

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,
Ивашенко 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, 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 построения системы дифференциальных уравнений, решение которой обеспечивает прогнозирование характеристик безопасности на заданных интервалах функционирования. Приведен пример прогнозирования характеристик безопасности пассажирских перевозок в СНГ.

¹ Работа поддержана грантом РФФИ 16-01-00536.

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

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

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

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

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

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

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

Ключевые слова: авиационная транспортная система, функционирование системы, характеристики безопасности системы, системная динамика, 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) [20].

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].

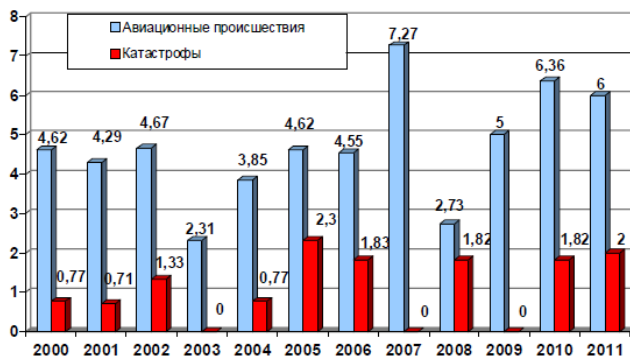


Рис. 1. Количество происшествий и катастроф в гражданской авиации стран Межгосударственного авиационного комитета на 100 тыс. часов налета в 2000–2011 гг.

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

Необходимо отметить, что решение данной проблемы посредством привлечения даже значительного числа экспертов в области авиации представляется весьма затруднительным. Это обусловлено тем, что учесть большое 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 критическими сочетаниями событий, которые возникают при их функционировании [5]. Это также требует применения вычислительной техники.

2. Постановка задачи

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

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, 25]. 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, анализ отчетов МАК [20] за многолетний период и консультации со специалистами позволили выделить следующий список характеристик, влияющих на безопасность АТС с учетом того, что разработанная модель предназначена для использования

лицами, принимающими решения по планированию функционирования АТС на длительных временных интервалах:

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

$X_{\text{про}}(t)$ – среднее число авиационных происшествий на 100 тыс. часов налёта в год, ГОСТ В 23743-88 (среднее число аварий не рассматривается в модели, так как оно сильно коррелирует со средним числом происшествий);

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

$X_{\text{инф}}(t)$ – степень обеспеченности руководства и службы управления воздушным движением (УВД) информацией об авариях (ввиду того, что некоторые произошедшие аварии расследуются достаточно долго, наиболее полная возможная информация о них может отсутствовать);

$X_{\text{пов}}(t)$ – повторяемость причин авиационных происшествий (отношение количества авиационных происшествий с ранее установленной причиной к общему количеству происшествий на 100 000 часов налёта);

$X_{\text{нар}}(t)$ – среднее количество нарушений инструкций пилотами на 100 тыс. часов налёта (может быть получено на основании результатов расследования авиационных происшествий, в которых выделяются нарушения, ставшие причинами аварий);

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

Кроме того, в состав модели входят параметры (внешние факторы), которые в модели полагаются зависящими от перечисленных выше характеристик АТС, но влияют на них. Данный список основан на изучении отчетов МАК, в выводах которых перечисленные факторы выделяются как оказывающие значительное влияние на безопасность АТС, что также подтверждается экспертами:

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 (Automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B – система, отображающая трафик движения воздушных судов);

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 ее 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, увеличивающих 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.

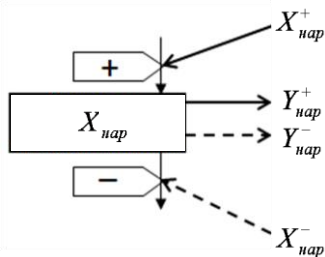


Рис. 2. Вершина графа причинно-следственных связей

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

$Y_{\text{нар}}^-$. Пунктирные линии обозначают отрицательные, а сплошные линии – положительные связи.

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 влияющих на рост переменной X_i , а S_i^- и Π_i^- – отрицательно влияющих.

