

Рубрика Сборника (окончательно выбирается редактором)

УДК 681.5
ББК 30.17

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗОПАСНОСТИ АВИАЦИОННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ СИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ¹

**Резчиков А. Ф.², Кушников В. А.³, Иващенко В. А.⁴,
Цесарский Л. Г.⁵, Богомолов А. С.⁶, Филимонюк Л. Ю.⁷,
Адамович К. Ю.⁸**

*(Институт проблем точной механики
и управления РАН, Саратов,
ФГБУО Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.,*

¹Работа поддержана грантом РФФИ 14-08-00490.

²Александр Федорович Резчиков, член-корреспондент РАН, научный руководитель ИПТМУ РАН (iptmuran@san.ru).

³Вадим Алексеевич Кушников, директор ИПТМУ РАН, доктор технических наук, профессор (iptmuran@san.ru).

⁴Иващенко Владимир Андреевич, доктор технических наук, ученый секретарь ИПТМУ РАН, профессор (iptmuran@san.ru).

⁵Лев Гершионович Цесарский, ведущий инженер-конструктор ОАО «Ил» (iptmuran@san.ru).

⁶Алексей Сергеевич Богомолов, кандидат физико-математических наук, с.н.с. ИПТМУ РАН, доцент (alexbogomolov@ya.ru).

⁷Леонид Юрьевич Филимонюк, кандидат технических наук, научный сотрудник ИПТМУ РАН (iptmuran@san.ru).

⁸Ксения Юрьевна Адамович, аспирантка ИПТМУ РАН (adamovich.ks@gmail.com).

ФГБУО НИУ Саратовский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского,
ОАО «Ил», Москва)

Разработана совокупность моделей системной динамики, позволяющая осуществлять анализ и прогнозирование основных характеристик безопасности авиационных транспортных систем. Предложен граф причинно-следственных связей между этими характеристиками и внешними воздействиями, положенный в основу системы дифференциальных уравнений, решение которой обеспечивает прогнозирование характеристик безопасности на заданных временных интервалах. Приведен пример применения предложенных моделей для прогнозирования характеристик безопасности пассажирских перевозок в СНГ.

Ключевые слова: авиационная транспортная система, функционирование системы, характеристики безопасности системы, модели системной динамики, прогнозирование.

1. Введение

Интенсивное развитие отечественного авиастроения, выход на зарубежные рынки авиаперевозок и поддержание обороноспособности страны невозможно обеспечить без существенного повышения уровня безопасности полетов, снижения количества и тяжести аварий и катастроф. Это приобретает особую значимость в условиях, когда количество аварий и авиационных происшествий в странах СНГ за 2000-2011 гг. не имеет выраженной тенденции к уменьшению (рис. 1) [21].

Исследования в области повышения безопасности авиационных перевозок в настоящее время интенсивно ведутся на стыке многих наук, таких как авиастроение, машиностроение, приборостроение, информатика, теория управления и др. [1, 2, 4, 6, 7, 10-13, 15, 18].



Рис. 1. Количество происшествий и катастроф в гражданской авиации стран Межгосударственного авиационного комитета на 100 тыс. часов налета в 2000-2011 гг.

Один из перспективных путей решения данной проблемы неразрывно связан с применением теории системного анализа и современных средств обработки информации, направленных на совершенствование математических моделей, методов, алгоритмов и реализующего их математического обеспечения управления авиационными транспортными системами (АТС) [18].

Разработка теоретических основ управления сложными человеко-машинными системами [18] и практическое использование этих основ позволяют создавать автоматизированные комплексы управления АТС по различным показателям эффективности их функционирования, включая безопасность [11, 16, 17, 19].

Несмотря на достигнутые успехи в этом направлении, в настоящее время практически отсутствуют сведения об автоматизированных комплексах управления АТС, позволяющих осуществлять прогнозирование характеристик безопасности для обеспечения своевременного принятия решений по предотвращению аварий и катастроф при их функционировании.

Необходимо отметить, что решение данной проблемы посредством привлечения даже значительного числа экспертов в области авиации представляется весьма затруднительным. Это обусловлено тем, что учесть огромное количество положительных и отрицательных причинно-следственных взаимосвязей между характеристиками безопасности АТС, тем более в сжатые сроки, возможно только с применением современной вычислительной техники.

К тому же обеспечение безопасности функционирования АТС требует системного учета ресурсов, позволяющих осуществлять анализ и парирование всевозможных критических сочетаний ситуаций, вызванных неблагоприятным стечением обстоятельств, которые возникают при их функционировании [5]. Это также требует применения вычислительной техники.

2. Постановка задачи

Объектом исследования являются авиационные транспортные системы стран, подписавших в 1991 году межправительственное соглашение о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства – соглашение о Межгосударственном авиационном комитете (МАК).

Участниками соглашения о МАК являются Азербайджанская Республика, Республика Армения, Республика Беларусь, Республика Казахстан, Кыргызская Республика, Республика Молдова, Российская Федерация, Республика Таджикистан, Туркменистан, Республика Узбекистан и Украина.

В России наряду с Министерством транспорта, Федеральным агентством воздушного транспорта (Росавиация) и Федеральной антимонопольной службой (ФАС) МАК вовлечен в управление и регулирование авиаперевозок. Функциями МАК являются сертификация воздушных судов, аэродромов и авиакомпаний, ведение Авиарегистра, а также расследование происшествий на воздушном транспорте.

