

## МОДЕЛИ СИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ РОССИИ

Поляков М.С., Кушников В.А., Богомолов А.С.

*Институт проблем точной механики и управления*

*ФГБУН ФИЦ «Саратовский научный центр Российской Академии Наук»,*

*Саратов, Россия*

maxg6000@mail.ru, kushnikoff@yandex.ru, alexbogomolov@yandex.ru, ivaiptmu@yandex.ru

**Резчиков А.Ф.**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*

rw4cy@mail.ru

*Аннотация. Разработан комплекс взаимосвязанных моделей системной динамики, который позволяет осуществлять прогнозирование основных показателей безопасности дорожного движения в России. Данные показатели были выбраны на основе нормативно-правовых документов Госавтоинспекции МВД России. Полученные результаты будут использованы при совершенствовании математического обеспечения систем управления дорожно-транспортным движением.*

*Ключевые слова: дорожно-транспортная сеть, модели системной динамики, безопасность, причинно-следственная взаимосвязь, анализ, прогнозирование.*

### Введение

В настоящее время автомобильный транспорт является самым распространенным видом транспорта и играет важнейшую роль в экономике России, т.к. осуществляет значительное количество грузопассажирских перевозок. Ежегодно количество транспортных средств возрастает. Вместе с тем, автомобильные перевозки являются одним из самых небезопасных видов транспорта – это показывает динамика основных показателей безопасности, представленная на рисунке 1.

Основной проблемой функционирования дорожно-транспортной системы РФ является высокий уровень аварийности. По данным официальной статистики Госавтоинспекции МВД России за первый и второй квартал 2023 года уже произошло около 33 тысяч дорожно-транспортных происшествий, в результате которых погибли почти 3,5 тысяч человек и более 42 тысяч получили ранения [1,3].

Один из путей решения данной проблемы связан с применением современной вычислительной техники. В специальной литературе в настоящее время практически отсутствуют сведения об автоматизированных комплексах, позволяющих осуществлять прогнозирование основных показателей безопасности дорожно-транспортных систем на различных временных интервалах.

Данные обстоятельства обуславливают актуальность и практическую значимость темы исследования.

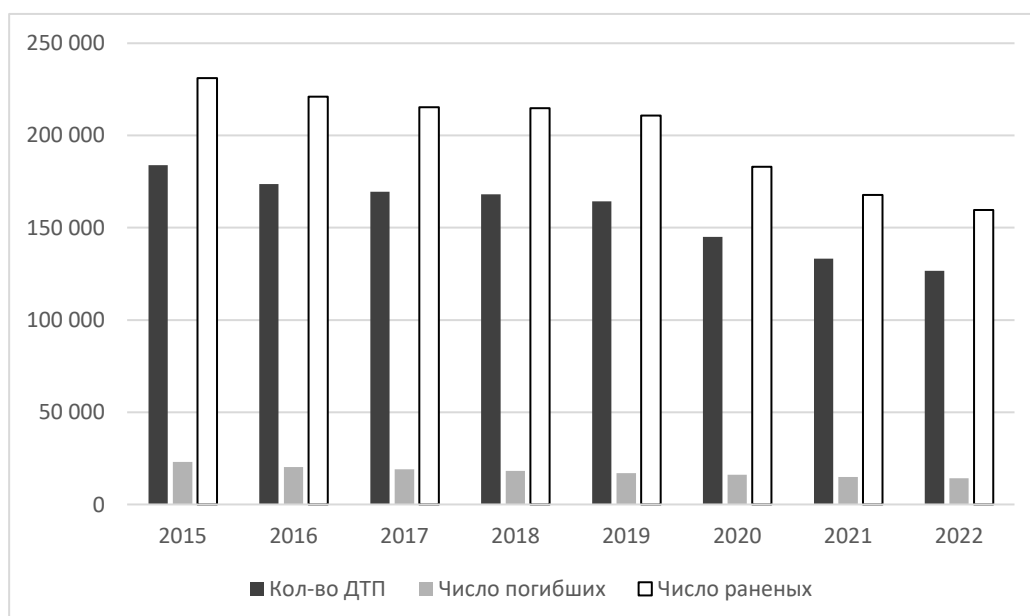


Рис. 1. Динамика основных показателей аварийности в РФ за 2015-2022 годы

В статье прогнозирование основных показателей дорожно-транспортного движения осуществлено с помощью уравнений системной динамики, позволяющих формализовать большое количество преимущественно нелинейных положительных и отрицательных обратных связей, существующих между этими показателями. Использование данного подхода позволяет повысить точность прогнозирования и за счет этого улучшает оперативность и качество управленческих решений.

## 1. Постановка задачи и подход к её решению

Необходимо разработать комплекс математических моделей для анализа и прогнозирования основных характеристик безопасности дорожно-транспортной системы. При разработке использовать системно-динамический подход, регрессионные модели и продукции для формализации причинно-следственных связей сложной структуры, существующих между переменными модели.

В связи с вышеизложенным для решения данной проблемы целесообразным представляется использование аппарата системной динамики [2], неоднократно успешно примененного при моделировании различных видов сложных процессов и систем [4-8].

Для построения комплекса математических моделей необходимо выполнить шаги, представленные на рисунке 2:



Рис. 2. Этапы разработки модели системной динамики для прогнозирования основных характеристик дорожно-транспортной системы

С учетом вышеизложенного, в качестве показателей, характеризующих безопасность функционирования дорожно-транспортной системы страны, приняты следующие переменные [9-10], которые указаны в таблице 1.

Таблица 1. Таблица основных показателей безопасности дорожно-транспортной системы

Обозначение переменной	Расшифровка переменной
$X_1$	Общее количество ДТП в РФ (в год)
$X_2$	Количество погибших в ДТП
$X_3$	Количество раненых в ДТП
$X_4$	Тяжесть последствий ДТП (кол-во погибших на 100 пострадавших)

X <sub>5</sub>	Количество погибших на 10 000 транспортных средств
X <sub>6</sub>	Количество пострадавших на 100000 жителей
X <sub>7</sub>	Количество ДТП из-за нарушения ПДД водителями
X <sub>8</sub>	Количество ДТП по вине нетрезвых водителей
X <sub>9</sub>	Количество ДТП по вине пешеходов
X <sub>10</sub>	Количество ДТП с участием детей
X <sub>11</sub>	Количество ДТП по вине технически неисправных транспортных средств
X <sub>12</sub>	Количество ДТП из-за неудовлетворительного состояния улиц и дорог
X <sub>13</sub>	Количество ДТП с тяжкими последствиями
X <sub>14</sub>	Количество ДТП по причине плохих климатических условий
X <sub>15</sub>	Количество ДТП по причине стихийных бедствий
X <sub>16</sub>	Количество ДТП по причине состояния здоровья водителя
X <sub>17</sub>	Количество ДТП по причине отвлекающих водителя факторов

Несмотря на то, что некоторые из переменных носят качественный характер, на практике применяются количественные шкалы, которые имеют ясный физический смысл. Методы перехода к таким представлениям осуществляется, например, с помощью аппарата теории нечетких множеств. В данном исследовании для численного моделирования процесса изменения переменных безопасности делается допущение, что рассматриваемые переменные измеряются в количественной шкале и при проведении расчетов используются их нормированные значения, определенные из следующего выражения:

$$X_i^*(t) = \frac{X_i(t)}{X_i^{norm}}, i = \overline{1, \dots, 17} \quad (1)$$

где  $X_i(t)$  – текущее значение характеристики, определенное в количественной шкале;  $X_i^{norm}$  – нормировочный коэффициент.