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

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

$$\frac{dX_{\text{нар}}}{dt} = (\mathbf{Price} + \mathbf{For}) - f_{\text{трен-нар}}(X_{\text{трен}})\mathbf{Obs},$$

$$\frac{dX_{\text{кон}}}{dt} = f_{\text{рег-кон}}(X_{\text{рег}})f_{\text{инф-кон}}(X_{\text{инф}})\mathbf{Obs} - \mathbf{For}.$$

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

$$\frac{dX_{\text{трен}}}{dt} = 0,12X_{\text{инф}}\mathbf{Obs}(t) - 0,02\mathbf{Price}(t),$$

$$\begin{aligned} \frac{dX_{\text{про}}}{dt} = & 0,0004(\mathbf{Res}(t) + \mathbf{For}(t) + \mathbf{Port}(t))(0,8X_{\text{нар}}^2 - \\ & - 0,4X_{\text{нар}}) - 0,08(\mathbf{Exper}(t) + \mathbf{Obs}(t)) \left(\frac{4}{X_{\text{трен}}^2} + \right. \\ & \left. + \lg X_{\text{трен}} \right) \lg 0,25X_{\text{рег}} \lg 0,25X_{\text{инф}} \left(\frac{\lg X_{\text{кон}}}{X_{\text{кон}}^2} \right), \end{aligned}$$

$$\frac{dX_{\text{рег}}}{dt} = 0,15 \lg X_{\text{кон}} - 0,001 \mathbf{Price}(t),$$

$$(2) \quad \frac{dX_{\text{инф}}}{dt} = 0,1X_{\text{рег}}\mathbf{Obs}(t),$$

$$\begin{aligned} \frac{dX_{\text{пов}}}{dt} = & -0,005 (\mathbf{Exper}(t) + \mathbf{Obs}(t))X_{\text{трен}} \lg 0,125X_{\text{рег}} \times \\ & \times X_{\text{инф}} \lg 0,125X_{\text{кон}}, \end{aligned}$$

$$\frac{dX_{\text{нар}}}{dt} = 0,01(\mathbf{Price}(t) + \mathbf{For}(t)) - 0,5 \lg^2 X_{\text{трен}}\mathbf{Obs}(t),$$

$$\frac{dX_{\text{кон}}}{dt} = 0,4X_{\text{рег}} \lg X_{\text{инф}}\mathbf{Obs}(t) - 0,01 \mathbf{For}(t),$$

