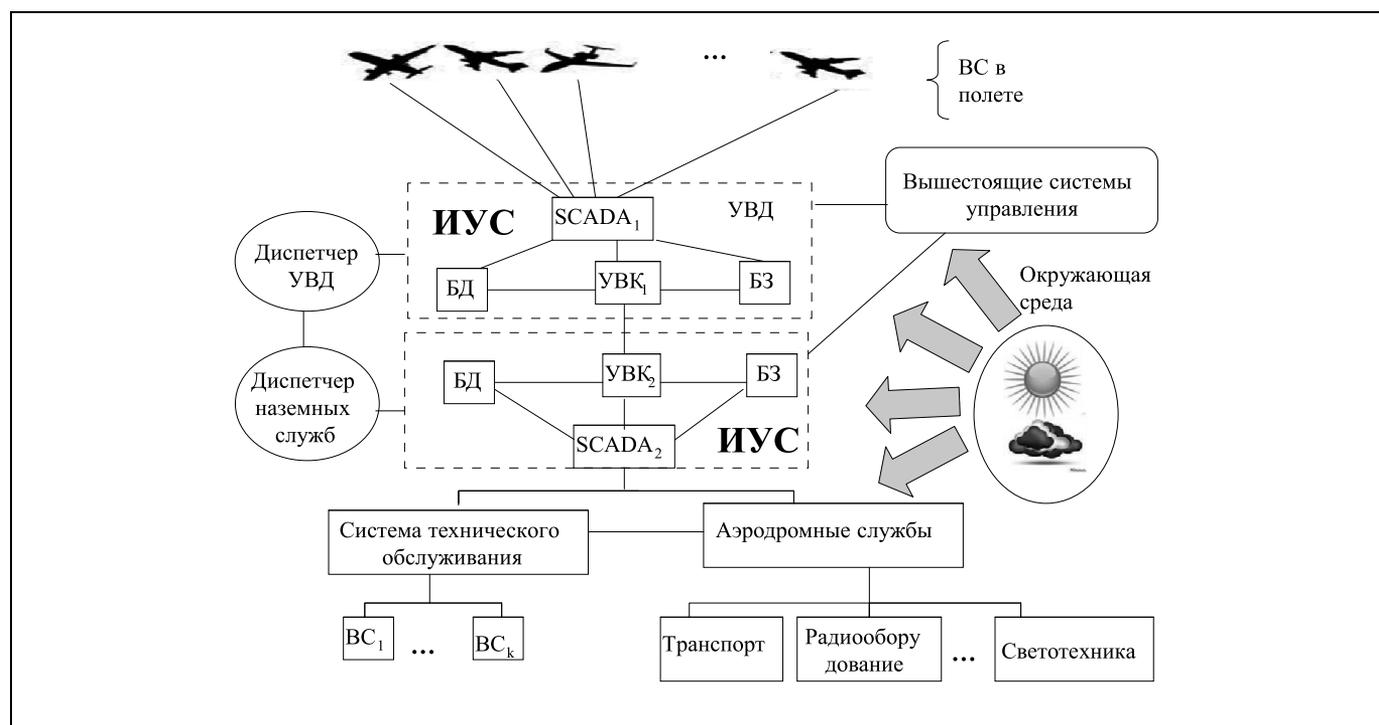
неблагоприятных сочетаний событий по степени их опасности и оценка вероятности их возникновения; 34 — формирование обучаемым списка мероприятий, необходимых для ликвидации причин возникшего неблагоприятного сочетания событий; 35 — сравнение списка действий, построенного обучаемым, с тестовым списком; 36 — оценка степени готовности обучаемого к принятию адекватных решений при возникновении различных неблагоприятных сочетаний событий; 37 — тест пройден успешно?; 38 — поощрение; 39 — занесение информации в БД об успешном обучении; 40 — разбор ошибок; 41 — занесение в БД; 42 — запуск процедуры сбора и анализа статистических данных о происшедших за месяц происшествиях, вызванных неблагоприятным сочетанием событий; 43 — определение повторяющихся происшествий; 44 — устранение причин возникновения повторяющихся неблагоприятных сочетаний событий; 45 — успешное?; 46 — выдача рекомендации о предотвращении неблагоприятного сочетания событий; 47 — занесение информации в БД; 48 — выдача рекомендаций об изменениях структуры АТС; 49 — внесение изменений в структуру АТС; 50 — накопление информации об управляющих воздействиях, реализованных в течение года; 51 — экспертная оценка размера экономического эффекта от реа-

