

# МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ЭВАКУАЦИИ ПассаЖИРОВ И ЧЛЕНОВ ЭКИПАЖА ИЗ ВОЗДУШНОГО СУДНА ПРИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ НА ЗЕМЛЕ<sup>54</sup>

Филимонюк Л.Ю.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,  
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д.65  
FilimonyukLeonid@mail.ru*

*Аннотация: Разработана модель для прогнозирования характеристик процесса эвакуации пассажиров и членов экипажа из воздушного судна при аварийных ситуациях на земле. В основу создания модели положен системно-динамический подход. Для получения формализованной модели на основе системного анализа выделены основные характеристики указанного процесса и выявлены причинно-следственные связи между ними.*

Ключевые слова: авиационная система, модель, прогнозирование, системная динамика, аварии.

## **Введение**

Актуальность данного исследования определяется тем фактом, что, к сожалению, число авиационных аварий и катастроф, сопровождающихся пожарами на борту воздушных судов (ВС) не имеет выраженной тенденции к снижению. Зачастую такие происшествия сопровождаются жертвами и значительными материальными потерями [1].

Существуют строгие нормативные документы и инструкции [2], которые регламентируют действия пилотов, бортпроводников и пассажиров в случае возникновения пожаров на борту. Однако при проектировании и вводе в эксплуатацию перспективных воздушных судов данные документы могут потребовать дополнений и даже пересмотра.

С этой целью одним из первых этапов решения проблемы является анализ подходов к обеспечению безопасности крупномасштабных систем [3-5], к которым относятся авиационные системы [6]. Однако многоаспектность данных работ требует утонения их результатов и решения на их основе новых задач.

Значительная часть аварийных ситуаций на земле сопровождается пожарами на борту ВС и может повлечь различные виды ущерба, требующего минимизации [7, 8]. На разработку моделей развития пожаров в замкнутых помещениях направлены работы как отечественных так и зарубежных ученых [9-11]. Но эти работы могут быть полезны для анализа поражающих факторов в отдельности. Этот недостаток может быть частично компенсирован с помощью интеллектуальных систем управления [12, 13].

В рамках данного исследования предлагается разработать модели для прогнозирования характеристик процесса эвакуации пассажиров и членов экипажа из воздушного судна при аварийных ситуациях на земле. Указанные модели предполагается применять для оценки и анализа изменения значений данных характеристик при проектировании и вводе в эксплуатацию перспективных воздушных судов.

## **1 Содержательная постановка задачи**

Требуется на базе аппарата системной динамики [14-17] разработать математические модели для прогнозирования значений характеристик процесса эвакуации пассажиров и членов экипажа из воздушного судна на различных временных интервалах.

С этой целью нужно построить математическую модель, позволяющую выявлять и анализировать зависимости, которые характеризуют положительные, отрицательные, а также переменные в зависимости от определенных условий обратные связи между характеристиками, влияющие на процесс эвакуации.

## **2 Подход к решению задачи**

Решение поставленной задачи состоит из следующих этапов.

На основе соответствующих нормативных документов подготовить список характеристик процесса эвакуации.

---

<sup>54</sup>Работа выполнена в рамках темы госзадания, а также молодежной научной школы Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Выявить причинно-следственные связи между данными характеристиками, которые могут быть формализованы в виде графов.

Построить строгие математические модели на основе выявленных причинно-следственных связей между характеристиками процесса эвакуации. Данные модели должны иметь вид систем нелинейных дифференциальных уравнений.

Провести вычислительные эксперименты с полученными математическими моделями. Проанализировать тенденции изменения значений характеристик процесса эвакуации вследствие влияния их друг на друга.

### 3 Математическая модель

В результате анализа специальной и научной литературы для данного исследования были выбраны следующие характеристики:

$X_0$  – число жертв;

$X_1$  – количество пассажиров и членов экипажа на борту;

$X_2$  – продолжительность эвакуации;

$X_3$  – число эвакуированных;

$X_4$  – скорость эвакуации;

$X_5$  – количество путей выхода из салона (в зависимости от типа ВС);

$X_6$  – число членов экипажа, помогающих процессу эвакуации;

$X_7$  – количество выходов, включая аварийные.