Кроме того, в модели учитываются внешние факторы, влияющие на безопасность дорожного движения, они указаны в таблице 2:

Таблица 2. Таблица внешних факторов, которые влияют на дорожно-транспортную систему

Обозначение внешнего фактора	Расшифровка внешнего фактора
E <sub>1</sub>	Количество транспортных средств
E <sub>2</sub>	Состояние транспортных средств
E <sub>3</sub>	Количество комплексов фото-видео фиксации нарушений
E <sub>4</sub>	Количество выданных водительских удостоверений
E <sub>5</sub>	Протяженность участков дорог
E <sub>6</sub>	Средний штраф за нарушение ПДД

Построение моделей системной динамики [2] осуществляется на основе выбранных переменных и внешних факторов, называемых, в терминах системной динамики – уровнями, характеризующие функционирование системы. На их основе строятся дифференциальные уравнений вида:

$$\frac{dX(t)}{dt} = X^+(t) - X^-(t) \quad (2)$$

где  $X^+(t)$ ,  $X^-(t)$  – положительные и отрицательные, соответственно, темпы скорости изменения переменной  $X(t)$ , включающие все факторы, которые вызывают рост и убывание данной переменной, соответственно.

Делается допущение, что темпы представляют собой функции, которые зависят от факторов. Темпы имеют вид:

$$X^\pm(t) = f(F_1(t), F_2(t), \dots, F_k(t)) = f_1(F_1(t))f_2(F_2(t)) \dots f_k(F_k(t)) \quad (3)$$

где  $F_1 \dots F_k$  – факторы, которые могут представлять собой как переменные, так и внешние воздействия.

## 2. Математическая модель

### 2.1. Разработка графа причинно-следственных связей переменных системы и внешних факторов

Между характеристиками безопасности дорожно-транспортного движения существуют положительные и отрицательные связи, которые значительно влияют на поведение характеристик во времени. Эти связи строятся на основе мнения экспертов в области безопасности дорожно-транспортных систем. Наличие этих связей позволяет построить матрицу инцидентности для характеристик безопасности, она изображена в таблице 3.

Таблица 3. Матрица инцидентности для характеристик безопасности дорожно-транспортной системы

	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>6</sub>
X <sub>1</sub>	0	0	0	0	0	0	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0	+1	+1	-1	P <sub>1</sub>	-1	-1
X <sub>2</sub>	0	0	0	+1	+1	0	0	+1	+1	0	+1	0	0	0	+1	-1	-1	-1	-1
X <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0	-1	0	-1
X <sub>4</sub>	0	+1	0	0	+1	0	+1	+1	+1	0	+1	0	0	0	+1	-1	-1	-1	-1
X <sub>5</sub>	0	+1	0	+1	0	0	+1	+1	0	0	+1	0	0	+1	+1	-1	-1	-1	-1
X <sub>6</sub>	0	0	+1	0	0	0	+1	+1	+1	+1	+1	0	+1	0	0	-1	-1	0	-1
X <sub>7</sub>	+1	-1	0	0	-1	0	0	+1	0	-1	0	0	+1	+1	0	-1	-1	-1	P <sub>2</sub>
X <sub>8</sub>	+1	0	0	0	0	0	+1	0	+1	0	+1	+1	0	+1	+1	0	-1	0	-1
X <sub>9</sub>	+1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	+1	+1	+1	0	+1	0	0	0	0	0
X <sub>10</sub>	+1	-1	-1	0	0	0	+1	+1	+1	0	0	0	+1	+1	0	-1	-1	-1	-1
X <sub>11</sub>	+1	0	0	0	0	0	0	+1	0	0	0	+1	0	0	P <sub>3</sub>	0	-1	0	-1
X <sub>12</sub>	+1	0	0	0	0	0	+1	+1	0	0	+1	0	0	0	+1	0	-1	0	0
X <sub>13</sub>	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0	0	0	0	0	0	+1	-1	-1	-1	-1

Переменная  $U_{i,j}$ , расположенная на пересечении соответствующих строк характеризует взаимное влияние переменных моделей с учетом внешних факторов среды:

$$U_{i,j} = \begin{cases} -1, & \text{переменная или внешний фактор } X_j \text{ отрицательно влияет на } X_i \\ 0, & \text{переменная или внешний фактор } X_j \text{ не влияет на } X_i \\ 1, & \text{переменная или внешний фактор } X_j \text{ положительно влияет на } X_i \\ P, & \text{значение определяется на основе продукции} \end{cases} \quad (4)$$

Определим значения продукции  $P_i, i = \overline{1, \dots, N}$ , характеризующие влияние окружающей среды на параметры модели, которые определяются на стадии адаптации разработанной модели к выбранному объекту управления. Исходя из анализа предметной области принято, что:  $P_1 = +1; P_2 = +1; P_3 = -1$ .

Для построения модели используется граф причинно-следственных связей, который строится на основе матрицы инцидентности, на рисунке 3 изображен подграф для переменной  $X_1$ . Полученный в результате граф характеризует сложную систему причинно-следственных связей между рассматриваемыми переменными и внешними факторами. Вершины графа соответствуют переменным  $X_1 - X_{13}$  и внешним факторам  $E_1 - E_6$ , дуги определяют причинно-следственные отношения между ними – направление и тип связи переменных и факторов.

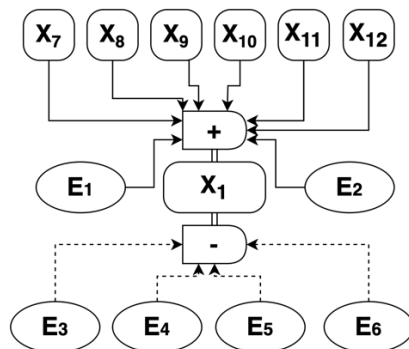


Рис. 3. Подграф причинно-следственных связей для показателей безопасности функционирования дорожно-транспортной системы по переменной  $X_1$

## 2.2. Уравнения системной динамики

На основе графа причинно-следственных связей осуществляется построение моделей системной динамики.