лизации управляющих воздействий; 52 — уровень ожидаемого экономического эффекта от решения задачи достигнут или превышен?; 53 — анализ причин; 54 — коррекция плана действий, направленных на минимизацию ущерба от происшествий, вызванных неблагоприятным сочетанием событий; 55 — утверждение скорректированного плана действий; 56 — занесение информации в базу данных.

На рис. 2 приведена структура комплекса технических средств управления авиационной транспортной системой ПАО «Ил», в составе которой осуществляется внедрение информационно-управляющей системы (ИУС) на базе разработанного математического и информационно-программного обеспечения.

Для решения задачи управления АТС по критерию безопасности разработан комплекс математических моделей, включающий в себя совокупность деревьев отказов, характеризующих причины возникновения и пути развития аварийных и катастрофических ситуаций, вызванных неблагоприятными сочетаниями событий.

Построение деревьев отказов осуществляется методами достраивания и приведения, которые применяются при разработке ВС [8]. Например, для АТС на основе перспективного двухдвигатель-



**Рис. 2. Информационно-управляющая система для предотвращения неблагоприятных сочетаний событий в общей системе управления воздушным движением:** *ТС* — транспортные средства; *УВК* — управляющий вычислительный комплекс; *k* — число воздушных судов в контуре системы технического обслуживания

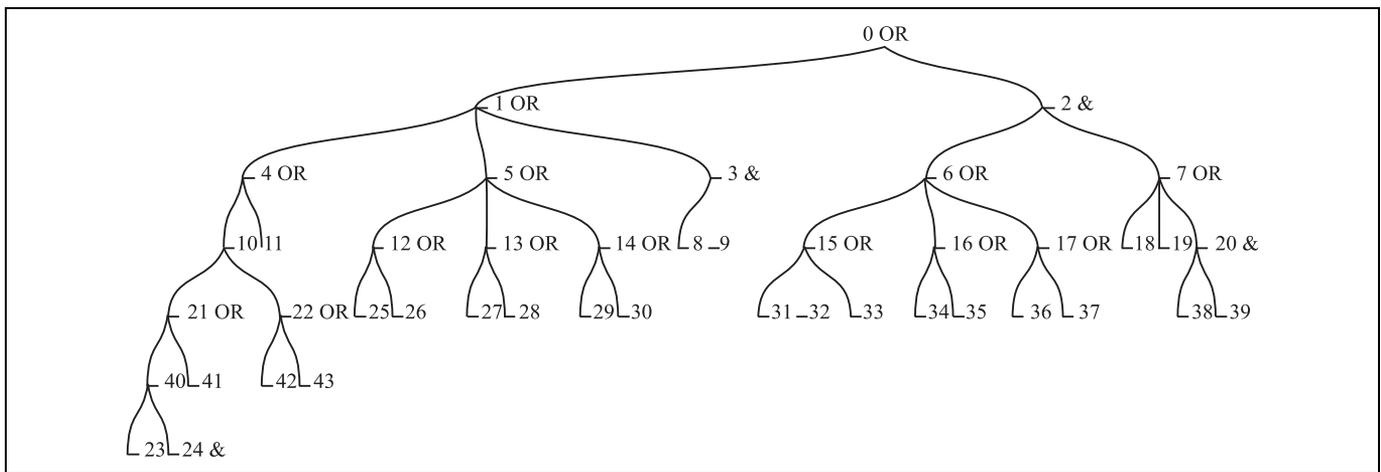


Рис. 3. Фрагмент дерева событий  $D$ , описывающий возникновение аварийной ситуации для перспективного двухдвигательного самолета

ного самолета фрагмент такого дерева отказов имеет вид, приведенный на рис. 3.