Задача данного исследования заключается в разработке на базе аппарата системной динамики математической модели для прогнозирования характеристик безопасности функционирования АТС, что необходимо для своевременного принятия решений по предотвращению аварий и катастроф.

3. Метод решения задачи

Для решения задачи предлагается разработать математическую модель на основе системной динамики [8, 9, 20]. Для этого необходимо:

- определить совокупность прогнозируемых переменных, характеризующих безопасность функционирования АТС, и внешние факторы, оказывающие влияние на эти переменные;

- построить граф причинно-следственных связей, отражающий взаимосвязи между переменными и влияние внешних факторов на них [14];

- записать систему уравнений системной динамики и разработать алгоритм ее решения;

- в результате решения системы уравнений определить значения прогнозируемых переменных на заданных интервалах времени;

- выполнить анализ адекватности построенной модели по ретроспективным данным.

Изучение особенностей функционирования АТС [21] позволило выделить следующий список переменных, определяющих безопасность данных систем:

$X_{\text{трени}}(t)$ – время подготовки пилотов на современных сертифицированных тренажерах (часов в год);

$X_{\text{проис}}(t)$ – среднее число авиационных происшествий на 100 тыс. часов налёта в год (ГОСТ В 23743-88);

$X_{\text{рег}}(t)$ – доля воздушных судов, оснащенных системой аварийной регистрации;

$X_{\text{инф}}(t)$ – степень обеспеченности руководства и службы управления воздушным движением (УВД) информацией об авариях;

$X_{пов}(t)$ – повторяемость причин авиационных происшествий;
 $X_{нар}(t)$ – среднее количество нарушений инструкций пилотами на 100 тыс. часов налёта;

$X_{кон}(t)$ – доля воздушных судов, находящихся на авторском контроле в процессе эксплуатации.

Кроме того, в состав модели входят параметры, которые считаются независимыми от переменных системы, но влияют на прогнозируемые характеристики безопасности АТС (внешние факторы):

Res(t) – средняя по воздушным судам выработка ресурса до списания (ГОСТ В 23743-88);

For(t) – доля иностранных воздушных судов;

Obs(t) – доля полетов с использованием системы наблюдения за полетами;

Exper(t) – средний лётный стаж пилотов;

Price(t) – стоимость авиационного топлива;

Port(t) – средняя выработка срока службы аэродромного оборудования.

Каждая переменная системы имеет связи с другими переменными и внешними факторами, увеличивающими или уменьшающими их значение. Для отражения этого взаимодействия построен граф причинно-следственных связей. При этом для каждой переменной в графе существует вершина с обозначением положительных и отрицательных связей.

Вершина графа имеет два дополнительных терминала, в верхний из которых входят дуги от вершин, которые увеличивают значение соответствующей переменной, а в нижний – дуги от вершин, уменьшающих ее значение.

Например, на рис. 2 представлена вершина графа, обозначающая переменную $X_{нар}$ – среднее количество нарушений инструкций пилотами.

Переменные и внешние факторы, положительно влияющие на рост $X_{нар}$, обозначены через $X_{нар}^+$, а отрицательно влияющие – через $X_{нар}^-$. Переменные системы, на рост которых $X_{нар}$ влияет

положительно, обозначены через $Y_{нар}^+$, а отрицательно – через $Y_{нар}^-$. Пунктирные линии обозначают отрицательные, а сплошные линии – положительные связи.

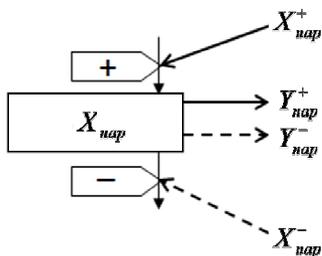


Рис. 2. Вершина графа причинно-следственных связей

На рис. 3 представлен граф причинно-следственных связей переменных, характеризующих безопасность авиационной транспортной системы.

На основе графа причинно-следственных связей строится система дифференциальных уравнений, каждое из которых имеет вид

$$\frac{dX_i}{dt} = X_i^+ - X_i^-; \quad F_i^+(\bullet) = S_i^+ \Pi_i^+; \quad F_i^-(\bullet) = S_i^- \Pi_i^-,$$

где X_i – моделируемая характеристика АТС; S_i^+ и Π_i^+ – соответственно сумма внешних факторов и произведение переменных, положительно, а S_i^- и Π_i^- – отрицательно влияющих на рост переменной X_i .

