

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ АВИАЦИОННОЙ
ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВОГО
ДВОЙНИКА**

Асеев Н.А.

Саратовский научный центр РАН, Саратов, Россия
ek11pce64@yandex.ru

Степановская И.А.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
irstepan@ipu.ru

Аннотация. Для решения задачи управления безопасностью цифрового двойника авиационной транспортной системы разработана системно-динамическая модель показателей безопасности авиационной транспортной системы. Модель способна учитывать влияние внешних факторов системы, а также нелинейный характер зависимостей между показателями безопасности. Применение модели состоит в повышении уровня компетенций сотрудников управления безопасностью полётов.

Ключевые слова: цифровой двойник, системная динамика, авиационная транспортная система, безопасность полётов.

Введение

Безопасность полётов – это состояние авиационной транспортной системы, при которой факторы риска находятся под достаточным контролем и возможность причинения ущерба снижена до необходимого уровня. К факторам риска относят человеческие, технические, организационные факторы. Влияние указанных факторов на функционирование системы неизбежно приводит к возникновению функциональных отказов, а в общем случае – инцидентов [1-5].

Расследуя произошедшие авиационные происшествия и катастрофы, эксперты Межгосударственного авиационного комитета пришли к выводу, что состояние безопасности авиационной транспортной системы (АТС) достаточно хорошо характеризует количество авиакатастроф [4].

Повышение уровня безопасности полётов в существующих АТС является хорошо изученной темой. В работе [6] предлагается модель поддержки принятия решений для управления воздушным движением на этапе входа в зону аэропорта. Исследование [7] обосновывает применение причинно-следственного подхода для анализа рисков в авиационных транспортных системах. В [8] рассматриваются проблемы, возникающие в критических ситуациях в человеко-машинных системах, связанных с авиационной и космической техникой. В статье [9] исследуются методы учёта потенциальных ошибок оператора при анализе безопасности сложных транспортных систем. Монография [10] охватывает ключевые проблемы управления сложными динамическими объектами в авиации и космонавтике. В [11] представлен обзор динамики авиатранспортных сетей с позиций теории сложных систем. Авторы [12] разрабатывают методы прогнозирования и оценки последствий нарушений безопасности в авиации. В исследовании [13] предлагается метод прогнозирования уровня авиационных происшествий на основе серой модели с буферным оператором и цепями Маркова. В работе [14] анализируются тенденции развития технологий обеспечения безопасности гражданской авиации на основе патентных данных.

В представленных работах использовалось обширное количество методов, направленных на поиск причин авиационных происшествий и на смягчение последствий авиационных катастроф. Несмотря на разработку в работах новых моделей и алгоритмов управления АТС, в исследованиях не были разработаны математические модели, в которых характеристики безопасности АТС достаточно точно могли быть рассчитаны и предсказаны на некоторый промежуток времени. Данное обстоятельство позволяет предположить, что разработка моделей основных характеристик безопасности АТС является актуальным направлением в области обеспечения безопасности полётов.

В ходе промышленной эксплуатации модели на основе системной динамики продемонстрировали свою способность оценивать характеристики сложных систем, что в дальнейшем поможет управлять процессами функционирования этих систем [15-23].

1. Постановка задачи

Необходимо разработать системно-динамическую модель, способную с приемлемой точностью дать прогноз основных характеристик безопасности АТС на некоторый промежуток времени. Процесс разработки модели может быть разделён на несколько основных шагов [18] (рис. 1):



Рис. 1. Основные этапы построения модели

2. Выбор переменных модели

Анализ ежегодных расследований Межгосударственного авиационного комитета показал, что можно выбрать множество основных характеристик безопасности АТС, на основе которых будут найдены переменные модели АТС. Анализ ежегодных расследований позволил выявить внешние факторы, заметно влияющие на функционирование АТС [15]. Множество переменных модели и внешних факторов модели представлены на рисунке 2. Также на рисунке представлены взаимосвязи между переменными и внешними факторами модели.

