Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" http://mathmod.esrae.ru/
URL статьи: mathmod.esrae.ru/11-33
Ссылка для цитирования этой статьи:
Кушников В.А., Иващенко В.А., Филимонюк Л.Ю., Адамович К. Ю. Моделирование динамики характеристик безопасности дорожного движения в регионе// Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2017. №1
Выполнено при поддержке гранта Президента РФ НШ-4383.2010.1 и гранта РФФИ № 10-01-00270

УДК 532.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ В РЕГИОНЕ

Кушников В.А.[1], Иващенко В.А.[2], Филимонюк Л.Ю.[3], Адамович К. Ю.[4]
[1] ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»; ФГБУН Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия, Саратов, kushnikoff@yandex.ru
[2] ФГБУН Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия, Саратов, iptmuran@san.ru
[3] ФГБУН Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия, Саратов, filimonyukleonid@mail.ru
[4] ФГБУН Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия, Саратов, adamovich.ks@gmail.com

MODELING OF CHANGING THE CHARACTERISTICS OF ROAD SAFETY IN THE REGION

Kushnikov V. A.[1], Ivashchenko V.A[2], Filimonyuk L. Yu.[3], Adamovich K. Y.[4]
[1] Saratov State University; Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, Russia, Saratov, kushnikoff@yandex.ru
[2] Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, Russia, Saratov, iptmuran@san.ru
[3] Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, Russia, Saratov, filimonyukleonid@mail.ru
[4] Institute of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, Russia, Saratov, adamovich.ks@gmail.com

Аннотация. Разработана модель системной динамики для анализа и прогнозирования показателей безопасности дорожного движения в регионе России. Построен граф причинно-следственных связей между переменными системы и система нелинейных дифференциальных уравнений. Решение этой системы позволяет анализировать и прогнозировать показатели безопасности дорожного движения.

Ключевые слова: автомобиль, безопасность, дорожно-транспортное происшествие, авария, модель системной динамики, причинно-следственный подход

Abstract. In this paper system dynamic model was developed for analyzing and prediction the

safety metrics of traffic in Russian region. Constructed the graph of cause-effect relations between variables of the system, established the system of nonlinear differential equations. Solution of this system can be used for analyzing and prediction of the main safety metrics

Keywords: motor vehicle, safety, road traffic accident, accident, system dynamics modeling, cause-effect relations

Для всестороннего обеспечения безопасности дорожного движения необходим комплексный учет ресурсов дорожно-транспортной системы [1-6], который позволит анализировать и предупреждать сложные ситуации [7], используя для анализа динамики системы современные эффективные вычислительные средства [8]. Основной задачей в области безопасности дорожного движения систем является снижение количества аварий на транспорте. Научно-техническое обеспечение транспортной безопасности, согласно ФЗ-16 «О транспортной безопасности» [9], является одной из целей обеспечения транспортной безопасности страны. Автомобили – наиболее популярный вид транспорта и их количество в стране постоянно возрастает. Проблемой функционирования автотранспортной системы является большое количество аварий на дорогах.

Цель работы заключается в построении и применении математической модели для анализа и прогнозирования значений основных показателей безопасности функционирования дорожно-транспортной системы на различных интервалах времени.

Для достижения поставленной цели предлагается использовать математическую модель на основе системной динамики, позволяющую осуществлять прогноз показателей безопасности системы с учетом сложных взаимосвязей между этими показателями [10]. Суть метода системной динамики заключается в построении системы дифференциальных уравнений в зависимости от причинно-следственных связей, присутствующих в объекте прогнозирования. Решение построенной системы позволяет сделать прогноз и провести численные эксперименты для выяснения степени взаимовлияния переменных системы и внешних факторов. Данный подход использовался при моделировании динамики показателей системы образования [11-15], национальной безопасности [16-22], авиационной транспортной системы [23], при прогнозировании последствий наводнений [24].

План решения задачи состоит в следующем:

1. Выбор переменных, характеризующих безопасность функционирования дорожно-транспортной системы, и внешних факторов, которые влияют на эти переменные; обоснование выбора.
2. Разработка схемы причинно-следственных связей переменных и внешних факторов.
3. Построение системы дифференциальных уравнений на основании разработанной схемы.