Для построения модели системной динамики выберем подмножество уровней  $X = \{X_i\}, i = \overline{1, \dots, 13}$ , для нахождения функциональных зависимостей между этими уровнями на основе существующей статистики предоставленной Госавтоинспекцией МВД России.

Определим для переменных  $X_i, i = \overline{1, \dots, 13}$  область допустимых значений:  $0 < X_i(t) \leq 1$ .

В соответствии с причинно-следственным графом показателей безопасности функционирования дорожно-транспортных систем построим уравнения следующего вида:

$$\frac{dX_i}{dt} = \frac{1}{X_i^{norm}} (\prod_{i,j} f_{i,j}(X_j^+) \times \sum_m E_m^+ - \prod_{i,k} f_{i,k}(X_k^-) \times \sum_n E_n^-) \quad (5)$$

Система дифференциальных уравнений в общем виде представлена формулой 6:

$$\begin{cases} \frac{\partial X_1}{\partial t} = \frac{1}{X_1^{norm}} (f_1(X_7)f_2(X_8)f_3(X_9)f_4(X_{10})f_5(X_{11})f_6(X_{12})(E_1 + E_2 + (E_4^{if})) - (E_3 + (E_4^{if}) + E_5 + E_6)) \\ \frac{\partial X_2}{\partial t} = \frac{1}{X_2^{norm}} (f_7(X_4)f_8(X_5)f_9(X_8)f_{10}(X_9)f_{11}(X_{11})(E_2) - (E_3 + E_4 + E_5 + E_6)) \\ \frac{\partial X_3}{\partial t} = \frac{1}{X_3^{norm}} (f_{12}(X_6)f_{13}(X_7)f_{14}(X_8)f_{15}(X_9)f_{16}(X_{10})f_{17}(X_{11})f_{18}(X_{12})f_{19}(X_{13})(E_1 + E_2) - (E_4 + E_6)) \\ \frac{\partial X_4}{\partial t} = \frac{1}{X_4^{norm}} (f_{20}(X_2)f_{21}(X_5)f_{22}(X_7)f_{23}(X_8)f_{24}(X_9)f_{25}(X_{11})(E_2) - (E_3 + E_4 + E_5 + E_6)) \\ \frac{\partial X_5}{\partial t} = \frac{1}{X_5^{norm}} (f_{26}(X_2)f_{27}(X_4)f_{28}(X_7)f_{29}(X_8)f_{30}(X_{11})(E_1 + E_2) - (E_3 + E_4 + E_5 + E_6)) \\ \frac{\partial X_6}{\partial t} = \frac{1}{X_6^{norm}} (f_{31}(X_3)f_{32}(X_7)f_{33}(X_8)f_{34}(X_9)f_{35}(X_{10})f_{36}(X_{11})f_{37}(X_{13}) - (E_3 + E_4 + E_6)) \\ \frac{\partial X_7}{\partial t} = \frac{1}{X_7^{norm}} (f_{38}(X_1)f_{39}(X_8)f_{40}(X_{13})(E_1 + (E_6^{if})) - f_{41}(X_2)f_{42}(X_5)f_{43}(X_{10})(E_3 + E_4 + E_5 + (E_6^{if}))) \\ \frac{\partial X_8}{\partial t} = \frac{1}{X_8^{norm}} (f_{44}(X_1)f_{45}(X_7)f_{46}(X_9)f_{47}(X_{11})f_{48}(X_{12})(E_1 + E_2) - (E_4 + E_6)) \\ \frac{\partial X_9}{\partial t} = \frac{1}{X_9^{norm}} (f_{49}(X_1)f_{50}(X_{10})f_{51}(X_{11})f_{52}(X_{12})(E_1) - f_{53}(X_2)f_{54}(X_3)) \\ \frac{\partial X_{10}}{\partial t} = \frac{1}{X_{10}^{norm}} (f_{55}(X_1)f_{56}(X_7)f_{57}(X_8)f_{58}(X_9)f_{59}(X_{13})(E_1) - f_{60}(X_2)f_{61}(X_3)(E_3 + E_4 + E_5 + E_6)) \\ \frac{\partial X_{11}}{\partial t} = \frac{1}{X_{11}^{norm}} (f_{62}(X_1)f_{63}(X_8)f_{64}(X_{12})(E_2^{if}) - ((E_2^{if}) + E_4 + E_6)) \\ \frac{\partial X_{12}}{\partial t} = \frac{1}{X_{12}^{norm}} (f_{65}(X_1)f_{66}(X_7)f_{67}(X_8)f_{68}(X_{11})(E_2) - (E_4)) \\ \frac{\partial X_{13}}{\partial t} = \frac{1}{X_{13}^{norm}} (f_{69}(X_1)f_{70}(X_2)f_{71}(X_3)f_{72}(X_4)f_{73}(X_5)f_{74}(X_6)f_{75}(X_7)f_{76}(X_8)(E_2) - (E_3 + E_4 + E_5 + E_6)) \end{cases} \quad (6)$$

## 2.3. Построение функциональных зависимостей между внутренними переменными модели

Выражения вида  $f_{A,B}(X_B)$ , которые представлены в системе дифференциальных уравнений обозначают функциональную зависимость переменной  $X_A$  от  $X_B$ , определяемые с использованием аппарата регрессионного анализа, а выражение вида  $(E_i^{if})$  для  $i = \overline{1, \dots, 6}$  обозначает зависимость переменной от внешнего фактора по предикату, это выражение определяется следующим образом:

$$(E_i^{if}) = \begin{cases} -1, & \text{когда между переменной и внешним фактором} \\ & \text{существует обратно пропорциональная зависимость} \\ 0, & \text{когда переменная и внешний фактор не взаимосвязаны друг с другом} \\ 1, & \text{когда между переменной и внешним фактором} \\ & \text{существует прямо пропорциональная зависимость} \end{cases} \quad (7)$$

Каждое из выражений  $(E_i^{if})$  для  $i = \overline{1, \dots, N}$  имеет собственный набор условий.

Для определения вида выражений  $f_{A,B}(X_B)$ , определим зависимости между переменными путем регрессионного анализа, методом наименьших квадратов в качестве функциональных зависимостей будут выступать полиномы 2 степени.