В соответствии с системно-динамическим подходом [14-17] общее математическое представление модели может быть записано в виде:

$$\frac{dX_i}{dt} = X_i^+ + X_i^- \quad , \quad (1)$$

где  $X_i^+$  и  $X_i^-$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, k$ , являются функциями, определяющими положительное или отрицательное изменение характеристик  $X_i$  соответственно. В данной работе  $X_i^+ = f_i^+(Y_1, Y_2, \dots, Y_k)$ ,  $X_i^- = f_i^-(Y_1, Y_2, \dots, Y_k)$  – это функции и их аргументы  $Y_j$ ,  $j = 0, 1, 2, \dots, l$ , влияющие на значение  $X_i$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, k$ .

В соответствии с выявленными причинно-следственными связями между характеристиками процесса эвакуации модель на первом этапе формализации может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dX_0(t)}{dt} &= f_0^+(X_1(t), X_3(t), t); \\ \frac{dX_1(t)}{dt} &= f_1^+(X_4(t), X_6, X_7, t); \\ \frac{dX_2(t)}{dt} &= f_2^+(X_4(t), X_6, X_7, t); \\ \frac{dX_3(t)}{dt} &= f_3^+(X_5, X_6, X_7, t); \\ \frac{dX_4(t)}{dt} &= f_4^+(X_1(t), X_6, X_7, t). \end{aligned} \quad (2)$$

На следующем этапе происходит уточнение математической модели. Так для первого уравнения системы имеем зависимость, определяемую с помощью выражения

$$\frac{dX_0(t)}{dt} = -\frac{K_0(X_1(t) - X_3(t))}{t + 0,1}. \quad (3)$$

На рис. 1 представлено графическое изображение данной зависимости.

Количество пассажиров на борту  $X_1$  определяется скоростью эвакуации  $X_4$ , а также зависит от  $X_6$  и  $X_7$ . Данная зависимость может быть представлена с помощью выражения

$$\frac{dX_1(t)}{dt} = -2^{-t} X_4(t) X_6 X_7. \quad (4)$$

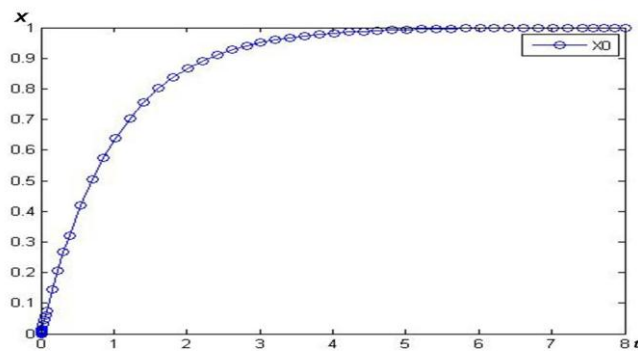


Рис. 1. Динамика изменения значений характеристики  $X_0$

График данной зависимости изображен на рис. 2.

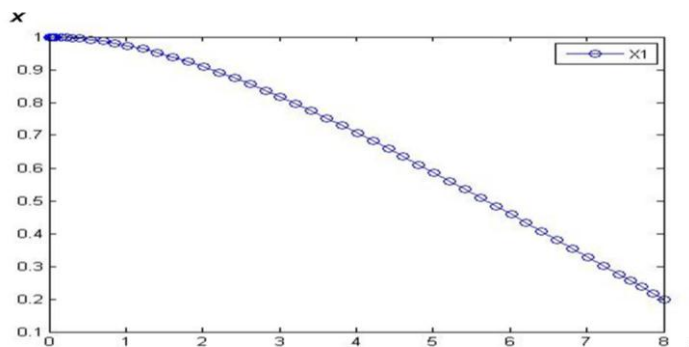


Рис. 2. Динамика изменения значений характеристики  $X_1$

Время эвакуации  $X_2$  зависит от  $X_5$ - $X_7$ , что может быть записано с помощью выражения

$$\frac{dX_2(t)}{dt} = K_2 X_4(t) X_6 X_7. \quad (5)$$

На рис. 3 представлено графическое изображение данной зависимости.

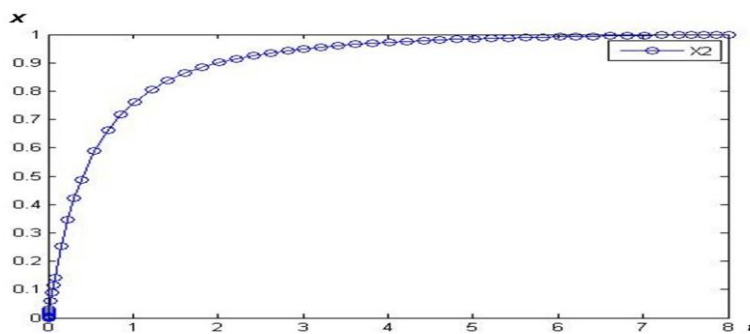


Рис. 3. Динамика изменения значений характеристики  $X_2$

Число эвакуированных пассажиров  $X_3$  монотонно увеличивается, что определяется выражением

$$\frac{dX_3(t)}{dt} = \frac{0,3K_3 X_5 X_6 X_7}{(t+1)^3}. \quad (6)$$

График данной зависимости изображен на рис. 4.