4. Решение системы дифференциальных уравнений и анализ результатов решения.
5. Анализ и прогнозирование показателей безопасности на основе полученного решения, проверка его адекватности.

Определение переменных системы

Необходимо определить переменные, влияющие на безопасность дорожно-транспортной системы региона страны, и разделить их на два вида: переменные системы и внешние факторы. Переменные системы влияют друг на друга, а факторы считаются независимыми от переменных системы, но сами влияют на них. Выбор переменных основывался на списке показателей безопасности дорожного движения из постановления Правительства РФ № 894 "Об утверждении Правил государственного учета показателей состояния безопасности дорожного движения органами внутренних дел Российской Федерации". Исходя из этого списка, были выделены переменные, обозначающие количество (в год): X_1 – ДТП в городах до 100 000 чел.; X_2 – ДТП в городах 100 000 – 500 000 чел.; X_3 – ДТП в городах 500 000 – 1000 000 чел.; X_4 – ДТП в городах от 1000 000 чел.; X_5 – ДТП на федеральных дорогах; X_6 – ДТП на региональных дорогах; X_7 – ДТП на местных дорогах; X_8 – пешеходов-нарушителей; X_9 – водителей-нарушителей; X_{10} – пассажиров-нарушителей; X_{11} – должностных лиц транспортных, дорожных, железнодорожных и иных организаций; X_{12} –административных правонарушений; а также X_{13} – преступлений. Кроме того, были выделены следующие внешние факторы (количество в регионе): F_1 – автомобилей (легковых, грузовых, автобусов); F_2 – моторных средств; F_3 – прицепов и полуприцепов; F_4 – населения; F_5 – минимальный штраф за нарушения ПДД; F_6 – экипажей ДПС на дорогах региона; F_7 – машин для уборки снега; F_8 – протяженность изношенных дорог; F_9 – работающих эвакуаторов; F_{10} – протяженность участков дорог с фото/видео наблюдением; F_{11} – водителей со стажем до 2 лет; F_{12} – водителей со стажем 2-5 лет; F_{13} – водителей со стажем от 10 лет. Далее строился граф причинно-следственных связей.

Построение причинно-следственного графа

Причинно-следственные связи устанавливались на основании регрессионного анализа статистики и экспертных заключений. Разработанная схема этих связей (причинно-следственный граф) – на рис. 1. Вершины графа имеют два входа: со знаком «+», в которые входят все дуги от вершин, вызывающих рост соответствующей переменной (сплошные линии), и со знаком «–», для дуг от вершин, уменьшающих этот рост (пунктирные линии).

ISSN 2541-9269

Жирной линией выделены группы переменных с аналогичными причинно-следственными связями.