В качестве примера выполним аппроксимацию выражений для  $f_{1,B}(X_B)$ . Эти выражения представляют собой зависимости общего числа ДТП от количества ДТП из-за нарушения ПДД водителями, количества ДТП из-за нарушения ПДД водителями ТС в состоянии опьянения [10], количества ДТП из-за нарушения ПДД пешеходам, количества ДТП с участием детей в возрасте до 16

лет, количества ДТП из-за эксплуатации технически неисправных ТС, количество ДТП из-за неудовлетворительного состояния улиц и дорог:

$$\begin{cases} f_{1,7}(X_7) = 6,7X_7^2 - 11,3X_7 + 5,66 \\ f_{1,8}(X_8) = -1,51X_8^2 + 2,45X_8 - 0,04 \\ f_{1,9}(X_9) = -0,95X_9^2 + 1,64X_9 + 0,24 \\ f_{1,10}(X_{10}) = -2,65X_{10}^2 + 5,24X_{10} - 1,64 \\ f_{1,11}(X_{11}) = -0,58X_{11}^2 + 0,83X_{11} + 0,65 \\ f_{1,12}(X_{12}) = -1,55X_{12}^2 + 2,74X_{12} - 0,28 \end{cases} \quad (8)$$

В качестве примера проиллюстрируем зависимость количества ДТП  $X_1$  от количества ДТП из-за нарушения ПДД водителями в состоянии опьянения  $X_8$  (рис. 4) и от количества ДТП из-за нарушения ПДД пешеходами  $X_9$  (рис. 5).

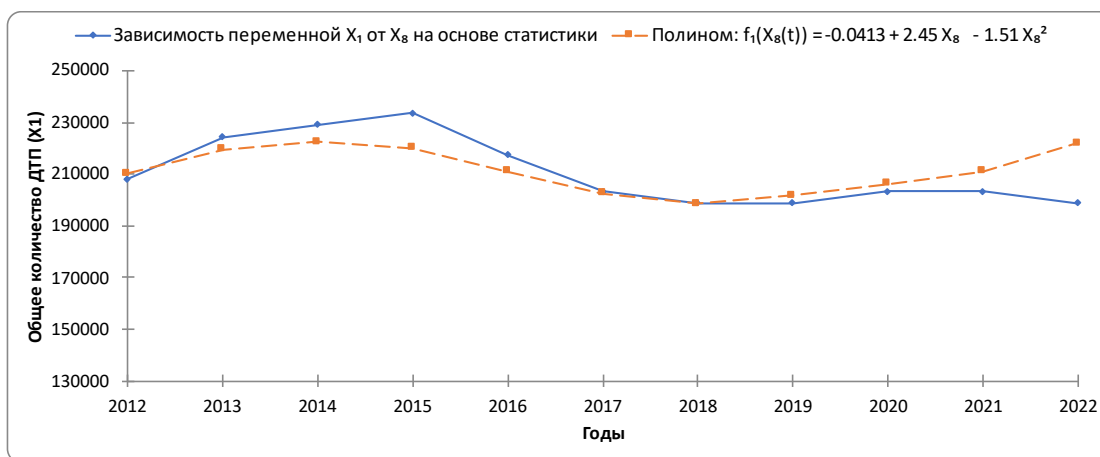


Рис. 4. График функциональной зависимости количества ДТП (показатель  $X_1$ ) от количества ДТП из-за нарушения ПДД водителями в состоянии опьянения  $X_8$

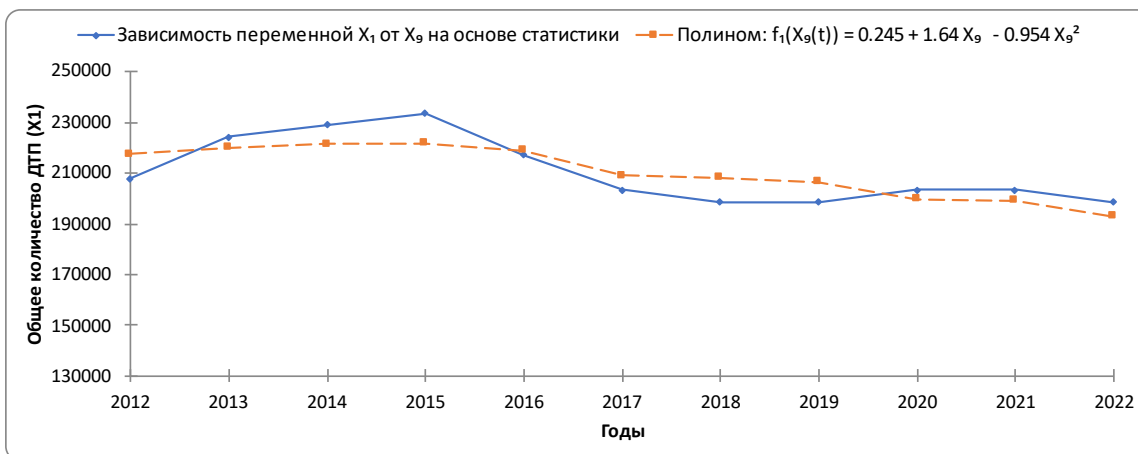


Рис. 5. График функциональной зависимости количества ДТП (показатель  $X_1$ ) от количества ДТП из-за нарушения ПДД пешеходами  $X_9$

На рисунках 4 и 5 приведены графики изменения данных зависимостей (оранжевая линия), а также соответствующие данные статистики (синяя линия). Для каждого полинома были подсчитаны некоторые характеристики, например для  $f_{1,9}(X_9)$ :

- Среднеквадратичное отклонение = 0,044;
- Дисперсия регрессии = 0,0029;
- Стандартная ошибка регрессии = 0,035;
- Критерий Пирсона: 0,88

Критерий Пирсона в этом случае показывает величину достоверности аппроксимации.

### 3. Решение системы дифференциальных уравнений в численном виде

Завершающим этапом построения модели системной динамики является конкретизация множителей и слагаемых, входящих в данную систему уравнений на основе имеющейся статистики по факторам и основным переменным системы [11-13]. После определения функциональных зависимостей и коэффициентов в уравнениях, а также внешних факторов, полученная система уравнений решается методом Рунге–Кутты 4-го порядка точности. Эта система представлена в формуле 9.

Начальные условия, при которых получены результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4. Начальные условия для численного решения системы диф. уравнений

$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$
0,89	1	0,86	1	0,95	0,87	0,84	1	1	0,95	1	0,95	0,62

На рисунке 6 представлен график, показывающий изменение во времени расчетных значений для всех расчетных значений переменных модели на интервале с 2021-2024 гг. Результаты расчета сравнены с реальными статистическими данными по каждой переменной. Для примера представим графики сравнения статистических и моделированных данных за 2004-2010 годы для переменных  $X_8$  и  $X_{12}$ . Результаты представлены на рисунках 7 и 8 соответственно.