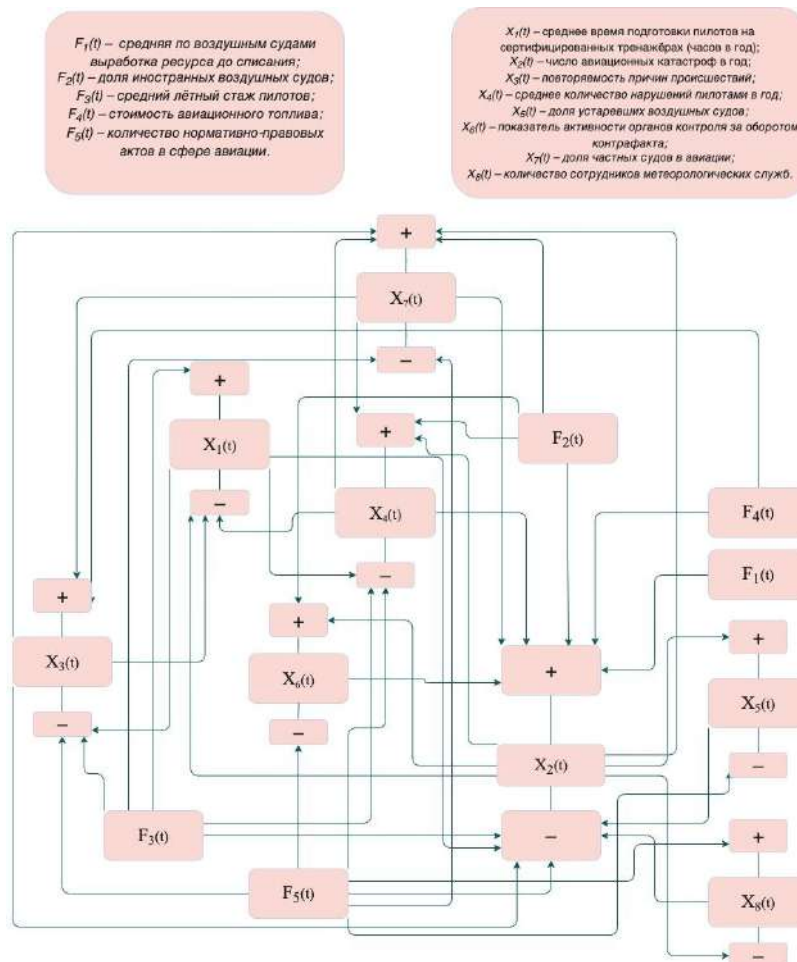


Рис. 2. Граф взаимосвязей модели

Взаимосвязи между внешними факторами и переменными модели сформированы на основе мнений экспертов, и после первоначальной настройки модели могут корректироваться. Если при увеличении значения переменной $X_i(t)$, $i = \overline{1,8}$ или значения внешнего фактора $F_k(t)$, $k = \overline{1,5}$ увеличивается значение переменной $X_j(t)$, $j = \overline{1,8}$, то допускается, что между переменными или внешним фактором и переменной присутствует положительная связь. Если при увеличении значения переменной $X_i(t)$, $i = \overline{1,8}$ или значения внешнего фактора $F_k(t)$, $k = \overline{1,5}$ уменьшается значение переменной $X_j(t)$, $j = \overline{1,8}$, то допускается, что между переменными или внешним фактором и переменной присутствует отрицательная связь.

По примеру [16] для каждой переменной модели записывается соответствующее ей дифференциальное уравнение:

$$\left\{ \begin{aligned}
 \frac{dX_1(t)}{dt} &= \frac{1}{X_1^*} (F_1(t) - (1,08 - 0,57X_2(t))(1,31 - 0,88X_3(t))(0,64 - 0,03X_4(t))) \\
 \frac{dX_2(t)}{dt} &= \frac{1}{X_2^*} ((F_1(t) + F_2(t) + F_4(t))(0,75 + 0,08X_4(t))(0,35 + 0,55X_5(t))(1,09 - 0,32X_6(t))(0,97 - 0,22X_7(t)) - \\
 &\quad - (F_3(t) + F_5(t))(0,98 - 0,28X_1(t))(0,72 + 0,11X_3(t))(0,81 - 0,01X_8(t))) \\
 \frac{dX_3(t)}{dt} &= \frac{1}{X_3^*} (F_4(t)(0,72 + 0,08X_7(t)) - (F_3(t) + F_5(t))(1,33 - 0,9X_1(t))) \\
 \frac{dX_4(t)}{dt} &= \frac{1}{X_4^*} (F_2(t)(0,55 + 0,17X_2(t))(1,02 - 0,44X_7(t)) - (F_3(t) + F_5(t))(0,71 - 0,03X_1(t))) \\
 \frac{dX_5(t)}{dt} &= \frac{1}{X_5^*} ((0,45 + 0,48X_2(t)) - F_5(t)) \\
 \frac{dX_6(t)}{dt} &= \frac{1}{X_6^*} (F_2(t)(1,06 - 0,22X_2(t)) - F_5(t)) \\
 \frac{dX_7(t)}{dt} &= \frac{1}{X_7^*} (F_2(t)(1,37 - 0,77X_2(t))(0,65 + 0,13X_3(t))(1,24 - 0,71X_4(t)) - (F_3(t) + F_5(t))) \\
 \frac{dX_8(t)}{dt} &= \frac{1}{X_8^*} (F_5(t) - (0,87 - 0,02X_2(t)))
 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Выражения зависимостей внешних факторов рассчитаны путём регрессионного анализа значений факторов с течением времени и имеют вид:

