

© 2024 г. А.Д. ЦВИРКУН, д-р техн. наук (tsvirkun@ipu.ru)
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва),
А.С. БОГОМОЛОВ, д-р техн. наук (bogomolov@iptmuran.ru)
(Саратовский научный центр РАН),
О.И. ДРАНКО, д-р техн. наук (olegdranko@gmail.com)
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва),
В.А. КУШНИКОВ, д-р техн. наук (kushnikoff@iptmuran.ru),
М.С. ПОЛЯКОВ (maxg6000@mail.ru)
(Саратовский научный центр РАН),
А.Ф. РЕЗЧИКОВ, чл.-корр. РАН (rw4cy@mail.ru),
И.А. СТЕПАНОВСКАЯ, канд. техн. наук (irstepan@ipu.ru)
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

МОДЕЛИ СИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМОЙ МЕГАПОЛИСА

Предлагается комплекс системно-динамических моделей для управления дорожно-транспортной системой мегаполиса с учетом показателей безопасности движения. Основные показатели дорожно-транспортной системы определены в соответствии со Стратегией безопасности дорожного движения в Российской Федерации на 2018–2024 гг., а также на основе нормативно-правовых документов Госавтоинспекции МВД России для города Москвы. Результаты работы предназначены для совершенствования математического обеспечения систем управления дорожно-транспортным движением крупных городов.

Ключевые слова: модель системной динамики, дорожно-транспортная сеть, управление, безопасность движения.

DOI: 10.31857/S0005231024100064, **EDN:** YURMJD

1. Введение

В соответствии со Стратегией безопасности дорожного движения в РФ [1] перспективным направлением развития дорожно-транспортных систем мегаполисов является применение интеллектуальных систем управления дорожным движением. Основная цель функционирования таких крупномасштабных систем заключается в обеспечении требуемого уровня основных показателей безопасности дорожного движения (далее – показателей) (рис. 1).

Величину и динамику этих показателей учитывают при развитии транспортной инфраструктуры мегаполисов, планировании деятельности федеральных и муниципальных органов власти, разработке мероприятий по снижению дорожно-транспортной аварийности и травматизма, анализе причин возникновения дорожно-транспортных происшествий, разработке и обосновании градостроительных решений, планировании деятельности компаний, занимающихся автострахованием, и др.



Рис. 1. Показатели безопасности дорожного-транспортного движения [1].



Рис. 2. Динамика количества погибших в дорожно-транспортных происшествиях на территории России в течение года [2].

Важной проблемой, затрудняющей развитие дорожно-транспортной системы России и сдерживающей применение концепции интеллектуальных систем управления дорожным движением на территории ее мегаполисов, является достаточно высокий уровень аварийности на дорогах страны и связанное с ней значительное количество погибших в дорожно-транспортных происшествиях (рис. 2).

Один из путей повышения безопасности дорожно-транспортного движения связан с разработкой и улучшением моделей и алгоритмов систем поддержки принятия решений по организации дорожного движения.

Теоретическое обоснование принципов функционирования крупномасштабных систем поддержки принятия решений междисциплинарной природы, широко используемых при интеллектуальном управлении дорожно-транспортным движением, было осуществлено в трудах ряда крупных отечественных и зарубежных ученых, таких как Н.П. Бусленко, С.Н. Васильев, А.Дж. Вильсон, Ю.Б. Гермейер, К.Ф. Даганцо, Х. Иносэ, Д.А. Новиков, А.Ф. Резчиков, Т. Хамада, А.Д. Цвиркун и др. В результате практического применения полученных результатов были созданы и успешно функционируют эффективные средства мониторинга и управления дорожным движением, в том числе в современных мегаполисах. Развитие таких систем поддерживается исследованиями по многим различным аспектам проблемы безопасности дорожного движения в России и за рубежом [3–9]. Однако при этом не отмечается публикаций о российских комплексах мониторинга и управления динамикой показателей безопасности дорожно-транспортных систем городов в их сложном взаимосвязанном комплексе. Недостаточная проработанность теоретических аспектов создания математического обеспечения для таких интеллектуальных систем управления уменьшает точность прогноза основных показателей дорожно-транспортного движения, снижает оперативность и качество принимаемых решений. Это обстоятельство обуславливает практическую значимость темы работы.