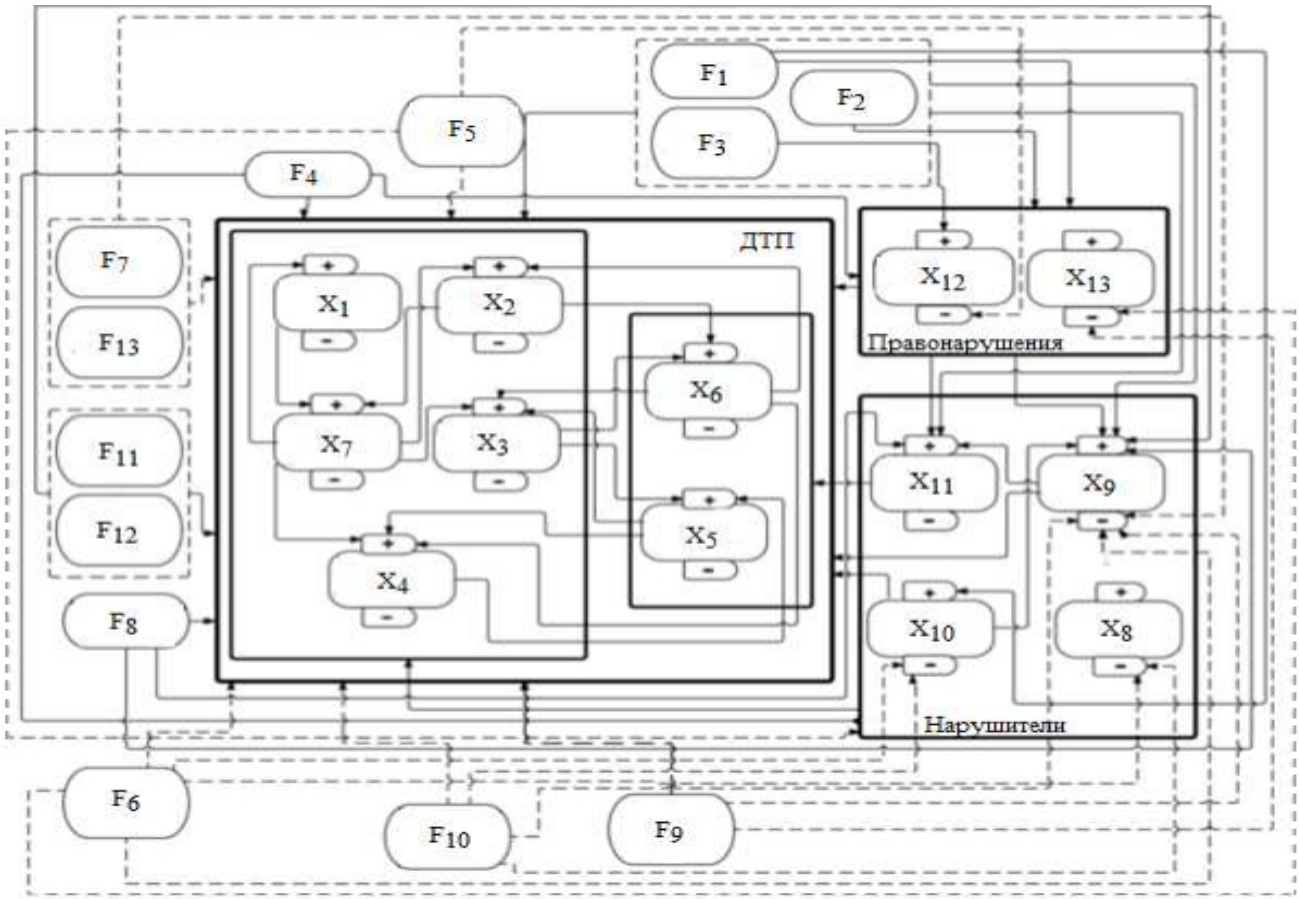

Рис. 1. Причинно-следственный граф показателей безопасности функционирования дорожно-транспортных систем

На основе разработанного графа причинно-следственных связей строится система дифференциальных уравнений системной динамики.

Построение системы дифференциальных уравнений

На основе разработанного графа для каждой переменной модели составляется дифференциальное уравнение вида $\frac{dX_i}{dt} = S_i^+ \Pi_i^+ - S_i^- \Pi_i^-$, где S_i^+ и Π_i^+ – сумма внешних факторов и произведение переменных, положительно влияющих на рост X_i, а S_i^- и Π_i^- – такие же выражения для отрицательно влияющих факторов и переменных. По данному принципу построена система дифференциальных уравнений, имеющая общий вид:

$$dX_1/dt = B_{1\text{-}7}(X_7)...B_{1\text{-}13}(X_{13})(F_1+F_2+F_3+F_4+F_8+F_{11}+F_{12})-(F_5+F_6+F_7+F_9+F_{10}+F_{13});$$

$$dX_2/dt = B_{2\text{-}6}(X_6)...B_{2\text{-}13}(X_{13})(F_1+F_2+F_3+F_4+F_8+F_{11}+F_{12}+F_{13})-$$
$$-(F_5+F_6+F_7+F_9+F_{10}+F_{14});$$

ISSN 2541-9269

$dX_3/dt = B_{3\text{-}5}(X_5)...B_{3\text{-}13}(X_{13})(F_1+F_2+F_3+F_4+F_8+F_{11}+F_{12})-$
$-(F_5+F_6+F_7+F_9+F_{10}+F_{13});$

$dX_4/dt = B_{4\text{-}5}(X_5)...B_{4\text{-}13}(X_{13})(F_1+F_2+F_3+F_4+F_8+F_{11}+F_{12})-(F_5+F_6+F_7+F_9+F_{10}+F_{13});$