Системный анализ

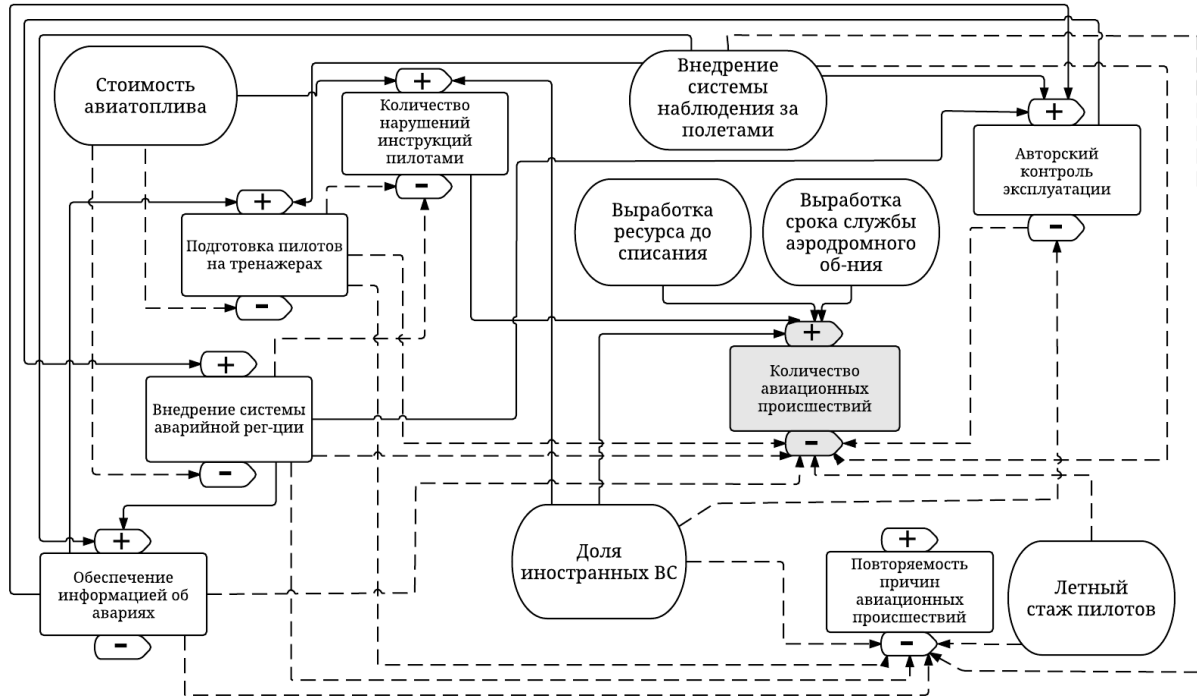


Рис. 3. Граф причинно-следственных связей

где внешние факторы:

$$\mathbf{Res}(t) = 1 + 0,5 \sin t,$$

$$\mathbf{Foreign}(t) = 0,25t^2 - 0,2t + 1,$$

$$(3) \quad \mathbf{Obs}(t) = 1 + 0,05t,$$

$$\mathbf{Exper}(t) = 1 + 0,7 \cos t,$$

$$\mathbf{Price}(t) = 0,25t^2 - 1,1t + 2 + 0,5t \sin t,$$

$$\mathbf{Port}(t) = 1 + 0,2 \sin t.$$

Система уравнений (3) получена на основе использования принципов системной динамики. Для формирования правых частей дифференциальных уравнений использованы функции, аппроксимирующие значения внешних факторов модели. Коэффициенты регрессии в системе (2) получены на основе обработки статистических данных [3, 20–24].

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

$$\frac{dX_{\text{трн}}}{dt} = 0,12X_{\text{инф}} + 0,06X_{\text{инф}} \sin t - 0,005t^2 + 0,022t -$$

$$- 0,04 - 0,01t \sin t,$$

$$\frac{dX_{\text{про}}}{dt} = 9,6 \cdot 10^{-3} X_{\text{нар}}^2 + 2,24 \cdot 10^{-4} X_{\text{нар}}^2 \sin t + 8 \cdot 10^{-5} X_{\text{нар}}^2 t^2 -$$

$$- 6,4 \cdot 10^{-5} X_{\text{нар}}^2 t - 4,8 \cdot 10^{-4} X_{\text{нар}} + 1,12 \cdot 10^{-4} X_{\text{нар}} \sin t +$$

$$+ 4 \cdot 10^{-5} X_{\text{нар}} t^2 - 3,2 \cdot 10^{-5} X_{\text{нар}} t -$$

$$- (0,016 + 0,056 \cos t + 0,04 \sin t) \times$$

$$\times (4 + X_{\text{трн}}^2 \lg X_{\text{трн}}) \lg 0,25 X_{\text{пер}} \lg 0,25 X_{\text{инф}} \left(\frac{\lg X_{\text{кон}}}{X_{\text{трн}}^2 X_{\text{кон}}^2} \right),$$

$$\frac{dX_{\text{пер}}}{dt} = 0,15 \lg X_{\text{кон}} - 2,5 \cdot 10^{-4} t^2 + 1,1 \cdot 10^{-3} t - 2 \cdot 10^{-3} -$$