На рис. 3 приняты обозначения:  $0$  — аварийная ситуация;  $1$  — функциональные отказы (ФО);  $2$  — сочетания ФО воздушного судна;  $3$  — ошибки экипажа и параметры ожидаемых условий эксплуатации, создающие аварийную ситуацию при заходе ВС на посадку;  $4$  — уменьшение эффективности продольного или поперечного управления на  $1/2$ ;  $5$  — ФО пилотажного оборудования;  $6$  — ФО воздушного судна;  $7$  — ошибки экипажа и параметры внешних условий;  $8$  — отказ одного из двигателей ВС;  $9$  — отказ второго двигателя;  $10$  — заметное уменьшение по крену;  $11$  — потеря индикации пилотажных параметров;  $12$  — ложная индикация параметров у пилотирующего летчика;  $13$  — отказ автопилота при заходе;  $14$  — потеря эффективности руля направления (РН);  $15$  — потеря индикации у второго пилота;  $16$  — ложная у второго пилота;  $17$  — ошибки экипажа;  $18$  — неблагоприятные условия;  $19$  — сочетание неточностей в пилотировании;  $20$  — отказы гидропитания;  $21$  — ФО при управлении тангажом;  $22$  — ФО при управлении креном;  $23$  — сбой гидропитания;  $24$  — потеря индикации пространственного положения;  $25$  — потеря индикации скоростных параметров;  $26$  — ложная индикация положения;  $27$  — ложная индикация одного из высотно-скоростных параметров;  $28$  — ложная индикация стрелок;  $29$  — пропадание стрелок;  $30$  — отказы РН;  $31$  — отказы питания РН;  $32$  — отказ механизма РН;  $33$  — потеря пространственного положения;  $34$  — потеря скоростных параметров;  $35$  — ложная индикация положения;  $36$  — ложная индикация одного из высотно-скоростных параметров;  $37$  — боковой ветер  $8$  м/с и более;  $38$  — потеря давления;  $39$  — разгерметизация;  $40$  — потеря давления в гидросистеме;

$41$  — разгерметизация гидросистемы;  $42$  — обрыв секции руля высоты;  $43$  — заклинивание бустера;  $\&$  — символ конъюнкции; OR — символ дизъюнкции.

Анализ дерева событий позволяет определить множество минимальных сечений, используемых для моделирования неблагоприятных сочетаний событий. Для каждого неблагоприятного сочетания строится граф событий, отражающий структуру возникновения этого сочетания. На основе графов событий строятся системы дифференциальных уравнений в случае экспоненциального распределения времени между событиями, решение которых позволяет определить вероятности реализации минимальных сечений и определить, выполняется ли критерий (1). Значения интенсивностей  $\mu_i^*(t)$ ,  $i = \overline{1, k}$ , выбираются таким образом, чтобы значения вероятности возникновения аварии не превышали допустимые значения.

В случаях, когда распределение времени между событиями не экспоненциальное, вероятности аварий определяются путем достраивания текущей ситуации до схем известных аварий и катастроф в соответствии с технической документацией системы.

Для практической реализации математического обеспечения разработан пакет программ «Информационная система для поддержки принятия решений при управлении АТС», используемый в структурных подразделениях ПАО «Ил» в модели надежности и безопасности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен подход к повышению безопасности авиационных транспортных систем, основанный



на анализе неблагоприятных сочетаний событий, возникающих в процессе функционирования авиационно-транспортных систем. Разработана формальная постановка задачи управления авиационными транспортными системами по критерию безопасности. Для решения задачи предлагается применять модели и методы, позволяющие, исходя из текущей совокупности неблагоприятных событий, определять вероятности возникновения аварий и меры по их предотвращению.

Разработаны принципы построения и работы информационной системы поддержки принятия решения по предотвращению неблагоприятных сочетаний событий. Разработанное информационно-программное обеспечение внедрено в состав модели надежности и безопасности авиационно-транспортных систем в ПАО «Ил».