2. Задача управления дорожно-транспортной системой мегаполиса

При формировании критерия эффективности решаемой задачи, характеризующего величину потерь от нарушения безопасности дорожного движения в мегаполисе, возникает ряд проблем. Основные из них связаны с трудноформализуемым влиянием человеческого фактора, высокой размерностью решаемых задач, невозможностью или невоспроизводимостью натуральных экспериментов. Тут же характерны и известные затруднения в полном формальном описании перечней и отдельных факторов потерь, связанных с нарушениями безопасности большой и сложной системы (дорожного движения в данном случае), выявлением удовлетворительного набора управляющих переменных и возмущений и др. В связи с этим при разработке постановки задачи были приняты допущения, которые, по мнению авторов, достаточно часто выполняются в процессе функционирования дорожно-транспортной системы мегаполиса.

1) Рассматриваются регулярно или довольно часто повторяющиеся ситуации, влияющие на безопасность дорожно-транспортного движения (например, изменение состояния дорог в осенне-зимний период, аварийные ситуации, возникающие из-за невнимательности пешеходов или водителей).

2) При ограничениях по времени и другим ресурсам достичь снижения потерь можно за счет более оперативных и качественных управленческих решений, которые формулируются в виде комплексов мероприятий (планов).

3) У лиц, принимающих решения в области безопасности дорожного движения мегаполиса, имеется обоснованное мнение о желаемых ориентировочных значениях показателей. Эти значения могут варьироваться в некоторых пределах в зависимости от ситуационного контекста, динамики в соседних и аналогичных регионах. Базовые же усредненные значения показателей выбираются на основе экспертного опыта и существующих нормативов. Далее будем называть их рекомендованными значениями показателей.

4) Ущерб от нарушения безопасности зависит от взвешенной суммы отклонений показателей X_i^* , $i = \overline{1, n}$, от рекомендованных значений $X_i^*(t)$, $i = \overline{1, n}$. Предполагаем, что с ростом отклонений $X_i^* - X_i(t, p(t))$ возрастает ущерб жителям, автотранспортным средствам, объектам инфраструктуры и другие затраты на функционирование дорожно-транспортной системы мегаполиса.

5) Лица, принимающие решения, имеют несколько альтернативных решений по повышению безопасности функционирования дорожно-транспортной системы, для каждого из которых построен план мероприятий $p(t) \in P$ по реализации этого решения. Каждый из этих планов предполагает определенные затраты, которые должны укладываться в имеющиеся ресурсные ограничения.

С учетом указанных допущений можно представить задачу выбора плана, при котором достигается минимум целевой функции, равной взвешенной сумме квадратов отклонений показателей от рекомендованных значений. Это требование отражено в условии (1).

Условия (2) и (3) отражают ограничения на скорости и границы изменения переменных. Эти ограничения устанавливаются на основе анализа причинно-следственных связей в рассматриваемой области и с учетом смысла задачи.

В условиях сказанного задача может иметь следующую формулировку.

Разработать математические модели и методы управления дорожно-транспортной системой мегаполиса, позволяющие на отрезке времени $t \in [t_0; t_N]$ определить план мероприятий $p(t) \in P$, который минимизирует рассматриваемую целевую функцию

$$(1) \quad Z(p(t)) = \int_{t_0}^{t_N} \sum_{i=1}^n (X_i^* - X_i(t, p(t)))^2 \gamma_i dt \rightarrow \min,$$

при ограничениях:

$$(2) \quad \frac{dX_i(t)}{dt} = f_i(t, X_1(t), \dots, X_n(t), p(t)), \quad i = \overline{1, n},$$

$$X_i(t_0) = X_{i0}, \quad i = \overline{1, n},$$

$$(3) \quad \forall t \in [t_0; t_N] X_i^{\min} \leq X_i(t, p(t)) \leq X_i^{\max}, \quad i = \overline{1, n},$$