Таким образом, для составления дифференциальных уравнений системной динамики используется соотношение вида

$$\frac{dX_i}{dt} = S_i^+ \Pi_i^+ - S_i^- \Pi_i^-.$$

На основе данного соотношения построена система дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}
 & dX_{\text{трен}}/dt = f_{\text{инф-трен}}(X_{\text{инф}})\mathbf{Obs} - \mathbf{Price} \\
 & dX_{\text{про}}/dt = (\mathbf{Res}+\mathbf{For}+ \mathbf{Port})f_{\text{нар-про}}(X_{\text{нар}}) - \\
 & - (\mathbf{Exper} + \mathbf{Obs})f_{\text{трен-про}}(X_{\text{трен}})f_{\text{рег-про}}(X_{\text{рег}})f_{\text{инф-про}}(X_{\text{инф}}) \times \\
 & \times f_{\text{кон-про}}(X_{\text{кон}}) \\
 (1) \quad & dX_{\text{рег}}/dt = f_{\text{кон-рег}}(X_{\text{кон}}) - \mathbf{Price} \\
 & dX_{\text{инф}}/dt = f_{\text{рег-инф}}(X_{\text{рег}})\mathbf{Obs} \\
 & dX_{\text{пов}}/dt = - (\mathbf{Exper}+\mathbf{Obs})f_{\text{трен-пов}}(X_{\text{трен}})f_{\text{рег-пов}}(X_{\text{рег}}) \times \\
 & \times f_{\text{инф-пов}}(X_{\text{инф}})f_{\text{кон-пов}}(X_{\text{кон}}) \\
 & dX_{\text{нар}}/dt = (\mathbf{Price}+\mathbf{For}) - f_{\text{трен-нар}}(X_{\text{трен}})\mathbf{Obs} \\
 & dX_{\text{кон}}/dt = f_{\text{рег-кон}}(X_{\text{рег}})f_{\text{инф-кон}}(X_{\text{инф}})\mathbf{Obs} - \mathbf{For}.
 \end{aligned}$$

Выражения вида $f_{A-B}(X_A)$ обозначают зависимости переменной X_B от X_A , определяемые на основе регрессионных моделей. С учетом данных выражений система (1) примет вид

$$\begin{aligned}
 & dX_{\text{трен}}/dt = 0.12X_{\text{инф}}\mathbf{Obs}(t) - 0.02\mathbf{Price}(t) \\
 & dX_{\text{про}}/dt = 0.0004(\mathbf{Res}(t) + \mathbf{Port}(t) + \mathbf{For}(t))(0.8X_{\text{нар}}^2 - 0.4X_{\text{нар}}) - \\
 & - 0.08(\mathbf{Exper}(t) + \mathbf{Obs}(t))(4/X_{\text{трен}}^2 + \lg X_{\text{трен}} \lg(X_{\text{рег}}/4) \lg(X_{\text{инф}}/4) \times \\
 & \times (1/X_{\text{кон}}^2 \lg X_{\text{кон}})) \\
 (2) \quad & dX_{\text{рег}}/dt = 0.15 \lg X_{\text{кон}} - 0.001\mathbf{Price}(t) \\
 & dX_{\text{инф}}/dt = 0.1X_{\text{рег}} \mathbf{Obs}(t) \\
 & dX_{\text{пов}}/dt = - 0.005(\mathbf{Exper}(t) + \mathbf{Obs}(t)) X_{\text{трен}} \lg(X_{\text{рег}}/8) \times \\
 & \times X_{\text{инф}} \lg(X_{\text{кон}}/8) \\
 & dX_{\text{нар}}/dt = 0.01(\mathbf{Price}(t) + \mathbf{For}(t)) - 0.5 \lg X_{\text{трен}} \lg X_{\text{трен}} \mathbf{Obs}(t) \\
 & dX_{\text{кон}}/dt = 0.4X_{\text{рег}} \lg X_{\text{инф}} \mathbf{Obs}(t) - 0.01\mathbf{For}(t),
 \end{aligned}$$

где внешние факторы:

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{Res}(t) = 1 + 0.5 \sin t \\
 & \mathbf{Foreign}(t) = 0.25t^2 - 0.2t + 1 \\
 (3) \quad & \mathbf{Obs}(t) = 1 + 0.05t \\
 & \mathbf{Exper}(t) = 1 + 0.7 \cos t \\
 & \mathbf{Price}(t) = 0.25t^2 - 1.1t + 2 + 0.5t \sin t \\
 & \mathbf{Port}(t) = 1 + 0.2 \sin t.
 \end{aligned}$$

При составлении уравнений системы (2) значения переменных и внешних факторов нормируются по соответствующему году.

Время исчисляется количеством лет, за момент $t = 0$ принимается 1992 год. С учетом (2) и (3) система (1) приобретает вид