$$F_1(t) = 0,63 + 0,37t, F_2(t) = 1 - 0,23t, F_3(t) = 1 - 0,33t, F_4(t) = 0,51 + 0,46t, F_5(t) = 0,6 + 0,4t.$$

После подстановки выражений внешних факторов система дифференциальных уравнений (1) решается методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности [15, 16]. На рисунке 3 представлено сравнение данных модели и данных статистики для переменной $X_2(t)$.



Рис. 3. Сравнение количества катастроф модели и статистики в период с 2011 по 2023 год

3. Эксперименты с разработанной моделью

Варьируя входные данные модели, можно получить сведения о том, насколько сильно одни переменные модели связаны с другими. Для этого создадим несколько сценариев работы модели и рассмотрим переменную количества катастроф $X_2(t)$: подготовлен сценарий, в котором количество нормативно-правовых актов в авиационной сфере было увеличено. Рисунок 4 показывает, что количество катастроф $X_2(t)$ снижается даже при небольшом увеличении $F_5(t)$.

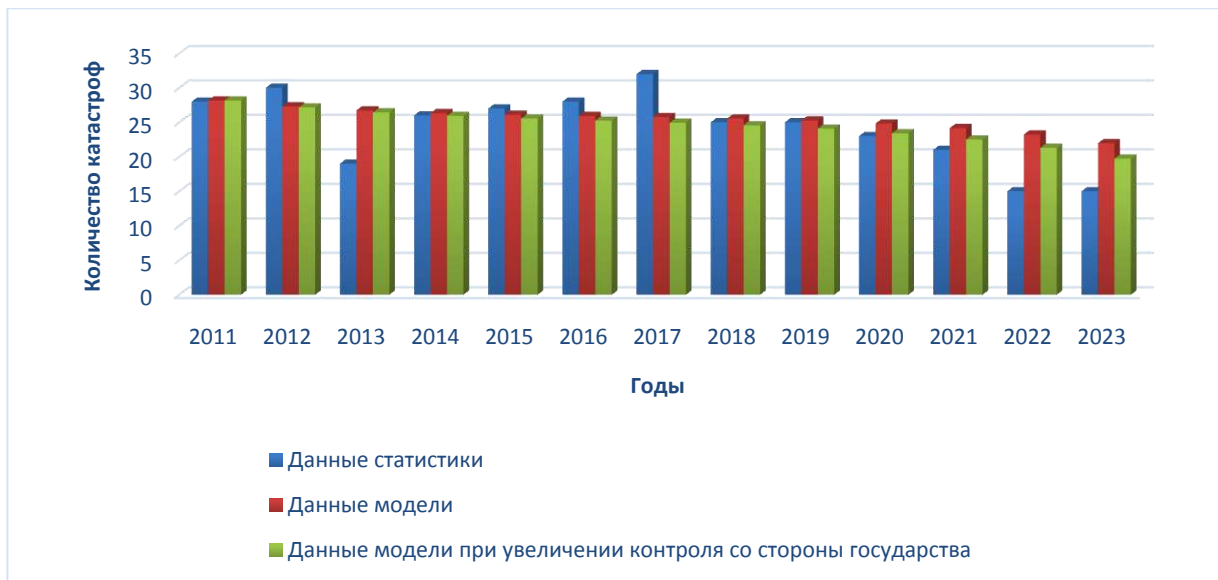


Рис. 4. Постепенное снижение $X_2(t)$ на интервале с 2011 по 2023 год

Рассмотрим сценарий, в котором меняются не значения внешних факторов, а значения переменных модели: допускается, что на каждый год наблюдений коэффициент повторяемости $X_3(t)$ был больше, чем это указано в статистических данных за выбранный год. Рисунок 5 показывает, что количество катастроф $X_2(t)$ растёт при увеличении коэффициента повторяемости авиационных происшествий $X_3(t)$.