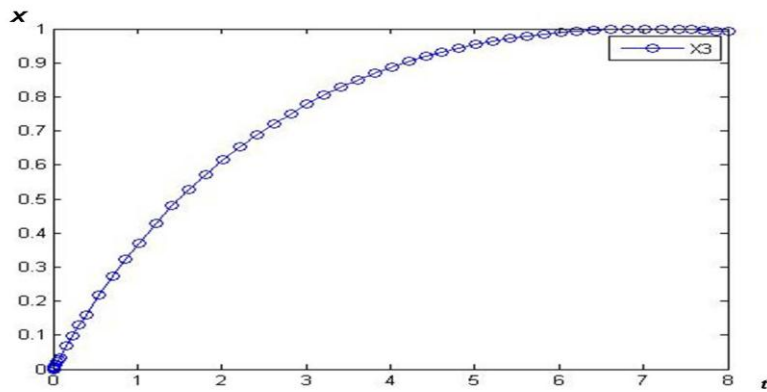


Рис. 4. Динамика изменения значений характеристики  $X_3$

Скорость эвакуации  $X_4$  запишем с помощью следующего выражения

$$\frac{dX_4(t)}{dt} = -\frac{K_4(X_1(t)X_6X_7)}{t+0,1}. \quad (7)$$

На рис. 5 представлено графическое изображение данной зависимости.

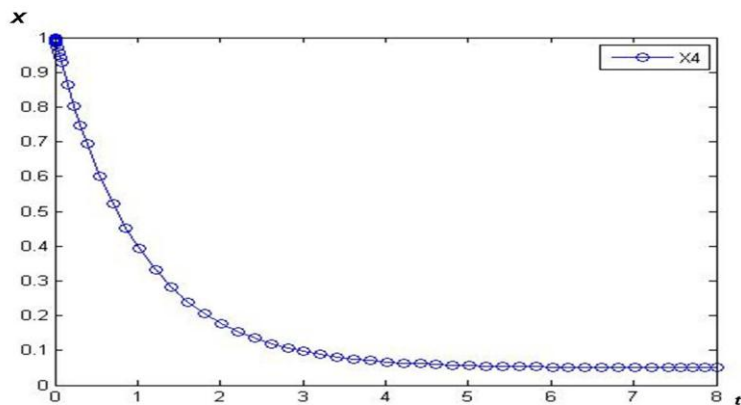


Рис. 5. Динамика изменения значений характеристики  $X_4$

#### 4 Результаты моделирования

Предполагается, что полученная модель может уточняться с помощью анализа статистики, изучения физического смысла описываемых процессов, экспертных оценок и опыта функционирования объекта исследования. Полученная в результате этого система дифференциальных уравнений решается с помощью численных методов.

В результате эксперименты по моделированию изменения значений характеристик проводятся с применением следующей модели:

$$\begin{aligned} \frac{dX_0(t)}{dt} &= -\frac{K_0(X_1(t) - X_3(t))}{t+0,1}, \\ \frac{dX_1(t)}{dt} &= -2^{-t} X_4(t)X_6X_7, \\ \frac{dX_2(t)}{dt} &= K_2X_4(t)X_6X_7, \\ \frac{dX_3(t)}{dt} &= \frac{0,3K_3X_5X_6X_7}{(t+1)^3}, \\ \frac{dX_4(t)}{dt} &= -\frac{K_4(X_1(t)X_6X_7)}{t+0,1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для удобства восприятия проведена нормировка полученных решений. Результаты моделирования представлены на рис. 6.