$$\begin{aligned}
 & dX_{\text{трн}}/dt = 0.12X_{\text{инф}} + 0.06X_{\text{инф}} \sin t - 0.005t^2 + 0.022t - \\
 & - 0.04 - 0.01t \sin t \\
 & dX_{\text{про}}/dt = 0.00096X_{\text{нар}}^2 + 0.000224X_{\text{нар}}^2 \sin t + 0.00008X_{\text{нар}}^2 t^2 - \\
 & - 0.000064X_{\text{нар}}^2 t - 0.00048X_{\text{нар}} + 0.000112X_{\text{нар}} \sin t + 0.00004 \times \\
 & \times X_{\text{нар}} t^2 - 0.000032X_{\text{нар}} t - (0.016 + 0.056\cos t) + 0.04\sin t) \times \\
 & \times (4 + X_{\text{трн}}^2 \lg X_{\text{трн}})(\lg X_{\text{рег}} - \lg 4)(\lg X_{\text{инф}} - \lg 4) \lg X_{\text{кон}} / (X_{\text{трн}}^2 X_{\text{кон}}^2) \\
 & dX_{\text{рег}}/dt = 0.15 \lg X_{\text{кон}} - 0.00025t^2 + 0.0011t - 0.002 - \\
 & - 0.0005t \sin t) \\
 (4) \quad & dX_{\text{инф}}/dt = 0.1X_{\text{рег}} + 0.05X_{\text{рег}} \sin t \\
 & dX_{\text{пов}}/dt = - 0.01X_{\text{трн}} \lg(X_{\text{рег}}/8) X_{\text{инф}} \lg(X_{\text{кон}}/8) - 0.003\cos t \times \\
 & \times X_{\text{трн}} \lg(X_{\text{рег}}/8) X_{\text{инф}} \lg(X_{\text{кон}}/8) - 0.0025\sin t X_{\text{трн}} \times \\
 & \times \lg(X_{\text{рег}}/8) X_{\text{инф}} \lg(X_{\text{кон}}/8) \\
 & dX_{\text{нар}}/dt = 0.005t^2 - 0.013t + 0.03 + 0.005t \sin t - 0.5 \lg X_{\text{трн}} \times \\
 & \times \lg X_{\text{трн}} - 0.25 \lg X_{\text{трн}} \lg X_{\text{трн}} \sin t \\
 & dX_{\text{кон}}/dt = 0.4X_{\text{рег}} \lg X_{\text{инф}} + 0.2X_{\text{рег}} \lg X_{\text{инф}} \sin t - 0.025t^2 + \\
 & + 0.002t - 0.01
 \end{aligned}$$

Полученная система нелинейных дифференциальных уравнений решается с использованием метода Рунге-Кутты 4 порядка. Ниже приведены результаты прогнозирования характеристик безопасности авиационной транспортной системы на временном интервале с 1992 г. по 2009 г. Они позволяют выявить основные тенденции изменения данных характеристик, что необходимо при принятии управленческих решений для обеспечения безопасности функционирования АТС.

4. Анализ результатов решения задачи

При проведении вычислительного эксперимента используем статистические данные по авиационным происшествиям для 100 тыс. часов налёта за 20 лет [21]. Система (4) решена при следующих начальных условиях: $X_{\text{трн}}(0) = 1$; $X_{\text{про}}(0) = 1$; $X_{\text{рег}}(0) = 1$; $X_{\text{инф}}(0) = 1$; $X_{\text{пов}}(0) = 2$; $X_{\text{нар}}(0) = 3$; $X_{\text{кон}}(0) = 1$.

На рис. 4 представлены графики решений этой системы уравнений.

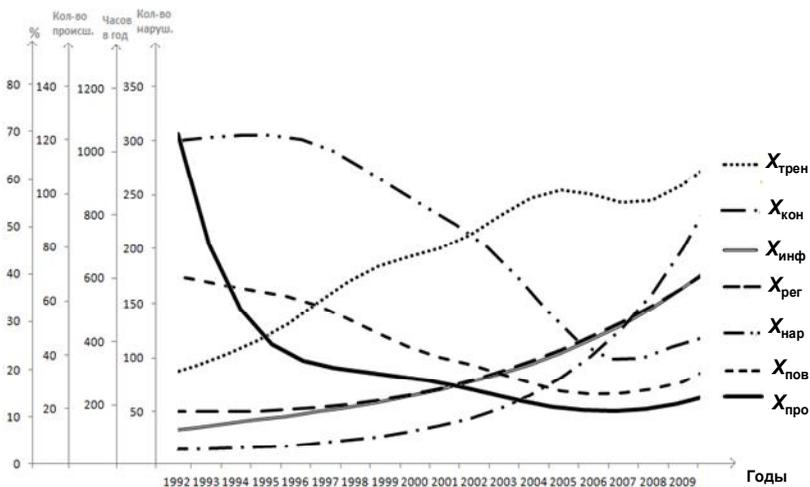


Рис. 4. Динамика значений характеристик безопасности функционирования авиационной транспортной системы

Среди полученных численных решений особый интерес представляет график количества авиационных происшествий $X_{про}(t)$ (рис. 5).

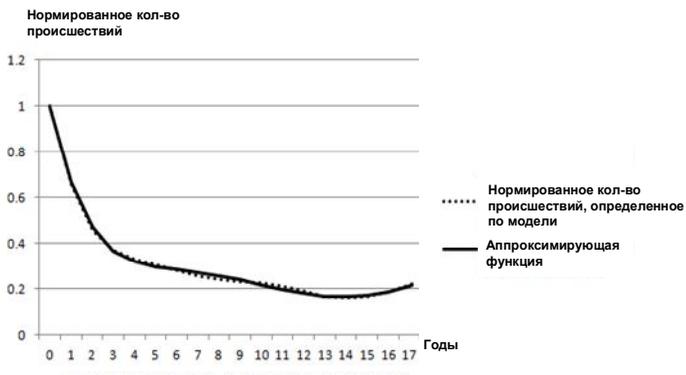


Рис. 5. Динамика нормированного количества авиационных происшествий

Данный график не имеет волнообразных элементов. Это означает, что влияние стоимости авиационного керосина, которая имеет периодическую компоненту, в общем случае отрицательно сказывающейся на количестве происшествий, скомпенсировано постоянно растущим числом более экономичных иностранных воздушных судов и возрастанием времени подготовки экипажей на тренажерах при переобучении и повышении классной квалификации.