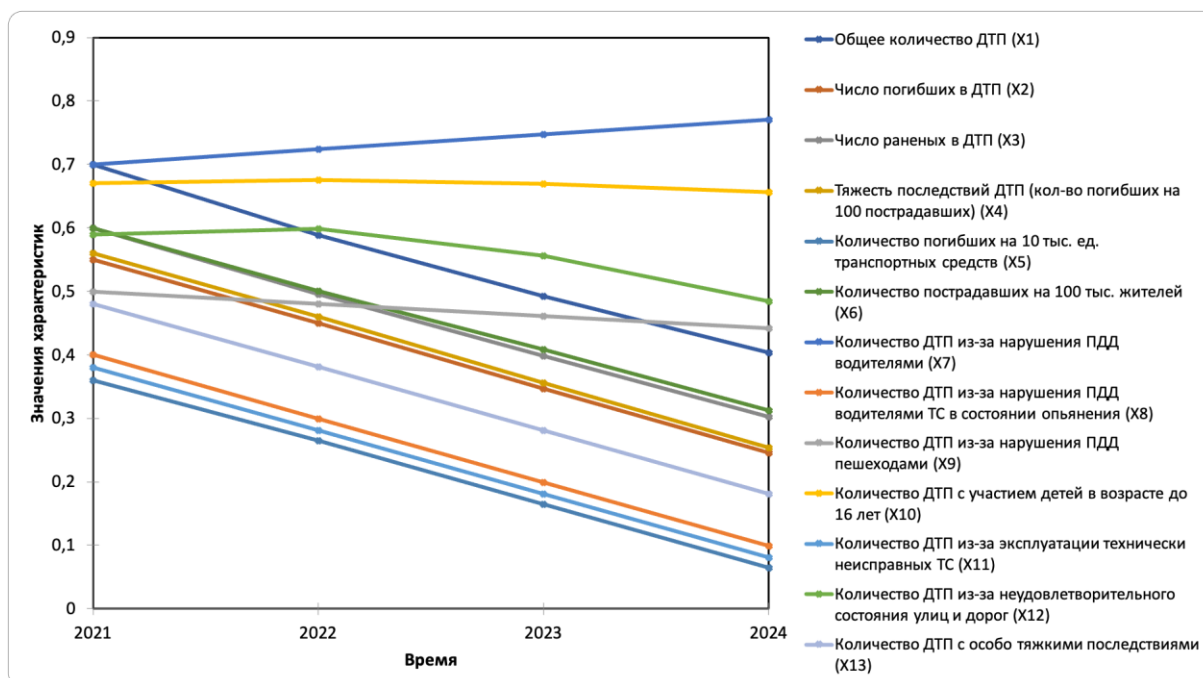


Рис. 6. Результаты прогнозирования по каждой переменной за 2021-2024 годы

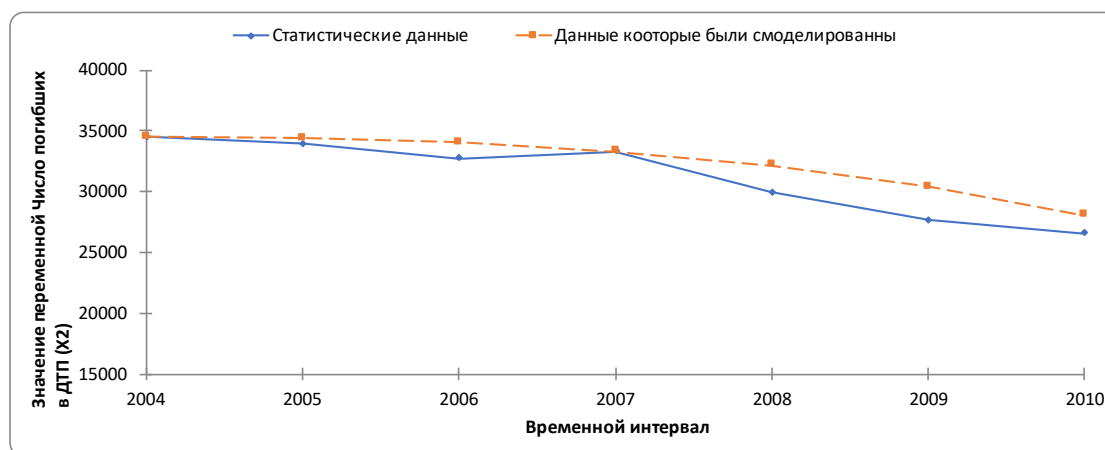


Рис. 7. Сравнение статистических и моделированных данных для переменной  $X_2$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial X_1}{\partial t} &= (5.66 - 11.34x_7 + 6.7x_7^2)(-0.04126 + 2.448x_8 - 1.508x_8^2)(0.2447 + 1.644x_9 - 0.9536x_9^2)(-1.636 + 5.242x_{10} - 2.647x_{10}^2)(0.6583 + 0.8366x_{11} - 0.5839x_{11}^2) \times \\
&\quad \times (-0.2865 + 2.739x_{12} - 1.555x_{12}^2) \left( (k_1t + b_1) + \left( \frac{k_2k_2e^t}{k_2+k_2(e^t-1)} \right) + (k_4t + b_4) \right) - ((k_3t + b_3) + (k_5t + b_5) + (k_6t + b_6)) \\
\frac{\partial X_2}{\partial t} &= (-7.633 + 18.17x_4 - 9.542x_4^2)(0.7821 - 0.3914x_5 + 0.6021x_5^2)(0.3846 + 0.8609x_8 - 0.2409x_8^2)(0.6607 + 0.08955x_9 + 0.2619x_9^2) \times \\
&\quad \times (0.667 + 0.4408x_{11} - 0.09477x_{11}^2) \left( \frac{k_2k_2e^t}{k_2+k_2(e^t-1)} \right) - ((k_3t + b_3) + (k_4t + b_4) + (k_5t + b_5) + (k_6t + b_6)) \\
\frac{\partial X_3}{\partial t} &= (0.8616 - 0.8331x_6 + 0.9748x_6^2)(3.3 - 6.247x_7 + 3.961x_7^2)(-0.1302 + 2.757x_8 - 1.76x_8^2)(0.2173 + 1.784x_9 - 1.09x_9^2)(-1.527 + 5.105x_{10} - 2.635x_{10}^2) \times \\
&\quad \times (0.6634 + 0.863x_{11} - 0.6441x_{11}^2)(-0.3488 + 2.92x_{12} - 1.68x_{12}^2)(0.9822 - 0.4798x_{13} + 0.4747x_{13}^2) \left( (k_1t + b_1) + \left( \frac{k_2k_2e^t}{k_2+k_2(e^t-1)} \right) \right) - ((k_4t + b_4) + (k_6t + b_6)) \\
\frac{\partial X_4}{\partial t} &= (4.203 - 8.259x_2 + 5.004x_2^2)(0.8014 - 0.2235x_5 + 0.3295x_5^2)(13.45 - 27.19x_7 + 14.61x_7^2)(1.307 - 1.625x_8 + 1.314x_8^2)(1.258 - 1.485x_9 + 1.191x_9^2) \times \\
&\quad \times (0.8697 - 0.3526x_{11} + 0.4726x_{11}^2) \left( \frac{k_2k_2e^t}{k_2+k_2(e^t-1)} \right) - ((k_3t + b_3) + (k_4t + b_4) + (k_5t + b_5) + (k_6t + b_6)) \\
\frac{\partial X_5}{\partial t} &= (-11.88 + 26.66x_2 - 13.82x_2^2)(-22.02 + 49.49x_4 - 26.52x_4^2)(38.45 - 83.88x_7 + 46.54x_7^2)(2.214 - 4.525x_8 + 3.319x_8^2)(0.7075 - 0.3949x_{11} + 0.7298x_{11}^2) \times \\
&\quad \times \left( (k_1t + b_1) + \left( \frac{k_2k_2e^t}{k_2+k_2(e^t-1)} \right) \right) - ((k_3t + b_3) + (k_4t + b_4) + (k_5t + b_5) + (k_6t + b_6)) \\
\frac{\partial X_6}{\partial t} &= (-24.14 + 51.93x_3 - 26.82x_3^2)(23.62 - 51.14x_7 + 28.61x_7^2)(3.09 - 6.099x_8 + 3.925x_8^2)(-3.505 + 11.51x_9 - 7.203x_9^2)(-8.241 + 19.29x_{10} - 10.12x_{10}^2) \times \\