$$- 5 \cdot 10^{-4} t \sin t,$$

$$\frac{dX_{\text{инф}}}{dt} = 0,1X_{\text{пер}} + 0,05X_{\text{пер}} \sin t,$$

$$\begin{aligned} \frac{dX_{\text{пов}}}{dt} = & -0,01X_{\text{трени}} X_{\text{инф}} \lg 0,125X_{\text{рег}} \lg 0,125X_{\text{кон}} - 3 \cdot 10^{-3} \cos t \times \\ & \times X_{\text{трени}} X_{\text{инф}} \lg 0,125X_{\text{рег}} \lg 0,125X_{\text{кон}} - \\ & - 2,5 \cdot 10^{-3} \sin t X_{\text{трени}} X_{\text{инф}} \lg 0,125X_{\text{рег}} \lg 0,125X_{\text{кон}}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dX_{\text{нар}}}{dt} = & 5 \cdot 10^{-3} t^2 - 0,013t + 0,03 + 5 \cdot 10^{-3} t \sin t - 0,5 \lg^2 X_{\text{трени}} - \\ & - 0,25 \lg^2 X_{\text{трени}} \sin t, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dX_{\text{кон}}}{dt} = & 0,4X_{\text{рег}} \lg X_{\text{инф}} + 0,2X_{\text{рег}} \lg X_{\text{инф}} \sin t - 0,025t^2 + \\ & + 2 \cdot 10^{-3} t - 0,01. \end{aligned}$$

Полученная система нелинейных дифференциальных уравнений решается с использованием метода Рунге-Кутты 4-го 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 использованы статистические данные по авиационным происшествиям для 100 тыс. часов налёта за 20 лет [20]. Система (4) решена при следующих начальных условиях: $X_{\text{трени}}(0) = 1$; $X_{\text{про}}(0) = 1$; $X_{\text{рег}}(0) = 1$; $X_{\text{инф}}(0) = 1$; $X_{\text{пов}}(0) = 2$; $X_{\text{нар}}(0) = 3$; $X_{\text{кон}}(0) = 1$. Физический смысл данных начальных условий заключается в том, что значения функций в начальном 1992 году берутся по отношению к соответствующим показателям базового года.

Среди полученных численных решений особый интерес представляет график количества авиационных происшествий $X_{\text{про}}(t)$ (рис. 4).

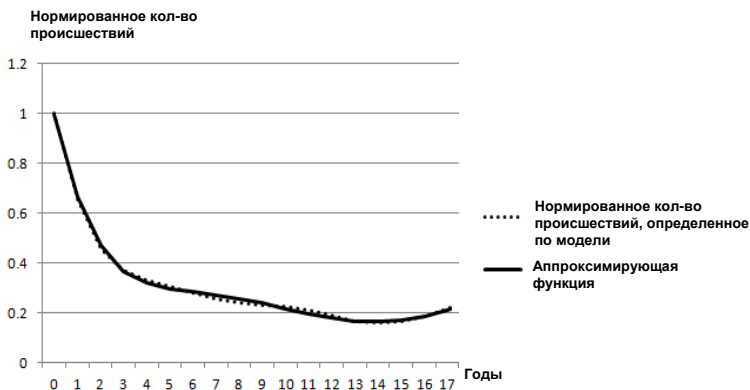


Рис. 4. Динамика нормированного количества авиационных происшествий

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].

На рис. 5 приведена оценка соответствия полученных значений функции $\hat{X}_{про}(t)$ реальным статистическим данным за 1992–2009 гг. [3].

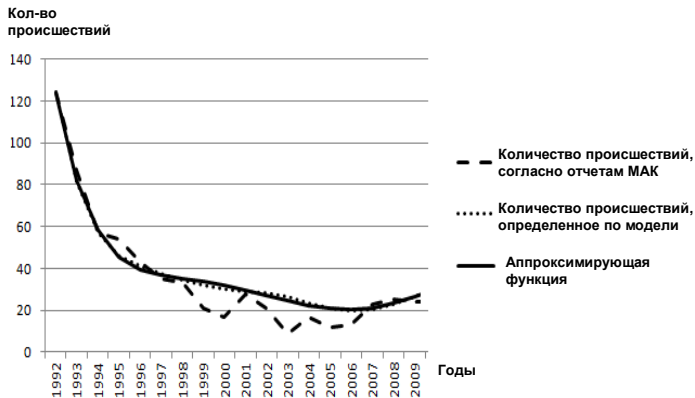


Рис. 5. Фактическое количество авиационных происшествий и его аппроксимация

Из рис. 5 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.