Наименьшее количество происшествий $X_{\text{про}}(t)$ зафиксировано в 2006 г., что объясняется минимумом повторяемости инцидентов и минимальным числом зафиксированных нарушений инструкций экипажами воздушных судов, а также сравнительно невысокой стоимостью авиационного керосина, а также возросшим временем подготовки экипажей на тренажерах.

Функция $X_{\text{про}}(t)$ убывает с 1992 г. по 2006 г., что совпадает с промежутком пополнения парка иностранными самолетами, внедрением тренажеров и тренировками экипажей на них.

Функция $X_{\text{про}}(t)$ возрастает с 2006 г. по 2009 г., что объясняется сокращением расходов авиакомпаний, повлекшем за собой уменьшение числа новых воздушных судов, а также сокращение числа часов работы на тренажерах на фоне роста стоимости авиационного керосина.

На графике имеется точка перегиба, соответствующая 1999 г. – началу периода внедрения систем аварийной регистрации нарушений функционирования пилотажных комплексов нового поколения, что привело к более быстрому сокращению количества ошибок членов экипажей.

Результаты приведенного анализа подтверждаются статистическими данными [3].

Аналогичный анализ проведен по каждой переменной системы (табл. 1).

Рубрика Сборника (окончательно выбирается редактором)

Таблица 1. Результаты анализа состояния авиационных транспортных систем, определяющего безопасность их функционирования за 1992-2009 гг.

Название системного уровня	Точки экстремума (минимумы)	Точки экстремума (максимумы)	Наибольшее значение на (1992,2009)	Наименьшее значение на (1992,2009)	Промежутки возрастания	Промежутки убывания	Выпуклость/вогнутость и точки перегиба на (1992,2009)
Нормированное среднее число авиационных происшествий на 100 тыс. часов налёта	Первая половина 1992 г. – точка локального минимума	Не имеет локальных максимумов	27 – наибольшее значение в 2009 г.	124 – наименьшее значение в 2005 г.	Функция возрастает на (2005, 2009)	Функция убывает на (1992, 2006)	$t_1 = 1998$ г., $t_2 = 2002$ г. функция выпуклая на (1998, 2002) и вогнутая на (1992, 1998), (2002, 2009)
Время подготовки пилотов на современных сертифицированных тренажерах (часов в год)	Первая половина 1992 г. – точка локального минимума, 2009 г. – точка локального минимума	2006 г. – точка локального максимума	900 – наибольшее значение в 2009 г.	300 – наименьшее значение в начале 1992 г.	Функция возрастает на (первая половина 1992, 2005)	Функция убывает на (1992, середина 1992), (2006, 2007)	t_1 =конец 1998 г., t_2 =1999 г., $t_3 = 2001$ г., $t_4 = 2008$ г., функция выпуклая на (1995,1999), (2001, 2008) и вогнутая на (1992, 1995), (1999, 2001), (2008, 2009)

Управление большими системами. Выпуск ??

Повторяемость причин авиационных происшествий	2007 г. – точка локального минимума	Не имеет локальных максимумов	40 – наибольшее значение в 1992 г.	2 – наименьшее значение в 2007 г.	Функция возрастает на (2007, 2009)	Функция убывает на (1992, 2007)	$t =$ начало 2000 г., функция выпуклая на (1992, начало 2000) и вогнутая на (начало 2000, 2009)
Обеспеченность руководства авиакомпании и службы УВД информацией об авариях	Не имеет локальных минимумов	Не имеет локальных максимумов	37 – наибольшее значение в 2009 г.	7 – наименьшее значение в начале 1993 г.	Функция возрастает на (1992, 2009)	Функция не убывает	$t1 =$ первая половина 1993 г. – точка перегиба, функция выпуклая на (1992, 1993) и вогнутая на (1993, 2009)
Доля воздушных судов, оснащенных системой аварийной регистрации	Первая половина 1993 г. – точка локального минимума	Не имеет локальных максимумов	37 – наибольшее значение в 2009 г.	11 – наименьшее значение в середине 1993 г.	Функция возрастает на (1993, 2009)	Функция убывает на (1992, середина 1993)	На (1992, 2009) нет точек перегиба

Рубрика Сборника (окончательно выбирается редактором)

Среднее количество нарушений инструкций пилотами на 100 тыс. часов налёта	1993 г. – точка локального минимума, 2007 г. – точка локального минимума	1995 г. – точка локального максимума	300 – наибольшее значение в 1992 г.	100 – наименьшее значение в 2007 г.	Функция возрастает на (1993, 1995) и (2007, 2009)	Функция убывает на (1992, 1993) и (1995, 2007)	Функция выпуклая на (1994, вторая половина 2001) и вогнутая на (1992, 1994)
Доля воздушных судов, находящихся на авторском контроле эксплуатации	Не имеет локальных минимумов	Не имеет локальных максимумов	84 – наибольшее значение в 2012 г.	1.86 – наименьшее значение во второй половине 1992 г.	Функция возрастает на (2007, 2009)	Функция не убывает	Функция выпуклая на (1992, 1997) и вогнутая на (1997, 2009)

На рис. 6 приведена оценка соответствия полученных значений функции $\hat{X}_{\text{про}}(t)$ реальным статистическим данным за 1992-2009 гг. [3].