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Проблема критических сочетаний событий в системе «экипаж — воздушное судно — диспетчер»* / Г.В. Новожилов, А.Ф. Резчиков, М.С. Неймарк и др. // Полет. — 2015. — № 2. — С. 10—16.
2. *Резчиков А.Ф., Богомолов А.С.* Критические сочетания событий — причины аварий в человеко-машинных системах // Материалы восьмой междунар. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2015», 29 сент. — 1 окт. 2015 г., ИПУ РАН / под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. — М., 2015. — Т. 1. — С. 130—135.
3. *Резчиков А.Ф., Богомолов А.С.* Критические сочетания событий как причина аварий в человеко-машинных системах // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ-28: сб. тр. XXVIII междунар. науч. конф., / под общ. ред. А.А. Большакова. — Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2015; Ярославль: Ярослав. гос. техн. ун-т; Рязань: Рязанск. гос. радиотехн. ун-т, 2015. — Т. 6. — С. 151—153.
4. *Анализ критических ситуаций, вызванных неблагоприятным стечением обстоятельств* / В.В. Клюев, А.Ф. Резчиков, В.А. Кушников и др. // Контроль. Диагностика. — 2014. — № 7. — С. 12—16.
5. *Клюев В.В., Новожилов Г.В., Резчиков А.Ф., Богомолов А.С.* Ресурсный подход к обеспечению безопасности систем «человек-объект-среда». — М.: Спектр, 2014. — 158 с.
6. *Клюев В.В., Резчиков А.Ф., Богомолов А.С., Филимонок Л.Ю.* Взаимодействие ресурсов сложных человеко-машинных систем в критических ситуациях // Контроль. Диагностика. — 2013. — № 4. — С. 41—45.
7. *Человеческий фактор в авиационно-транспортных системах* / Г.В. Новожилов, А.Ф. Резчиков, М.С. Неймарк и др. // Полет. — 2013. — № 5. — С. 3—10.
8. *Новожилов Г.В., Неймарк М.С., Цесарский Л.Г.* Безопасность полета самолета: Концепция и технология. — М.: Изд-во МАИ, 2007. — 196 с.
9. *Викторова В.С., Ведерников Б.И., Спиридонов И.Б., Степанянец А.С.* Моделирование и анализ контролепригодности бортовых систем самолетов // Надежность. — 2007. — № 3. — С. 62.
10. *Викторова В.С., Степанянец А.С.* Проектный анализ контролепригодности технических систем (теория, методы расчета, программное обеспечение). — М.: ИПУ РАН, 2010. — 71 с.
11. *Кушников В.А., Резчиков А.Ф., Цвиркун А.Д.* Управление в человеко-машинных системах с автоматизированной процедурой коррекции целей // Автоматика и телемеханика. — 1998. — № 7. — С. 168—175.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Г. Лебедевым.*

**Богомолов Алексей Сергеевич** — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов, ✉ AlexBogomolov@ya.ru,

**Иващенко Владимир Андреевич** — д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник, Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов, ✉ iptmuran@san.ru,

**Кушников Вадим Алексеевич** — д-р техн. наук, директор, Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов, ✉ kushnikoff@yandex.ru,

**Резчиков Александр Федорович** — д-р техн. наук, чл.-корр. РАН, гл. науч. сотрудник, Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов; гл. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ iptmuran@san.ru,

**Цвиркун Анатолий Данилович** — д-р техн. наук, зав. лабораторией, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ tsvirkun@ipu.ru,

**Цесарский Лев Гершенович** — канд. техн. наук, зам. нач. отдела, «ОАК — центр комплексирования»; вед. конструктор, Авиационный комплекс им. С.В. Ильюшина, г. Москва,

**Филимонок Леонид Юрьевич** — канд. техн. наук, науч. сотрудник, Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов, ✉ filimonuyukleonid@mail.ru.

## Новая книга

**Козлов А.Д., Орлов В.Л.** *Методы и средства обеспечения информационной безопасности распределенных корпоративных систем.* — М.: ИПУ РАН, 2017. — 156 с. — ISBN 978-5-91450-207-9

Рассмотрены вопросы применения современных методов и средств обеспечения информационной безопасности в распределенных корпоративных системах. Основное внимание уделено алгоритмам шифрования и средствам организации электронной подписи, методам построения моделей угроз и нарушителя, использованию протокола HTTPS, проблемам, возникающим при проектировании защищенных информационных систем и методам повышения комфортабельности пользователей, а также практическим вопросам построения защитных средств при создании программно-обеспечения таких систем.

Для научных работников, студентов, аспирантов и специалистов в области защиты информации при построении распределенных информационных систем.