и граничных условиях:

$$F_i^{t_0}(X, X', p) = 0, \quad F_j^{t_N}(X, X', p) = 0, \quad i = \overline{1, k_1}, \quad j = \overline{1, k_2},$$

$X_i(t)$, $i = \overline{1, n}$, и X_i^* – показатели и их рекомендованные значения соответственно; γ_i – весовые коэффициенты;

X_i^{\min} , X_i^{\max} – минимальное и максимальное значение показателя соответственно.

Подход к решению задачи. При решении задачи (1)–(3) в качестве управляющей модели используем уравнения системной динамики. При их формировании известная динамическая модель

$$(4) \quad \frac{dI_j(t)}{dt} = F_j(I_1, \dots, I_n), \quad j = \overline{1, n},$$

интерпретируется как

$$(5) \quad \frac{dI_j(t)}{dt} = \alpha_{j,0} + \sum_{k=1}^n \alpha_{j,k} \prod_l \omega_{j,k,l}(I_l) I_k, \quad j = \overline{1, n}.$$

Правомерность перехода от (4) к (5) объясняется следующим образом. Если сравнение собранной статистической информации с расчетными значениями покажет, что система (5) описывает объект управления с требуемой точностью, то она может использоваться при решении поставленной задачи. Обширный опыт применения системно-динамического подхода [10–14] показал, что системами вида (5) описывается достаточно широкий класс различных явлений.

3. Математическая модель

Математические модели строятся для всех планов мероприятий $p(t)$. Основные этапы построения модели показаны на схеме, рис. 3.

Списки показателей крупномасштабной системы (рис. 1) насчитывают многие сотни наименований, их подробный анализ вряд ли целесообразно проводить в рамках одной статьи. Поэтому, не теряя общности, рассмотрим в качестве таких показателей представленные в табл. 1.

Показатели выбраны на основе экспертного анализа Стратегии [1] с учетом наличия открытых и достоверных данных по этим показателям за несколько лет [2]. Внешние факторы, влияющие на безопасность дорожного движения, учитываются в работе как возмущения (табл. 2). Эти факторы были выбраны на основе анализа результатов опроса участников дорожного движения в крупных городах РФ.

Для рассматриваемых переменных и возмущений строятся дифференциальные уравнения вида

$$(6) \quad \frac{dX(t)}{dt} = X^+(t) - X^-(t).$$

($X^-(t)$, $X^+(t)$ – отрицательные и положительные темпы изменения переменной.)



Рис. 3. Этапы разработки модели.

Допускается мультипликативное представление влияния факторов:

$$(7) \quad X^{\pm}(t) = f(F_1(t), F_2(t), \dots, F_k(t)) = f_1(F_1(t))f_2(F_2(t)) \dots f_k(F_k(t)),$$

где F_1, \dots, F_k – факторы (переменные или внешние воздействия).

В работе допускается, что переменные системы носят количественный характер. Тогда при расчетах могут быть использованы их нормированные значения:

$$(8) \quad X_i^*(t) = \frac{X_i(t)}{X_i^{norm}}, \quad i = 1, \dots, 17,$$

(X_i^{norm} – коэффициент нормировки). Нормирование позволяет избежать несоответствий размерностей различных показателей системы и улучшить

Таблица 1. Основные показатели безопасности дорожно-транспортной системы, количество в год