$dX_5/dt = B_{5\text{-}3}(X_3)B_{5\text{-}4}(X_4)B_{5\text{-}9}(X_9)...B_{5\text{-}13}(X_{13})(F_1+...+F_4+F_8+F_{11}+F_{12})-$
$-(F_5+F_6+F_7+F_9+F_{10}+F_{13});$

$dX_6/dt = B_{6\text{-}2}(X2)B_{6\text{-}3}(X_3)B_{6\text{-}9}(X_9)...B_{6\text{-}13}(X_{13})(F_1+...+F_4+F_8+F_{11}+F_{12})-$
$-(F_5+F_6+F_7+F_9+F_{10}+F_{13});$

$dX_7/dt = B_{7\text{-}1}(X_1)B_{7\text{-}2}(X_2)B_{7\text{-}8}(X_8)...B_{7\text{-}13}(X_{13})(F_1+...+F_4+F_8+F_{11}+F_{12})-$
$-(F_5+F_6+F_7+F_9+F_{10}+F_{13});$

$dX_8/dt = F_4-F_5-F_6-F_{10};$

$dX_9/dt = B_{9\text{-}10}(X_{10})...B_{9\text{-}13}(X_{13})(F_1+F_2+F_3+F_4+F_8+F_{11}+F_{12})-$
$-(F_5+F_6+F_7+F_9+F_{10}+F_{13});$

$dX_{10}/dt = (F_1+F_4) - (F_5+F_6+F_{10});$

$dX_{11}/dt = (F_1+F_2+F_3+F_4+F_8) - F_5;$

$dX_{12}/dt = (F_1+F_2+F_3+F_4)- F_5;$

$dX_{13}/dt = (F_1+F_2+F_4+F_{11}) - (F_6+F_9),$

где $B_{A-B}(X_A)$ означает выражение зависимости переменной X_B от X_A. Значения коэффициентов в этих выражениях были подобраны на основании регрессионного анализа статистических данных. Внешние факторы были выражены как функции времени на основании интерполяции временных рядов их значений. При проведении расчетов и решении дифференциальных уравнений применяются статистические данные ГИБДД МВД РФ [25], нормированные относительно значений 2009 года. После определения конкретного числового вида выражений $B_{i-j}(X_j)$ и выражений для внешних факторов получаем систему нелинейных дифференциальных уравнений.

В качестве объекта для прогнозирования характеристик безопасности дорожного движения был выбран город Москва. Количество ДТП в Москве определяется переменной X_4. С учетом приведенных выше выражений система уравнений примет вид:

$dX_1/dt = B_{1\text{-}7}B_{1\text{-}8}B_{1\text{-}9}B_{1\text{-}9}B_{1\text{-}10}B_{1\text{-}11}B_{1\text{-}12}B_{1\text{-}13}(F_1+F_2+F_3+F_4+F_8+F_{11}+F_{12})-$
$-0.07(F_5+F_6+F_7+F_9+F_{10}+F_{13});$

$dX_2/dt = B_{2\text{-}6}B_{2\text{-}7}B_{2\text{-}8}B_{2\text{-}9}B_{2\text{-}10}B_{2\text{-}11}B_{2\text{-}12}B_{2\text{-}13}(F_1+F_2+F_3+F_4+F_8+F_{11}+F_{12}+F_{13})-$
$-(F_5+F_6+F_7+F_9+F_{10}+F_{14});$

$dX_3/dt = B_{3\text{-}5}B_{3\text{-}6}B_{3\text{-}7}B_{3\text{-}8}B_{3\text{-}9}B_{3\text{-}10}B_{3\text{-}11}B_{3\text{-}12}B_{3\text{-}13}(F_1+F_2+F_3+F_4+F_8+F_{11}+F_{12})-$
$-(F_5+F_6+F_7+F_9+F_{10}+F_{13});$

$dX_4/dt = B_{4\text{-}5}B_{4\text{-}6}B_{4\text{-}7}B_{4\text{-}8}B_{4\text{-}9}B_{4\text{-}10}B_{4\text{-}11}B_{4\text{-}12}B_{4\text{-}13}(F_1+F_2+F_3+F_4+F_8+F_{11}+F_{12})-$
$-0.008(F_5+F_6+F_7+F_9+F_{10}+F_{13});$