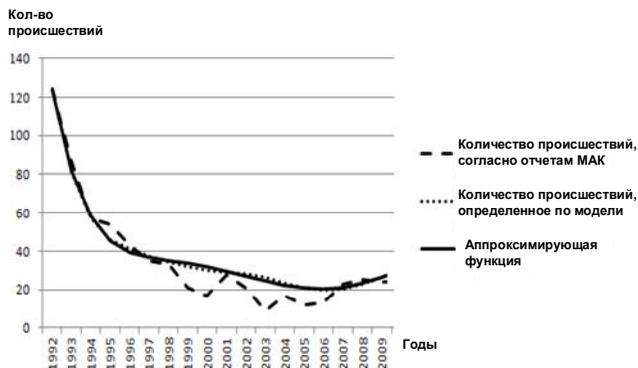


Рис. 6. Фактическое количество авиационных происшествий и его аппроксимация

Из рис. 6 следует, что количество происшествий, определенное по разработанной модели, по тенденции совпадает с данными статистики [3] и наиболее близко к ним в периоды 1992-1998 и 2007-2008 гг.

5. Хаотические явления в системе

Разработанная модель позволяет провести вычислительные эксперименты для выявления условий возникновения неустойчивых режимов при функционировании АТС и формирования управляющих воздействий для их предотвращения.

Ниже приведен один из вариантов такого режима, который получен при следующих значениях переменных и внешних факторов системы уравнений (4):

– время подготовки пилотов на современных сертифицированных тренажерах – 22 часа в год (нормированное значение $X_{\text{трени}}(t) = 2.2$);

Рубрика Сборника (окончательно выбирается редактором)

- доля воздушных судов, оснащенных системой аварийной регистрации – 100% (нормированное значение $X_{\text{рег}}(t) = 5$);
 - доля воздушных судов, находящихся на авторском контроле эксплуатации – 80% (нормированное значение $X_{\text{кон}}(t) = 10$);
 - обеспеченность руководства и службы УВД информацией об авариях – 70% (нормированное значение $X_{\text{инф}}(t) = 10$);
 - средняя по воздушным судам выработка ресурса до списания – 80% (нормированное значение $\mathbf{Res}(t) = 10$);
 - доля иностранных воздушных судов составляло 50% (нормированное значение $\mathbf{For}(t) = 1$);
 - доля полетов с использованием системы наблюдения за полетами – 50% (нормированное значение $\mathbf{Obs}(t) = 5$);
 - средний лётный стаж пилотов – 15 лет (нормированное значение $\mathbf{Exper}(t) = 5$);
 - стоимость авиационного топлива – 250 тыс. рублей за тонну (нормированное значение $\mathbf{Price}(t) = 10$);
 - средняя выработка срока службы аэродромного оборудования – 80 % (нормированное значение $\mathbf{Port}(t) = 5$).
- В результате система уравнений (4) примет вид

$$\begin{aligned}
 dX_{\text{нар}}/dt &= (\mathbf{Price} + \mathbf{For}) \lg(0.07 X_{\text{рег}}) X_{\text{нар}} - \mathbf{Obs} \lg \frac{X_{\text{трех}}}{8} \lg(X_{\text{кон}}) X_{\text{пов}} \\
 (5) \quad dX_{\text{пов}}/dt &= - \left(X_{\text{про}} - \lg X_{\text{инф}} X_{\text{трех}} \lg X_{\text{рег}}^2 \frac{X_{\text{инф}}}{X_{\text{рег}}} \right) X_{\text{нар}} - \frac{\lg X_{\text{кон}}}{2} X_{\text{пов}} \\
 dX_{\text{про}}/dt &= 0.6(\mathbf{Res} + \mathbf{For} + \mathbf{Port}) X_{\text{нар}} X_{\text{пов}} - 0.1(\mathbf{Exper} + \mathbf{Obs}) \times \\
 &\times \left(\frac{4}{X_{\text{трех}}^2} + \lg X_{\text{трех}} \right) \frac{\lg X_{\text{кон}}}{X_{\text{кон}}^2} \lg 4 X_{\text{рег}} X_{\text{инф}} \lg 4 X_{\text{инф}} X_{\text{про}}.
 \end{aligned}$$

При фиксированных значениях $X_{\text{трех}}(t) = 2,2$, $X_{\text{рег}}(t) = 5$, $X_{\text{кон}}(t) = 10$, $X_{\text{инф}}(t) = 10$, $\mathbf{Res}(t) = 10$, $\mathbf{For}(t) = 1$, $\mathbf{Obs}(t) = 5$, $\mathbf{Exper}(t) = 5$, $\mathbf{Price}(t) = 10$, $\mathbf{Port}(t) = 5$ система дифференциальных уравнений (5) представляет собой известную систему уравнений Лоренца, имеющую вид

$$\begin{cases} x' = \sigma(y - x) \\ y' = x(r - z) - y, \\ z' = xy - bz \end{cases}$$

где $x = X_{\text{нар}}$, $y = X_{\text{пов}}$, $z = X_{\text{пов}}$, $\sigma = \mathbf{Obs} \log \frac{X_{\text{трен}}}{8} \log X_{\text{кон}} \approx$

$\approx \mathbf{Price} + \mathbf{For} = 10$, $r = -\log(X_{\text{инф}})X_{\text{трен}} \lg X_{\text{рег}}^2 \frac{X_{\text{инф}}}{X_{\text{рег}}} \approx 28$,

$b = \left(\frac{4}{X_{\text{трен}}^2} + \lg X_{\text{трен}} \right) \frac{\lg X_{\text{кон}}}{X_{\text{кон}}^2} \lg(4X_{\text{рег}})X_{\text{инф}} \lg(4X_{\text{инф}}) \approx 8/3$.