&\quad \times (1.093 - 1.175x_{11} + 1.041x_{11}^2)(4.137 - 8.122x_{13} + 4.89x_{13}^2) - ((k_3t + b_3) + (k_4t + b_4) + (k_6t + b_6)) \\
\frac{\partial X_7}{\partial t} &= (5.629 - 10.94x_1 + 6.304x_1^2)(-0.1963 + 3.037x_8 - 1.998x_8^2)(0.4072 + 0.9857x_{13} - 0.4329x_{13}^2) \left( (k_1t + b_1) + (k_6t + b_6) \right) - (-3.958 + 10.96x_2 - 6.108x_2^2) \times \\
&\quad \times (0.9006 - 0.12x_5 + 0.1586x_5^2)(-2.191 + 6.821x_{10} - 3.712x_{10}^2) \left( (k_3t + b_3) + (k_4t + b_4) + (k_5t + b_5) \right) \\
\frac{\partial X_8}{\partial t} &= (-22.85 + 50.16x_1 - 26.57x_1^2)(19.54 - 41.06x_7 + 22.32x_7^2)(2.42 - 5.52x_9 + 4.121x_9^2)(0.4247 + 0.4742x_{11} + 0.09459x_{11}^2)(-1.334 + 3.766x_{12} - 1.604x_{12}^2) \times \\
&\quad \times \left( (k_1t + b_1) + \left( \frac{k_2k_2e^t}{k_2+k_2(e^t-1)} \right) \right) - ((k_4t + b_4) + (k_6t + b_6)) \\
\frac{\partial X_9}{\partial t} &= (-28.67 + 61.63x_1 - 32.11x_1^2)(-0.1188 - 0.09897x_{10} + 1.208x_{10}^2)(0.3864 + 0.6083x_{11} + 0.03076x_{11}^2)(-2.228 + 6.437x_{12} - 3.462x_{12}^2) \times \\
&\quad \times ((k_1t + b_1)) - (0.5683 - 1.561x_2 + 1.977x_2^2)(0.2059 - 0.8103x_3 + 1.516x_3^2) \\
\frac{\partial X_{10}}{\partial t} &= (-10.03 + 22.52x_1 - 11.54x_1^2)(9.906 - 20.46x_7 + 11.55x_7^2)(0.07909 + 1.751x_8 - 0.8586x_8^2)(0.7868 - 0.199x_9 + 0.4145x_9^2)(2.516 - 4.355x_{13} + 2.828x_{13}^2) \times \\
&\quad \times ((k_1t + b_1)) - (0.4189 + 0.1803x_2 + 0.3874x_2^2)(-2.821 + 6.925x_3 - 3.135x_3^2) \left( (k_3t + b_3) + (k_4t + b_4) + (k_5t + b_5) + (k_6t + b_6) \right) \\
\frac{\partial X_{11}}{\partial t} &= (-44.62 + 95.98x_1 - 50.77x_1^2)(-0.3553 + 0.9116x_8 + 0.4587x_8^2)(-0.7184 + 1.451x_{12} - 0.01177x_{12}^2) - \left( \frac{k_2k_2e^t}{k_2+k_2(e^t-1)} \right) + (k_4t + b_4) + (k_6t + b_6) \\
\frac{\partial X_{12}}{\partial t} &= (-5.698 + 14.12x_1 - 7.567x_1^2)(-0.87 + 3.832x_7 - 2.118x_7^2)(-0.06734 + 2.088x_8 - 1.05x_8^2)(0.6877 + 0.4022x_{11} - 0.1139x_{11}^2) \left( \frac{k_2k_2e^t}{k_2+k_2(e^t-1)} \right) - ((k_4t + b_4)) \\
\frac{\partial X_{13}}{\partial t} &= (21.28 - 45.46x_1 + 25.14x_1^2)(-5.782 + 14.9x_2 - 8.365x_2^2)(3.563 - 7.182x_3 + 4.534x_3^2)(-10.67 + 26.38x_4 - 15.09x_4^2)(0.852 - 0.3886x_5 + 0.3563x_5^2) \times \\
&\quad \times (0.8457 - 1.364x_6 + 1.424x_6^2)(-8.522 + 18.81x_7 - 9.412x_7^2)(-1.521 + 6.326x_8 - 4.161x_8^2) \left( \frac{k_2k_2e^t}{k_2+k_2(e^t-1)} \right) - ((k_3t + b_3) + (k_4t + b_4) + (k_5t + b_5) + (k_6t + b_6))
\end{aligned} \tag{9}$$