ISSN 2541-9269

$$dX_5/dt = B_{5\text{-}3}B_{5\text{-}4}B_{5\text{-}9}B_{5\text{-}10}B_{5\text{-}11}B_{5\text{-}12}B_{5\text{-}13}(F_1+\ldots+F_4+F_8+F_{11}+F_{12})- -(F_5+F_6+F_7+F_9+F_{10}+F_{13});$$

$$dX_6/dt = B_{6\text{-}2}B_{6\text{-}3}B_{6\text{-}9}B_{6\text{-}10}B_{6\text{-}11}B_{6\text{-}12}B_{6\text{-}13}(F_1+F_2+F_3+F_4+F_8+F_{11}+F_{12})- -(F_5+F_6+F_7+F_9+F_{10}+F_{13});$$

$$dX_7/dt = B_{7\text{-}1}(X_1)B_{7\text{-}2}(X_2)B_{7\text{-}8}(X_8)\ldots B_{7\text{-}13}(X_{13})(F_1+\ldots+F_4+F_8+F_{11}+F_{12})- -(F_5+F_6+F_7+F_9+F_{10}+F_{13});$$

$$dX_8/dt = 1.85F_4-(0.01F_5+F_6+F_{10});$$

$$dX_9/dt = 0.8B_{9\text{-}11}B_{9\text{-}12}B_{9\text{-}13}(F_1+F_2+F_3+F_4+F_8+F_{11}+F_{12})-0.001(F_5+F_6+F_7+F_9+F_{10}+F_{13});$$

$$dX_{10}/dt = (0.3F_1+0.46F_4) - (0.01F_5+0.45F_6+0.25F_{10});$$

$$dX_{11}/dt = (0.01F_1+0.01F_2+0.01F_3+0.04F_4+0.05F_8) - 0.02F_5;$$

$$dX_{12}/dt = (0.0.1F_1+0.01F_2+0.01F_3+0.095F_4)- 0.02F_5;$$

$$dX_{13}/dt = 0.1(F_1+F_2+F_4+F_{11}) - (0.14F_6+0.135F_9),$$

где внешние факторы на основе имеющейся статистики смоделированы в следующем виде:

$$F_1 = 0.02852t + 1;$$

$$F_2 = -0.023t + 1;$$

$$F_3 = 0.045t + 1;$$

$$F_4 = 1.155/(1.1 + 0.05e^{-0.05t});$$

$$F_5 = 1.2t + 0.2;$$

$$F_6 = 0.05(1.5 - 0.5\cos(t))t + 1;$$

$$F_7 = 0.6t + 1$$

$$F_8 = (0.2t^2 - 1.2t + 0.5\cos(2t))/20 + 1;$$

$$F_9 = t + 0.25$$

$$F_{10} = 0.00075t^2 - 0.01t + 1 + 0.003t\sin(t);$$

$$F_{11} = t + 0.01;$$

$$F_{12} = t + 0.01;$$

$$F_{13} = 0.5 + 1$$

Детализацию выражений для $B_{i\text{-}j}$ опускаем из-за их громоздкости и многочисленных вариантов, возникающих в зависимости от значений других переменных.

Решение системы дифференциальных уравнений и анализ результатов решения

ISSN 2541-9269

Решая построенную систему дифференциальных уравнений численным методом Рунге-Кутты 4 порядка точности, получаем кривую «Количество ДТП в городах от 1 000 000 человек, рассчитанное» для Москвы. Полученная кривая с графиком той же величины по статистическим данным приведена на рис. 2.

Можно отметить, что количество автодорожных происшествий, определенное по разработанной модели, по тенденции совпадает с данными статистики ГИБДД по городу Москве. Коэффициент детерминации для разработанной модели составил 0.954, что говорит о возможности её применения, если уровень значимости составляет 95%.