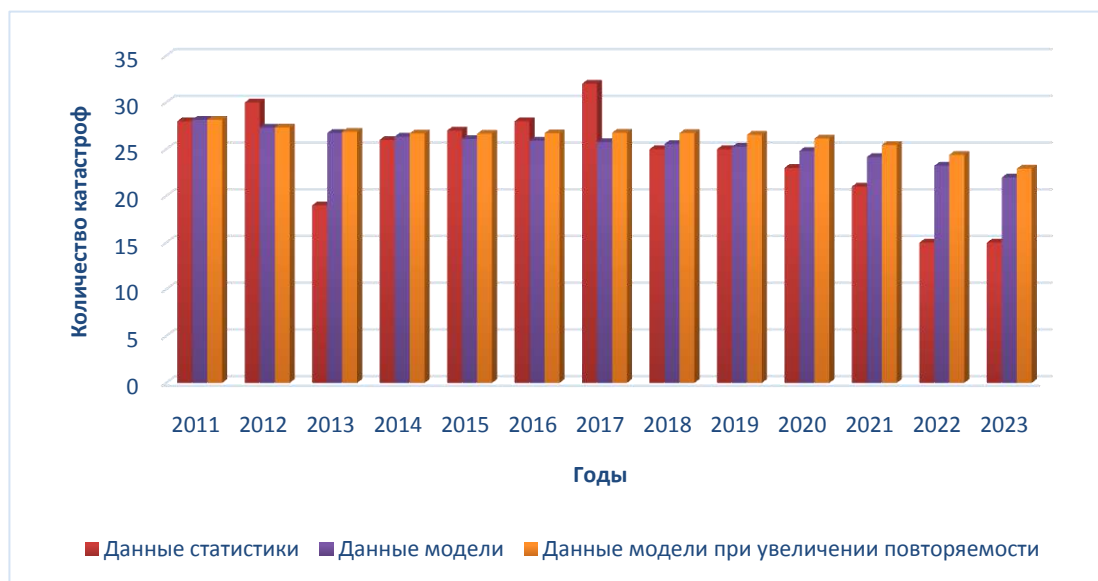


Рис. 5. Увеличение $X_2(t)$ при увеличении коэффициента повторяемости $X_3(t)$

4. Заключение

Для разработки модели основных характеристик безопасности АТС использовался системно-динамический подход. Основу данной модели составила система нелинейных дифференциальных уравнений. Решение системы позволило получить значения характеристик безопасности АТС на некоторый промежуток времени, что в дальнейшем может использоваться для подготовки кадров службы управления безопасностью полётов и для оперативной оценки состояние безопасности полётов.

Литература

1. Bogomolov A.S., Filimonyuk L.Y., Ivaschenko V.A., Kushnikov V.A., Rezchikov A.F. Models and Algorithms of Automata Theory for the Control of an Aircraft Group // Automation and Remote Control. – 2018. – № 10. – P. 154–163.