На рис. 7 представлен фазовый портрет (график аттрактора) исследуемой системы.

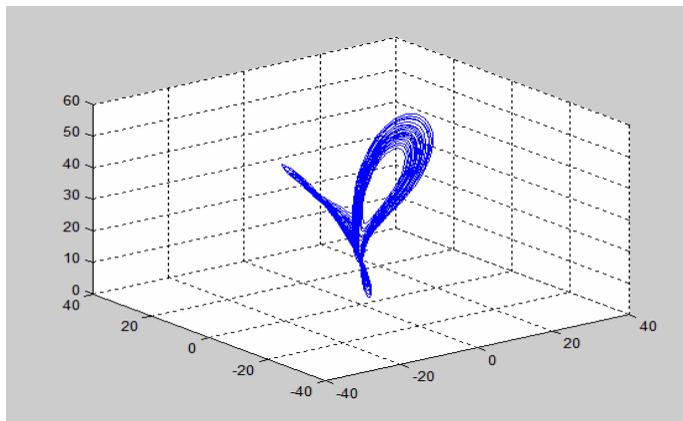


Рис. 7. Фазовый портрет системы при $X_{\text{трен}}(t) = 2,2$, $X_{\text{рег}}(t) = 5$,
 $X_{\text{кон}}(t) = 10$, $X_{\text{инф}}(t) = 10$, $\mathbf{Res}(t) = 10$, $\mathbf{For}(t) = 1$, $\mathbf{Obs}(t) = 5$,
 $\mathbf{Exper}(t) = 5$, $\mathbf{Price}(t) = 10$, $\mathbf{Port}(t) = 5$

Таким образом, при приведенных выше сочетаниях значений переменных и внешних факторов система уравнений (5) демонстрирует нестабильное, хаотическое, поведение.

6. Заключение

Разработаны модели системной динамики, позволяющие осуществить прогнозирование характеристик безопасности авиационных транспортных систем.

Построен граф причинно-следственных связей, отражающий взаимосвязи между прогнозируемыми переменными. На основе указанного графа составлена система нелинейных дифференциальных уравнений, решение которой позволяет осуществлять анализ и прогнозирование характеристик безопасности функционирования авиационных транспортных систем на заданных интервалах их функционирования.

С помощью разработанной модели выявлены тенденции изменения прогнозируемых характеристик, что необходимо при принятии управленческих решений для обеспечения безопасности функционирования авиационных транспортных систем.

Приведен пример практического применения предложенного подхода для прогнозирования характеристик безопасности авиационных транспортных систем. Рассмотрен один из режимов их функционирования, при котором возникают хаотические явления.

Литература

1. ИВАНОВ А.С., ЛАПКОВСКИЙ Р.Ю., УКОВ Д.А., ФИЛИМОНЮК Л.Ю. *Кибернетический подход к моделированию разнородных процессов в мехатронных системах* // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – №1(118). – С.16-20.
2. ИВАНОВ А.С., ЛАПКОВСКИЙ Р.Ю., УКОВ Д.А., ФИЛИМОНЮК Л.Ю. *Причинно-следственный подход к расследованию аварийных ситуаций в человеко-машинных системах* // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – №2. – С. 38- 43.
3. КАЗАК В.М., ТАЧИННИНА Е.Н., ТАЧИНИН Е.В. *Концепция повышения безотказности полета путем применения бортовой интеллектуальной интегрированной системы*

- управления в особых ситуациях в полете [Электронный ресурс]. URL: http://www.mak.ru/russian/info/doklad_bp/2005/doklad_2000-2004 (дата обращения: 02.10.2015).
4. КЛЮЕВ В.В., БАЙБУРИН В.Б., РЕЗЧИКОВ А.Ф. и др. *Модели и алгоритмы мониторинга глобальной безопасности на основе деревьев событий* // Контроль. Диагностика. –2015. – №8. – С. 70-74.
 5. КЛЮЕВ В.В., НОВОЖИЛОВ Г.В., РЕЗЧИКОВ А.Ф., БОГОМОЛОВ А.С. *Ресурсный подход к обеспечению безопасности систем «ЧЕЛОВЕК-ОБЪЕКТ-СРЕДА»*. – М.: Издательский дом «Спектр», 2014. – 158 с.
 6. КЛЮЕВ В.В., РЕЗЧИКОВ А.Ф., БОГОМОЛОВ А.С., ФИЛИМОНЮК Л.Ю. *Взаимодействие ресурсов сложных человеко-машинных систем в критических ситуациях* // Контроль. Диагностика. – 2013. – №4. – С. 41-45.
 7. КЛЮЕВ В.В., РЕЗЧИКОВ А.Ф., БОГОМОЛОВ А.С., ФИЛИМОНЮК Л.Ю. *Концепция комплексного ресурса для исследования безопасности систем «Человек – Объект – Среда»* // Контроль. Диагностика. – 2013. – №8. – С. 44-55.
 8. КЛЮЕВ В.В., РЕЗЧИКОВ А.Ф., КУШНИКОВ В.А., и др. *Анализ критических ситуаций, вызванных неблагоприятным стечением обстоятельств* // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 7. – С. 12-16.
 9. МАХОВ С.А. *Математическое моделирование мировой динамики и устойчивого развития на примере модели Форрестера* // Новое в синергетике: Новая реальность, новые проблемы, новое поколение. – М.: Наука, 2007. – С. 79-101.
 10. НЕЙМАРК М.С., ЦЕСАРСКИЙ Л.Г., ФИЛИМОНЮК Л.Ю. *Модель поддержки принятия решений при входе воздушных судов в зону ответственности аэропорта* // Общероссийский научно-технический журнал "Полет". – 2013. – №3. – С. 31-37.
 11. НОВОЖИЛОВ Г.В., НЕЙМАРК М.С., ЦЕСАРСКИЙ Л.Г. *Безопасность полета самолета: Концепция и технология*. – М.: Изд-во МАИ, 2007. – 196 с.
 12. НОВОЖИЛОВ Г.В., РЕЗЧИКОВ А.Ф., НЕЙМАРК М.С. и др. *Причинно-следственный подход к анализу авиационно-*