С целью подтверждения адекватности модели получены значения остаточной, полной регрессии и коэффициента детерминации: $S_{X_{про} - \hat{X}_{про}}^2 = 51,83$, $S_{\hat{X}_{про}}^2 = 815$, $D=0,94$, которые

свидетельствуют о возможности практического использования данной модели.

Для прогноза количества авиационных происшествий в 2010–2013 гг. на основе статистики за 1992–2009 гг. использована аппроксимирующая функция в виде многочлена 6-го порядка:

$$\bar{X}_{\text{про}}(t) = -1,43 \cdot 10^{-5} t^6 - 8,06 \cdot 10^{-6} t^5 + 0,061 t^4 - 1,22 t^3 + 10,82 t^2 - 48,13 t + 123,44$$

В таблице 2 представлены 4 данные по количеству авиационных происшествий в РФ в 2010–2013 гг. на основе официальной статистики и результаты прогнозов, полученные используемыми методами.

Выполним сравнение погрешности прогноза для построенной модели. Для этого вычислим Λ_1 и Λ_2 :

$$\Lambda_1 = \max |X_{\text{про}}(t) - \xi(t)|, \quad \Lambda_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{\text{про}}(t) - \bar{X}_{\text{про}}(t))^2,$$

где $X_{\text{про}}(t)$ – действительное значение количества авиационных происшествий в t -м году, $\bar{X}_{\text{про}}(t)$ – значение количества происшествий, вычисленное одним из выбранных методов прогнозирования.

Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Данные статистики, прогнозы авиационных происшествий за 2010–2013 гг. и ошибки прогнозов

Годы, ошибки	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	Λ_1	Λ_2
$\bar{X}_{\text{про}}(t)$	25	24	25	24	14	10
$X_{\text{про}}(t)$	31	36	37	31	7	15
Количество авиационных происшествий (фактические данные)	24	38	39	29	–	–

Прогноз, полученный при использовании модели системной динамики, дает меньшие значения ошибок Λ_1 и Λ_2 .

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 $X_{\text{трен}}(t) = 2,2$);

- доля воздушных судов, оснащенных системой аварийной регистрации – 100% (нормированное значение $X_{\text{пер}}(t) = 5$);

- 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. руб. 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

$$\begin{aligned}
 \frac{dX_{\text{нар}}}{dt} &= (\mathbf{Price} + \mathbf{For}) \lg(0,07 X_{\text{рег}}) X_{\text{нар}} - \mathbf{Obs} \lg \frac{X_{\text{трени}}}{8} \lg(X_{\text{кон}}) X_{\text{пов}}, \\
 (5) \quad \frac{dX_{\text{пов}}}{dt} &= - \left(X_{\text{про}} - \lg X_{\text{инф}} X_{\text{трени}} \lg X_{\text{рег}}^2 \frac{X_{\text{инф}}}{X_{\text{рег}}} \right) X_{\text{нар}} - \frac{\lg X_{\text{кон}}}{2} X_{\text{пов}}, \\
 \frac{dX_{\text{про}}}{dt} &= 0,6(\mathbf{Res} + \mathbf{For} + \mathbf{Port}) X_{\text{нар}} X_{\text{пов}} - 0,1(\mathbf{Exper} + \mathbf{Obs}) \times \\
 &\quad \times \left(\frac{4}{X_{\text{трени}}^2} + \lg X_{\text{трени}} \right) \frac{\lg X_{\text{кон}}}{X_{\text{кон}}^2} \lg 4X_{\text{рег}} X_{\text{инф}} \lg 4X_{\text{инф}} X_{\text{про}}.
 \end{aligned}$$

П

при фиксированных значениях $X_{\text{трени}}(t) = 2,2$; $X_{\text{рег}}(t) = 5$; $X_{\text{кон}}(t) = 10$; $X_{\text{инф}}(t) = 10$; $\mathbf{Res}(t) = 10$; $\mathbf{For}(t) = 1$; $\mathbf{Obs}(t) = 5$; $\mathbf{Exper}(t) = 5$; $\mathbf{Price}(t) = 10$; $\mathbf{Port}(t) = 5$ 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 $x = X_{\text{нар}}$, $y = X_{\text{пов}}$, $z = X_{\text{про}}$, $\sigma = \mathbf{Obs} \log \frac{X_{\text{трени}}}{8} \log X_{\text{кон}} \approx$

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

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

На рис. 6 представлен фазовый портрет (график аттрактора) исследуемой системы.