2. Новожиллов Г.В., Резчиков А.Ф., Неймарк М.С., Цесарский Л.Г., Кушников В.А., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю., Шоломов К.И. Управление авиационно-транспортными системами на основе причинно-следственных деревьев событий // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2015. – № 6. – С. 13–17.
3. Богомолов А.С., Иващенко В.А., Кушников В.А., Резчиков А.Ф., Цвиркун А.Д., Цесарский А.Д., Филимонюк Л.Ю. Моделирующий комплекс для анализа критических сочетаний событий в авиационных транспортных системах // Проблемы управления. – 2018. – № 1. – С. 74–79.
4. Rezchikov A.F., Dolinina O.N., Kushnikov V.A., Ivaschenko V.A., Kachur K.P., Bogomolov A.S., Filimonjuk L.Y. The problem of a human factor in aviation transport SYSTEMS // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9. – № 46. – P. 51–57.
5. Клюев В.В., Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю., Храмов А.Е., Рунинова А.Е. Диагностика опасных состояний операторов при критических сочетаниях событий в человеко-машинных системах // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2017. – № 8 (158). – С. 48–56.
6. Неймарк М.С., Цесарский Л.Г., Филимонюк Л.Ю. Модель поддержки принятия решений при входе воздушных судов в зону ответственности аэропорта // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2013. – № 3. – С. 31–37.
7. Новожиллов Г.В., Резчиков А.Ф., Неймарк М.С., Цесарский Л.Г., Твердохлебов В.А., Филимонюк Л.Ю. Причинно-следственный подход к анализу авиационно-транспортных систем // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2011. – № 7. – С. 3–8.
8. Резчиков А.Ф. Проблемы критических ситуаций в человеко-машинных системах // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2018): труды Одиннадцатой международной конференции: в 2-х томах. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2018. – Т. 1. – С. 59–65.
9. Резчиков А.Ф., Цвиркун А.Д., Дранко О.И., Степановская И.А., Цесарский А.Д., Кушников В.А., Богомолов А.С. Учёт возможных ошибочных действий оператора при проведении анализа безопасности сложных транспортных систем // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2022): труды Пятнадцатой международной конференции. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2022. – С. 912–917.
10. Васильев С.Н. Проблемы управления сложными динамическими объектами авиационной и космической техники: монография. – Москва: Машиностроение, 2015. – 519 с. – ISBN 978-5-94275-810-3.
11. Rocha L. Dynamics of Air Transport Networks: A Review from a Complex Systems Perspective. Chinese Journal of Aeronautics // Chinese Journal of Aeronautics. – 2016. – Vol. 30. – № 2. – P. 469–478.
12. Rios D., Alfaro C., Gomez J., Hernandez-Coronado P., Bernal F. Forecasting and assessing consequences of aviation safety occurrences // Safety Science. – 2018. – Vol. 111. – P. 243–252.
13. Guo J., Gao Z., Wang Y. Forecast of Civil Aviation Unsafe Events Rate Using Grey-Buffer Operator-Markov Chain Method // Proc. of the International Conference on Transportation and Development 2020. – Seattle, 2020. – P. 71–82.
14. Yuan Y., Yu J., Zhang Y. Research on Technology Trend for Civil Aviation Safety based on Patent Big Data Analysis // Proc. of the 2nd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology. – Weihai, 2020. – P. 987–991.
15. Rezchikov A.F., Dolinina O.N., Kushnikov V.A., Ivaschenko V.A., Kachur K.P., Bogomolov A.S., Filimonjuk L.Y., Kulakova E.M. The approach to provide and support the aviation transportation system safety based on automation models // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2017. – Vol. 575. – P. 244–254.
16. Rezchikov A.F., Kushnikov V.A., Ivaschenko V.A., Kachur K.P., Bogomolov A.S., Filimonjuk L.Y. Control of the air transportation system with flight safety as a criterion // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2016. – Vol. 466. – С. 423–432.
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 // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 109–116.
18. Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Цесарский Л.Г., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю., Адамович К.Ю. Анализ и прогнозирование характеристик безопасности авиационных транспортных систем на основе уравнений системной динамики // Управление большими системами: сборник трудов. – 2016. – № 64. – С. 27–48.
19. Дранко О.И., Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Богомолов А.С., Степановская И.А. Колебательно-волновой подход к системно-динамическому моделированию производственных киберфизических систем // Информационные технологии и технические средства управления (ICCT-2024): материалы VIII Международной научной конференции. – Москва, 2024. – С. 225–228.
20. Bogomolov A.S., Tsvirkun A.D., Dranko O.I., Kushnikov V.A., Rezchikov A.F. Optimization and simulation approach to determining critical combinations of company parameters // Automation and Remote Control. – 2024. – Vol. 85, № 10. – P. 867–874.

21. *Богомолов А.С., Дворяшина М.М., Дранко О.И., Кушников В.А., Резчиков А.Ф.* Стресс-тестирование нефинансовых организаций: подход к решению обратной задачи на основе аналитического решения // Проблемы управления. – 2021. – № 6. – С. 15–29.
22. *Асеев Н.А., Кушников В.А., Богомолов А.С.* Разработка модели для прогнозирования характеристик безопасности функционирования авиационных транспортных систем на временном интервале нескольких лет // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2025. – № 2. – С. 106–115.
23. *Spiridonov A.Y., Rezchikov A.F., Kushnikov V.A., Ivashchenko V.A., Dolinina O.N., Shulga T.E., Bogomolov A.S., Filimonyuk L.Y., Kushnikova E.V., Tverdokhlebov V.A., Kushnikov O.V., Fominykh D.S.* Prediction of Main Factors' Values of Air Transportation System Safety Based on System Dynamics // Proc. of the «International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 – Microprocessor Systems and Telecommunications». – Tomsk, 2018. – P. 40–50.