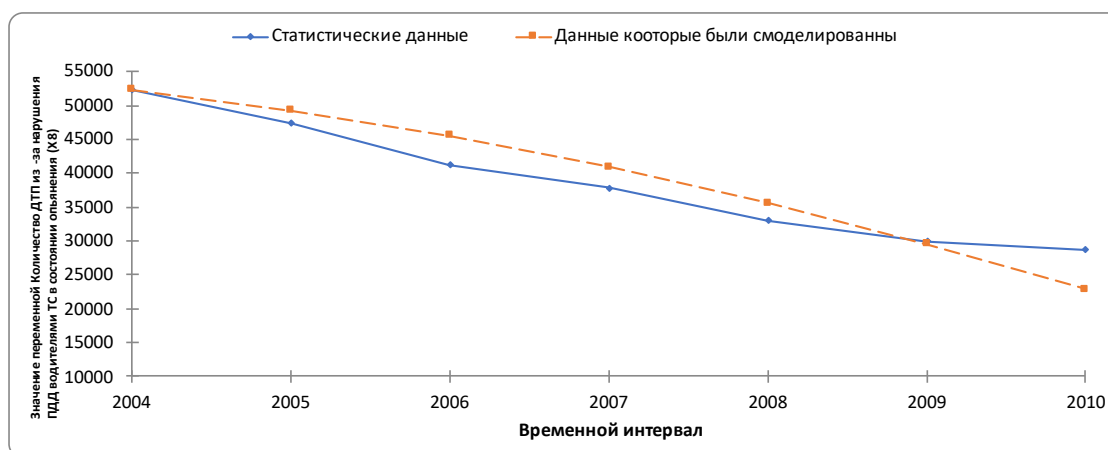


Рис. 8. Сравнение статистических и смоделированных данных для переменной  $X_8$

На рисунке 7 максимальное отклонение от статистики было в 2009 году и составляет 9,8 процентов, а на рисунке 8 максимальное отклонение от статистики было в 2010 году и составляет 10 процентов.

#### 4. Коррекция модели системной динамики

Коррекция математической модели необходима для повышения ее точности и адекватности. При построении математической модели на неё влияют много факторов, могут быть допущены определенные упрощения и приближения, которые не всегда позволяют достичь высокой точности предсказания результатов моделирования.

После того, как модель была проверена на статистических данных, может стать ясно, что она не соответствует реальности в каких-то аспектах. В таком случае, коррекция модели позволяет улучшить ее точность и достоверность. Коррекция математической модели может производиться путем добавления новых параметров или переменных, корректировки параметров. В результате коррекции модели можно получить более точный прогноз динамики основных характеристик дорожно-транспортной системы, что может быть полезно для принятия решений в сфере ДТП.

Результирующие данные прогнозировались на статистике с 2004-2020 гг. Для примера проиллюстрируем [14] как вела себя система с 2004-2010 гг. на рисунке 9.

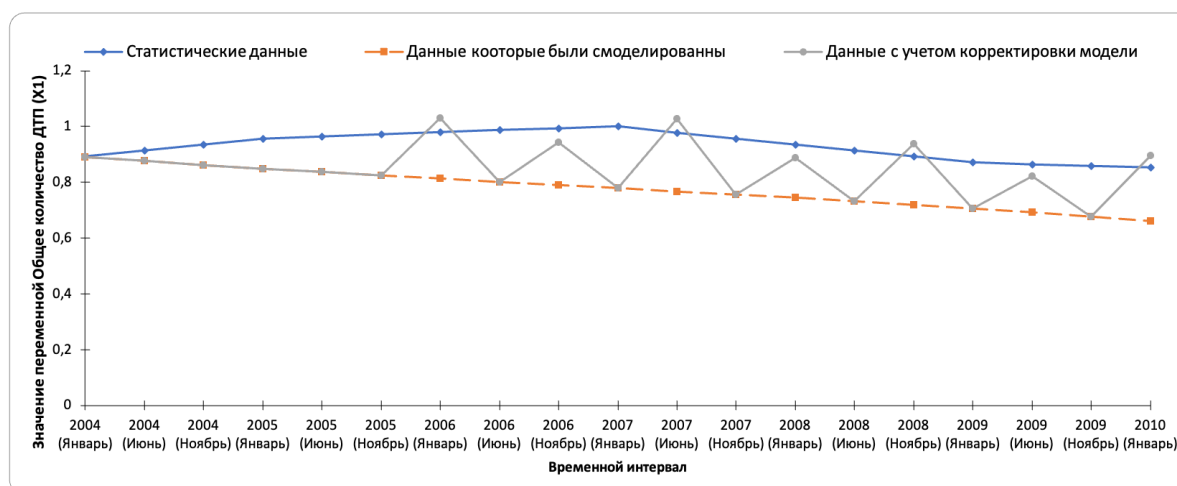


Рис. 9. График состояния системы за 2004-2010 годы

Коррекция математической модели выполняется если разность между смоделированными и статистическими данными превышает 10 %. Из рисунка 9 следует, что с января 2004 года по июнь 2005 года корректировка модели не требовалась, на оставшемся промежутке модель корректировалась (ломанная линия). Можно отметить, что число ДТП, рассчитанное по разработанным моделям, достаточно хорошо соответствует статистическим данным, полученным за период с 2021 по 2022 года. Данное обстоятельство позволяет рекомендовать для практического использования разработанное математическое обеспечение при моделировании основных показателей безопасности дорожно-транспортной системы России.

## 5. Действия ЛПР при выходе переменных модели за допустимые значения

Допустимые значения в сфере принятий решений – это значения основных характеристик дорожно-транспортной системы, при достижении или превышении которых необходимо предпринять ряд мероприятий для того, чтобы вернуть значение переменной в допустимую зону. То есть, это точки, где принимаются серьезные решения по восстановлению стабильности модели. Часто допустимые значения устанавливаются заранее на основе соответствующих документов безопасности, чтобы они могли быть учтены при принятии решений [15].

Математический комплекс способен строить лепестковые диаграммы и сравнивать полученные значения с предельно-допустимыми. Данный функционал будет рекомендовать к использованию ЛПР (лицо принимающее решение). На рисунках 10 и 11 приведены лепестковые диаграммы, характеризующие изменения основных показателей безопасности дорожно-транспортной системы на временном интервале 2021, 2023 годы. Предельные допустимые значения этих характеристик показаны красной линией.