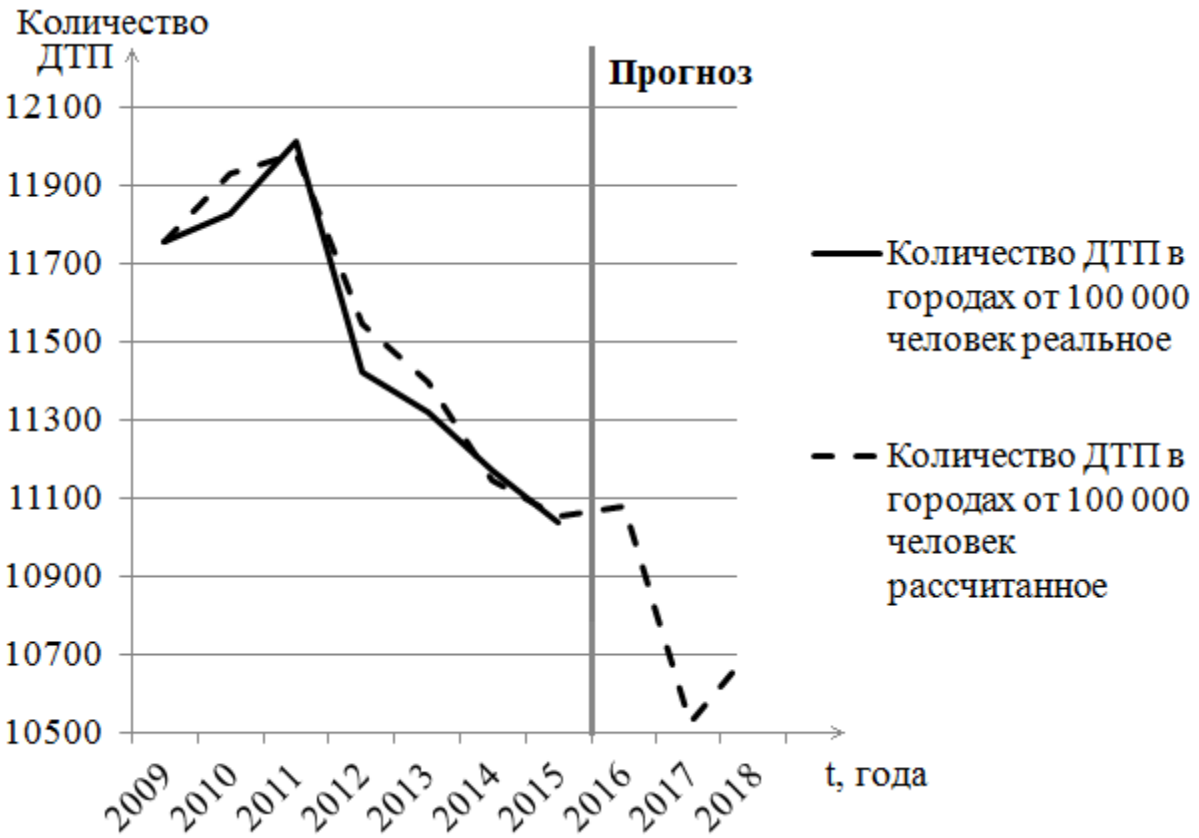

Рис. 2. Смоделированное и фактическое количество ДТП для Москвы с прогнозом до 2017 года

Делая допущение, что зависимости между системными переменными и факторами остаются постоянными и не меняются значительно с течением времени в исследуемый период, можно спрогнозировать незначительное увеличение количества ДТП в 2016-2017 годах. Это можно объяснить увеличением количества автомобилей и количества пешеходов-нарушителей. Последующий спад количества происшествий объясняется увеличением минимального штрафа за нарушения ПДД, улучшением качества дорог и последующим уменьшением количества водителей-нарушителей.

Прогнозируемый рост числа ДТП в 2018 году может быть объяснен предполагаемым увеличением протяженности изношенных дорог и

уменьшением количества машин для уборки снега в зимний период времени за счет выхода их строя в силу поломок.

Полученные прогнозные значения будут сравниваться с реальной статистикой по мере её публикации официальными источниками ГИБДД.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (проект НШ-4383.2010.1) и РФФИ (проект 10-01-00270).