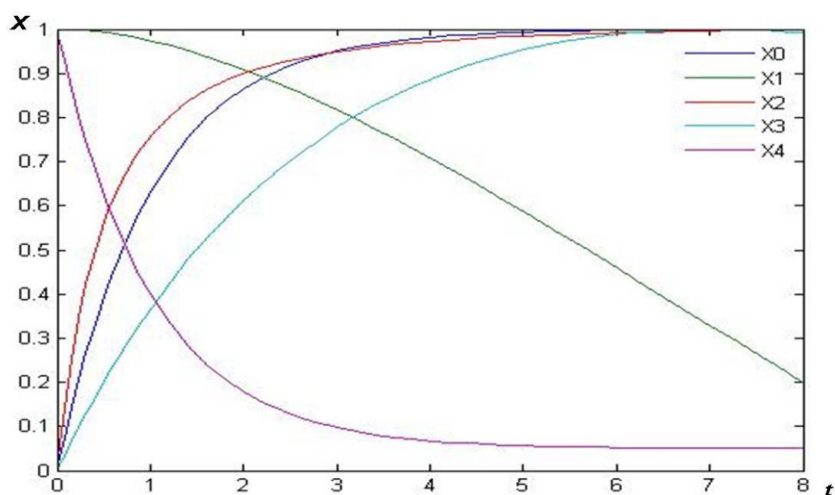


Рис. 6. Результаты моделирования

## Заключение

В статье представлены результаты исследования, посвященного построению моделей системной динамики для анализа процесса эвакуации пассажиров и членов экипажа из воздушных судов при аварийных ситуациях на земле.

В основе создания модели лежит системно-динамическая методология, в рамках которой выполнена постановка задачи и предложен подход к ее решению, состоящий из нескольких этапов. Выявление и анализ основных характеристик процесса эвакуации и причинно-следственных связей между ними позволило создать формализованные модели исследуемого процесса.

В рамках данного исследования также были разработаны модели для прогнозирования характеристик процесса эвакуации пассажиров и членов экипажа из воздушного судна при аварийных ситуациях на земле.

Предполагается, что результаты исследований могут быть применены в информационно-советующих системах с целью поддержки принятия решений при проектировании новых воздушных судов.

## Литература

1. Иванов А.С., Лапковский Р.Ю., Уков Д.А. и др. Причинно-следственный подход к расследованию аварийных ситуаций в человеко-машинных системах // Мехатроника, автоматизация, управление, 2012. № 2. С. 38-43.
2. Аварии и эвакуация пассажиров из самолета. Методическое пособие. – М., 2018.
3. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем. – М.: Наука, 1997. – 256 с.
4. Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем. – М.: Наука, 1993. – 320 с.
5. Иванов А.С., Лапковский Р.Ю., Уков Д.А. и др. Кибернетический подход к моделированию разнородных процессов в мехатронных системах // Мехатроника, автоматизация, управление, 2011. № 1. С. 16-20.
6. Неймарк М.С., Цесарский Л.Г., Филimonюк 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. Кушникова Е.В., Резчиков А.Ф., Иващенко В.А. и др. Модели минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленных предприятий при неопределенности характеристик состояния окружающей среды // Экология промышленного производства, 2015. № 4 (92). С. 60-65.
8. Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А. и др. Минимизация ущерба от нарушения технологического процесса сварочных роботизированных технологических комплексах // Мехатроника, автоматизация, управление, 2017. Т. 18. № 5. С. 328-332.
9. Драйдел Д. Введение в динамику пожаров. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.
10. Jackson J.K. The Cellular Automata Theory with Fuzzy Numbers in Simulation of Real Fires in Buildings // Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 559. 2018. – P.169-182.
11. Федосов С.В., Ибрагимов А.М., Соловьев Р.А. и др. Математическая модель развития пожара в системе помещений // Вестник МГСУ, 2013. № 4. С. 121-128.
12. Плотников П.К., Чеботаревский Ю.В., Большаков А.А. и др. Применение кватернионных алгоритмов в бесплатформенных инерциальных системах ориентации и локальной навигации // Авиакосмическое

- приборостроение, 2003. № 10. С. 21-31.
13. *Большаков А.А.* Синтез интеллектуальных организационно-технических систем управления // Вестник Тамбовского государственного технического университета, 2004. Т. 10. № 4-1. С. 954-959.
  14. *Forrester J.* Principles of systems // Whrihgt Allen Press Inc. 1960.
  15. *Форрестер Д.* Мировая динамика. – М.: ООО «Изд-во АСТ», 2003. – 379 с.
  16. *Meadows D. L. et al* Dynamics of Growth in a Finite World // Whrihgt Allen Press Inc. 1974.
  17. *Meadows D. L. et al* Toward Global Equilibrium // Whrihgt Allen Press Inc. 1973.