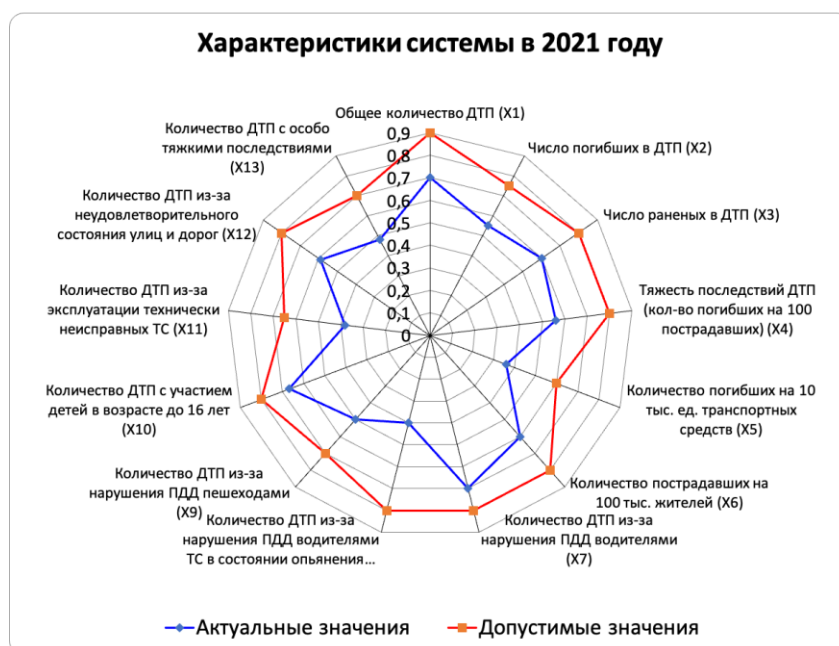


Рис. 10. Изменения основных показателей безопасности в 2021 году

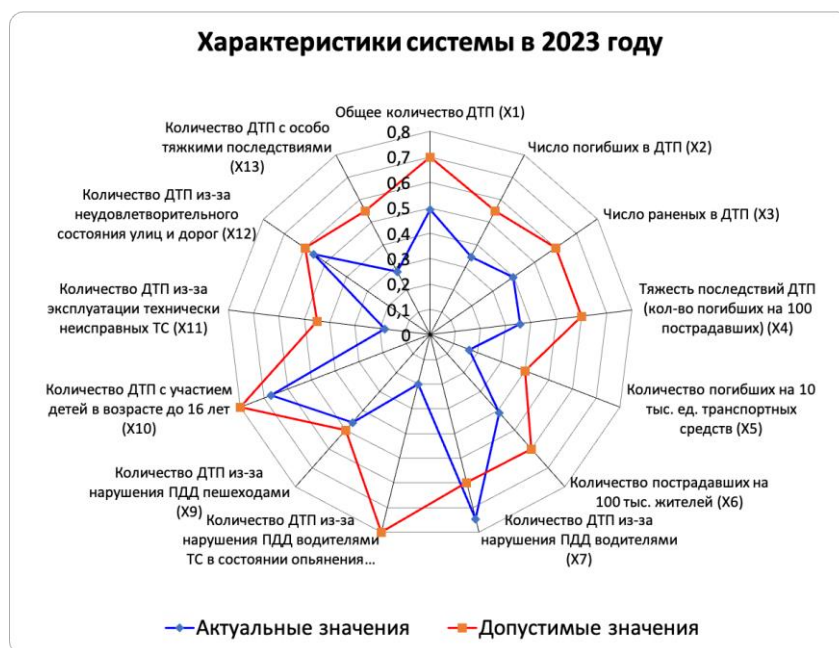


Рис. 11. Изменения основных показателей безопасности в 2023 году

На рисунке 10 видно, что значения всех характеристик находятся в допустимой (предельной) зоне, она иллюстрируется красной линией. На рисунке 11 видно, что характеристика  $X_7$  выходит за допустимую зону и это сигнал для ЛПП для принятия решений.

## 6. Заключение

Разработан комплекс моделей системной динамики, позволяющий прогнозировать основные показатели безопасности процесса функционирования дорожно-транспортной системы. По предложенной методике построена система нелинейных дифференциальных уравнений, решение которой позволяет определить изменение значений показателей безопасности на различных интервалах времени. Предложена процедура коррекции модели, которая позволяет улучшить точность и достоверность результатов прогнозирования.

## Литература

1. Сайт Госавтоинспекции МВД России, сведения о показателях состояния безопасности дорожного движения. [Электронный ресурс]: <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 24.03.2023).
2. *Форрестер Д.* Мировая динамика: пер. с англ. / Д. Форрестер. – М.: ООО «Изд-во АСТ», 2003. – 379 с.
3. Информационно-правовой портал Гарант, Федеральный закон от 10 декабря 1995 г. N 196-ФЗ "О безопасности дорожного движения". [Электронный ресурс]: <http://base.garant.ru/10105643/> (дата обращения: 27.03.2023).
4. *Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Фоминых Д.С., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю.* Предотвращение критических сочетаний событий при сварке роботизированными технологическими комплексами // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. N 4. – С. 60–71.
5. *Щербаков М.А., Кушников В.А.* Модели и алгоритмы системы управления аварийными ситуациями при производстве стекла // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т 2, N 1(55). – С. 196–200.
6. *Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Фоминых Д.С., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю.* Минимизация ущерба от нарушения технологического процесса в сварочных роботизированных технологических комплексах // Мехатроника автоматизация, управление. 2017. Т 18. N 5. – С. 328–332.
7. *Клюев В.В., Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Богомолов А.С., Иващенко В.А., Филимонюк Л.Ю., Хамутова М.В.* Информационно-управляющая система для поддержки принятия решений по ликвидации последствий наводнений // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. N 11(149). – С. 39–45.
8. *Yannis G., Weijermars W., Gitelman V., Vis M., Chaziris A., Papadimitriou E., Azevedo C.L.* Road safety performance indicators for the interurban road network // Accident; analysis and prevention. – 2013. – Vol. 60, – P. 384–395.
9. *Salmon P. M., Read G. J. M., Thompson J., McLean S., McClure, R.* Computational modelling and systems ergonomics: a system dynamics model of drink driving-related trauma prevention // Ergonomics. – 2020. – Vol. 63(8), – P. 965–980.
10. *Брюн Е. А., Бурцев А. А., Баканов К. С.* Анализ показателей управления транспортными средствами в состоянии опьянения в Российской Федерации в 2007-2019 гг // Наркология. – 2020. – Т 19, N 6. – С. 32–43.
11. *Guo, Q., Xu, P., Pei, X., Wong, S. C., Yao, D.* (2017). The effect of road network patterns on pedestrian safety: A zone-based Bayesian spatial modeling approach // Accident; analysis and prevention. – 2017. – Vol. 99(Pt A). –P. 114–124.
12. *Дорофеева, С.Р., Касаткин А.Н.* Анализ данных и визуализация дорожно-транспортных происшествий в Удмуртской Республике // Выставка инноваций - 2022 (осенняя сессия) : сборник материалов XXXIV Республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов, Ижевск, 15 декабря 2022 года. – Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2023. – С. 49-57.
13. *Dell'Acqua, G., Luca, M.D., Mauro, R.* Road Safety Knowledge-Based Decision Support System // Procedia - Social and Behavioral Sciences. – 2011. – Vol. 20. –P. 973–983.
14. *Gettman, D.M., Head, L.* Surrogate Safety Measures from Traffic Simulation Models // Transportation Research Record. – 2003. – Vol. 1840. –P. 104–115.
15. Баканов К. С. Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации за 6 месяцев 2022 года / К. С. Баканов, П. В. Ляхов, Е. Д. Никулин, А.С. Сергунова, С.Б. Наумов. –М.: Научный центр безопасности дорожного движения Министерства внутренних дел Российской Федерации, 2022. – 44 с.