Переменная	Обозначение
ДТП на автомобильных дорогах общего пользования	$X_1(t)$
ДТП на железнодорожных переездах	$X_2(t)$
ДТП, с места совершения ТС скрылись	$X_3(t)$
ДТП, с места совершения водитель скрылся, ТС на месте	$X_4(t)$
ДТП с неустановленными ТС	$X_5(t)$
ДТП с пострадавшими водителями	$X_6(t)$
ДТП с пострадавшими пассажирами	$X_7(t)$
ДТП с пострадавшими пешеходами	$X_8(t)$
ДТП с участием детей до 18 лет	$X_9(t)$
ДТП в населенных пунктах	$X_{10}(t)$
ДТП с пешеходами в состоянии опьянения	$X_{11}(t)$
ДТП из-за нарушения водителями легковых автомобилей	$X_{12}(t)$
ДТП из-за нарушения водителями 16–18 лет	$X_{13}(t)$
ДТП из-за нарушения водителями-мужчинами	$X_{14}(t)$
ДТП из-за нарушения водителями-женщинами	$X_{15}(t)$

Таблица 2. Возмущения, влияющие на основные показатели безопасности

Внешний фактор	Обозначение
Кол-во транспортных средств старше 10 лет	$G_1(t)$
Степень износа транспортных средств	$G_2(t)$
Количество комплексов фото-видео фиксации нарушений	$G_3(t)$
Количество выданных водительских удостоверений	$G_4(t)$
Протяженность участков дорог	$G_5(t)$
Средний штраф за нарушение ПДД	$G_6(t)$

сопоставимость их величин. Если переменные и возмущения измеряются качественно, то для перехода к количеству может быть использован аппарат теории нечетких множеств.

Для отображения причинно-следственных связей динамики показателей аналогично [15] строится матрица и граф (см. рис. 4).

$$U_{i,j} = \begin{cases} -, & \text{увеличение переменной } X_j \text{ или внешнего фактора } G_j \text{ приводит} \\ & \text{к уменьшению } X_i, \\ 0, & \text{переменная } X_j \text{ или внешний фактор } G_j \text{ не влияют на } X_i, \\ +, & \text{увеличение переменной } X_j \text{ или внешнего фактора } G_j \text{ приводит} \\ & \text{к увеличению } X_i, \\ P_i, & \text{влияние } X_j \text{ на увеличение или уменьшение } X_i \text{ определяется си-} \\ & \text{стемой условий.} \end{cases}$$

На основе анализа текущих данных предметной области были приняты значения $Pr_1 = 1$; $Pr_2 = 1$; $Pr_3 = -1$.

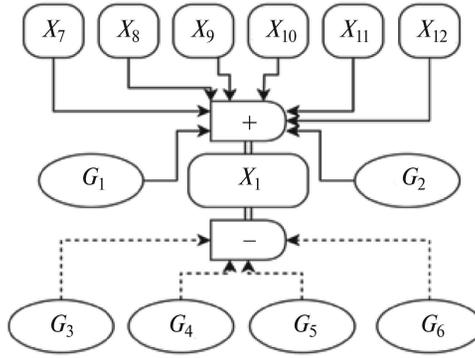


Рис. 4. Подграф для переменной X_1 .

Дуги графа определяют причинно-следственные отношения между переменными. На рис. 4 изображена вершина графа для X_1 .

По матрице и графу причинно-следственных связей строятся уравнения системной динамики:

$$(9) \quad \frac{dX_i}{dt} = \frac{1}{X_i^{norm}} \left(\prod_{i,j} f_{i,j}(X_j^+) \times \sum_m G_m^+ - \prod_{i,k} f_{i,k}(X_k^-) \times \sum_n G_n^- \right).$$

Выражения вида $f_{A,B}(X_B)$ обозначают здесь зависимости X_A от X_B , которые устанавливаются с использованием регрессионного анализа.

Определенные указанным выше способом функциональные зависимости подставляются в (9), задаются начальные условия, и полученная система дифференциальных уравнений решается одним из численных методов, например Рунге–Кутты четвертого порядка точности. Полученные результаты аппроксимируются полиномами небольших степеней. Затем эти полиномы