Литература

1. Клюев В.В., Резчиков А.Ф., Богомолов А.С., Уков Д.А., Филимонюк Л.Ю. Системный подход к задаче оценки остаточного ресурса человеко-машинных систем // Контроль. Диагностика. 2011. № 8. С. 9-13.
2. Богомолов А.С. Комплексный контроль ресурсов сложных человекомашинных систем // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2013. Т. 13. № 3. С. 83-87.
3. 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, 9,9 п.л., ISBN 978-5-4442-0067-4.
4. Новожилов Г.В., Резчиков А.Ф., Неймарк М.С., Богомолов А.С., Цесарский Л.Г., Филимонюк Л.Ю. Человеческий фактор в авиационно-транспортных системах // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2013. № 5. С. 3-10.
5. 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.
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., Кушников В.А., Твердохлебов В.А., Иващенко В.А., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю. Анализ критических ситуаций, вызванных неблагоприятным стечением обстоятельств // Контроль. Диагностика. 2014. № 7. С. 12-16.
8. Богомолов А.С., Гапченко А.Ю., Васильев К.А. Параллельный подход к задачам моделирования человеко-машинных систем // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. № 4 (22). С. 26-28.
9. Информационно-правовой портал гарант, ФЗ-16 «О транспортной безопасности» [Электронный ресурс] URL: http://base.garant.ru/12151931/ (дата обращения 11.04.2016)
10. Форрестер. Д. Мировая динамика: пер. с англ. М.: ООО «Изд-во АСТ» , 2003. 379 с.

11. Яндыбаева Н.В., Кушников В.А. Математическая модель для прогнозирования показателей аккредитации вуза // Управление большими системами. Выпуск 41. М.: ИПУ РАН, 2013. С.314-343.
12. Яндыбаева Н. В. Принцип системной динамики в управлении качеством образовательного процесса вуза // В мире научных открытий. 2010. № 2-3. С. 46-48.
13. Кушников В.А., Яндыбаева Н.В. Модель Форрестера в управлении качеством образовательного процесса вуза // Прикладная информатика. 2011. №3 (33). С. 65-73.
14. Яндыбаева Н.В., Кушников В.А. Оценка качества образовательного процесса в вузе на основе модели Форрестера // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 2. № 1 (55). С. 176-181.
15. Яндыбаева Н.В., Кожанова Е.Р., Кушников В.А. Разработка программного продукта для определения эффективности деятельности высшего учебного заведения // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2014. 2 (75). С. 214-219.
16. Клюев В.В., Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю., Яндыбаева Н.В. Математические модели для контроля, диагностики и прогнозирования состояния национальной безопасности России // Контроль. Диагностика. 2016. № 3. С. 43-51.
17. Яндыбаева Н.В., Кушников В.А. Математическая модель для прогнозирования показателей экономической безопасности Российской Федерации // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2014. № 3. С. 93-101.
18. Яндыбаева Н.В., Кушников В.А. Математическая модель для прогнозирования изменений показателей национальной безопасности России // Научное обозрение. 2015. № 10-1. С. 115-121.
19. Резчиков А.Ф., Цвиркун А.Д., Кушников В.А., Яндыбаева Н.В., Иващенко В.А. Методы прогнозной оценки социально-экономических показателей национальной безопасности // Проблемы управления. 2015. № 5. С. 37-44.
20. Яндыбаева Н. В. Модель системной динамики для прогнозирования показателей национальной безопасности // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2014. Т. 7. № 7-1 (66). С. 75-79.
21. Цвиркун А. Д., Резчиков А. Ф., Яндыбаева Н. В., Кушников В. А. Имитационное моделирование показателей национальной безопасности РФ // В книге: Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2014 Сборник научных трудов. Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. Москва, 2014. С. 155-163.
22. Яндыбаева Н. В., Кушников В. А. Модель Форрестера для прогнозирования показателей национальной безопасности России // В книге: Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2015 Материалы Восьмой

международной конференции: в 2 томах. Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова Российской академии наук; Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. 2015. С. 342-347.

23. Адамович К.Ю. Математическая модель для прогнозирования значений показателей безопасности транспортной системы // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2015. № 6 (76). С. 146-151.
24. Хамутова М.В., Кушников В.А. Модель для прогнозирования основных характеристик последствий наводнений// Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2015. № 6 (76). С. 119-123.
25. Сайт Госавтоинспекции МВД России, Динамика основных показателей аварийности за 7 лет [Электронный ресурс] URL: http://www.gibdd.ru/stat/ (дата обращения 25.02.2017).