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

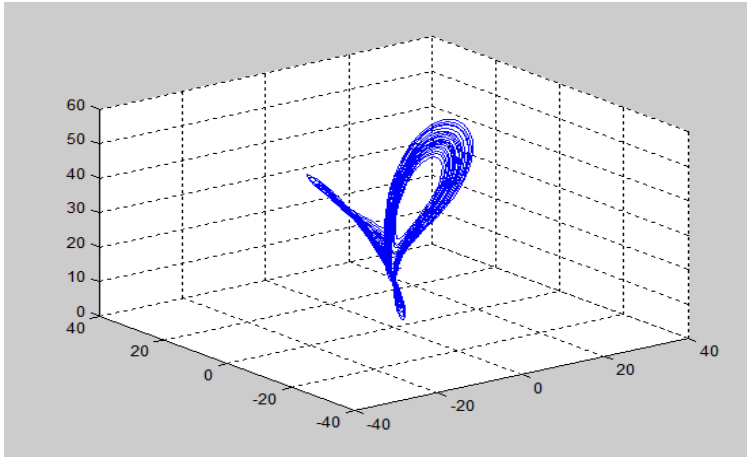


Рис. 6. Фазовый портрет системы при $X_{мрен}(t) = 2,2$, $X_{pez}(t) = 5$,
 $X_{кон}(t) = 10$, $X_{инф}(t) = 10$, $Res(t) = 10$, $For(t) = 1$, $Obs(t) = 5$,
 $Exper(t) = 5$, $Price(t) = 10$, $Port(t) = 5$

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 может быть полезно при принятии 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., ТАЧИНИНА 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 течением 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* // Сборник трудов «Управление большими системами». – 2015. – Вып. 54. – 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. *Состояние безопасности полетов в гражданской авиации государств-участников оглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства за 20-летний период.* – URL: http://www.mak.ru/russian/info/doclad_bp/2011/bp11-3.pdf (дата обращения: 02.10.2015).
21. *Статистика цен на авиационный керосин.* Информационный центр «Кортес». – URL: www.kortes.com (дата обращения: 02.10.2015).
22. *Статистические данные Межгосударственного авиационного комитета.* – URL: <http://www.mak-iac.org/rassledovaniya> (дата обращения: 02.10.2015).

23. Федеральное агентство воздушного транспорта. *Официальный сайт*. – URL: <http://www.favt.ru> (дата обращения: 02.10.2015).
24. Федеральное агентство воздушного транспорта. *Статистика цен на авиационный керосин*. – URL: http://old.favt.ru/favt_new/?q=dejatelnost/ajeroporty_i_ajerodromy/cenu_na_aviagsm (дата обращения: 02.10.2015).
25. ФОРПЕСТЕР Д. *Мировая динамика*. – М.: ООО «Изд-во АСТ», 2003. – 379 с.

ANALYSIS AND FORECAST OF AIR TRANSPORTATION SAFETY: SYSTEM DYNAMICS MODELING

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: We developed a complex of system dynamics models intended to analyze and forecast key safety characteristics of an air transportation system. The models use the graph of causal relationships where graph nodes represent characteristics of the transportation system and links represent causal relationships between different characteristics. The graph defines a system of nonlinear differential equations. The regression parameters were estimated from official historical data since 1992 to 2009 years. The causal graph includes system variables such as the number of incidents per year and external parameters such as average pilot flying hours etc. The quality of the model was evaluated on 2010-2013 years incidents statistics in CIS. Our model was able to predict the number of incidents with reasonable accuracy. The additional analysis shows that the system obtained can demonstrate chaotic behavior under specific parameter values. The proposed model can reveal trends in the analyzed safety characteristics of an air transportation system.

Keywords: air transport, aviation safety assessment, system dynamics modeling, incidents forecast.

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии А.И. Орловым.*

*Поступила в редакцию 19.10.2015.
Дата опубликования 30.11.2016.*