- транспортных систем // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». – 2011. – №7. – С. 3-8.*
13. НОВОЖИЛОВ Г.В., РЕЗЧИКОВ А.Ф., НЕЙМАРК М.С. и др. *Проблема критических сочетаний событий в системе «экипаж – воздушное судно – диспетчер» // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». – 2015. – №2. – С. 10-16.*
 14. НОВОЖИЛОВ Г.В., РЕЗЧИКОВ А.Ф., НЕЙМАРК М.С. и др. *Управление авиационно-транспортными системами на основе причинно-следственных деревьев событий // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2015. – № 6. – С. 13-17.*
 15. НОВОЖИЛОВ Г.В., РЕЗЧИКОВ А.Ф., НЕЙМАРК М.С. и др. *Человеческий фактор в авиационно-транспортных системах // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». – 2013. – №5. – С. 3-10.*
 16. РЕЗЧИКОВ А.Ф., БОГОМОЛОВ А.С., ИВАЩЕНКО В.А., ФИЛИМОНЮК Л.Ю. *Подход к обеспечению и поддержанию безопасности сложных систем на основе автоматных моделей // Управление большими системами // Сборник трудов. М.: ИПУ РАН – Выпуск 54 – 2015. – С. 179-194.*
 17. РЕЗЧИКОВ А.Ф., ТВЕРДОХЛЕБОВ В.А. *Причинно-следственные комплексы взаимодействий в производственных процессах // Проблемы управления. – 2010. – № 3. – С.51-60.*
 18. РЕЗЧИКОВ А.Ф., ТВЕРДОХЛЕБОВ В.А., ИВАЩЕНКО В.А. и др. *Критические ситуации в человеко-машинных системах. – Саратов: Издательский Центр «Наука», 2015. – 244 с.*
 19. РЕЗЧИКОВ А.Ф., ЦВИРКУН А.Д., КУШНИКОВ В.А. и др. *Методы прогнозной оценки социально-экономических показателей национальной безопасности // Проблемы управления. – 2015. – № 5. – С. 37-44.*
 20. ФОРРЕСТЕР Д. *Мировая динамика: пер. с англ. – М.: ООО «Изд-во АСТ», 2003. – 379 с.*
 21. http://www.mak.ru/russian/info/doclad_bp/2011/bp11-3.pdf (дата обращения: 02.10.2015).

ANALYSIS AND FORECASTING OF AVIATION TRANSPORT SYSTEMS' SAFETY CHARACTERISTICS ON A BASIS OF SYSTEM DYNAMICS EQUATIONS

Alexander Rezhikov, *Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, Russia, Saratov, Dr Sc., scientific supervisor (iptmuran@san.ru).*

Vadim Kushnokov, *Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, Russia, Saratov, Dr Sc., director (iptmuran@san.ru).*

Vladimir Ivaschenko, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Dr Sc., academic secretary (iptmuran@san.ru).*

Lev Tsesarskiy, *public corporation "Il", Russia, Moscow, heading engineer (iptmuran@san.ru).*

Aleksey Bogomolov, *Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, Russia, Saratov, Cand.Sc., researcher (alexbogomolov@ya.ru).*

Leonid Filimonyuk, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Cand. Sc., researcher (iptmuran@san.ru).*

Kseniya Adamovich, *Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, Russia, Saratov, postgraduate (adamovich.ks@gmail.com).*

Abstract:

System dynamic models' complex is developed. It lets analyze and forecast the main safety characteristics of aviation-transport systems. The graph of cause-effect links between the characteristics is offered. A solution of non-linear differential equations system developed on a basis of the graph lets forecast the characteristics at specified time intervals. An example of the models' application for forecasting the CIS' passenger air service's safety characteristics is given.

Keywords: aviation transport system, system's functioning, safety characteristics, system dynamics models, forecast.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии ...

Рубрика Сборника (окончательно выбирается редактором)

Поступила в редакцию ...

Дата опубликования ...