Таблица 3. Причинно-следственные связи между переменными модели

	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}	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6
X_1	0	0	0	0	0	0	+	+	+	+	+	+	0	+	+	-	P_1	-	-
X_2	0	0	0	+	+	0	0	+	+	0	+	0	0	0	+	-	-	-	-
X_3	0	0	0	0	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	-	0	-
X_4	0	+	0	0	+	0	+	+	+	0	+	0	0	0	+	-	-	-	-
X_5	0	+	0	+	0	0	+	+	0	0	+	0	0	+	+	-	-	-	-
X_6	0	0	+	0	0	0	+	+	+	+	+	0	+	0	0	-	-	0	-
X_7	+	-	0	0	-	0	0	+	0	-	0	0	+	+	0	-	-	-	P_2
X_8	+	0	0	0	0	0	+	0	+	0	+	+	0	+	+	0	-	0	-
X_9	+	-	-	0	0	0	0	0	0	+	+	+	0	+	0	0	0	0	0
X_{10}	+	-	-	0	0	0	+	+	+	0	0	0	+	+	0	-	-	-	-
X_{11}	+	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	+	0	0	P_3	0	-	0	-
X_{12}	+	0	0	0	0	0	+	+	0	0	+	0	0	0	+	0	-	0	0
X_{13}	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	0	+	-	-	-	-

подставляются в подынтегральное выражение (1) и вычисляется значение определенного интеграла, соответствующее плану мероприятий, для которого построена математическая модель (9). Решением задачи является план с наименьшим значением целевой функции.

4. Модельный пример

Для модельного примера использовались статистические данные, приведенные в [2]. Для иллюстрации методики рассмотрим процедуру формирования функций $f_{1,B}(X_B)$ зависимости общего количества ДТП от количества ДТП в связи с различными причинами:

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

На рис. 5 и 6 как пример приведены графики обозначенных зависимостей.

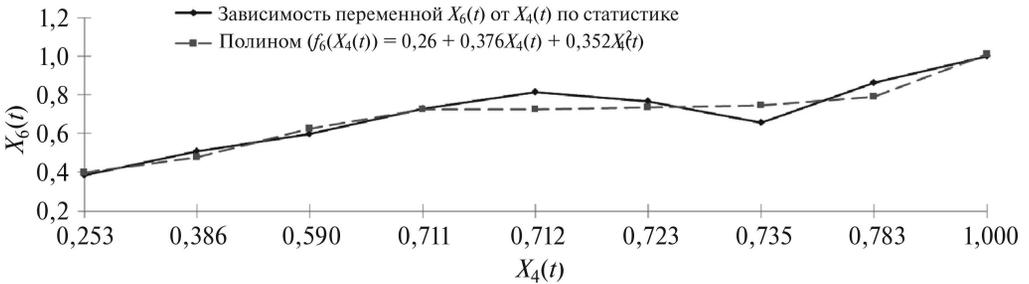


Рис. 5. График зависимости количества ДТП с пострадавшими водителями (показатель X_6) от количества ДТП, с места совершения которых водитель скрылся, а транспортное средство осталось на месте (показатель X_4).

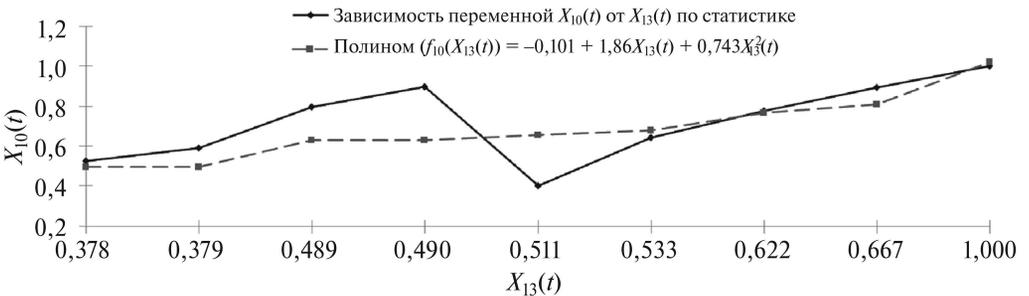


Рис. 6. График зависимости количества ДТП (показатель X_{10}) от количества ДТП из-за нарушения ПДД водителями, возраст которых от 16 до 18 лет (показатель X_9).

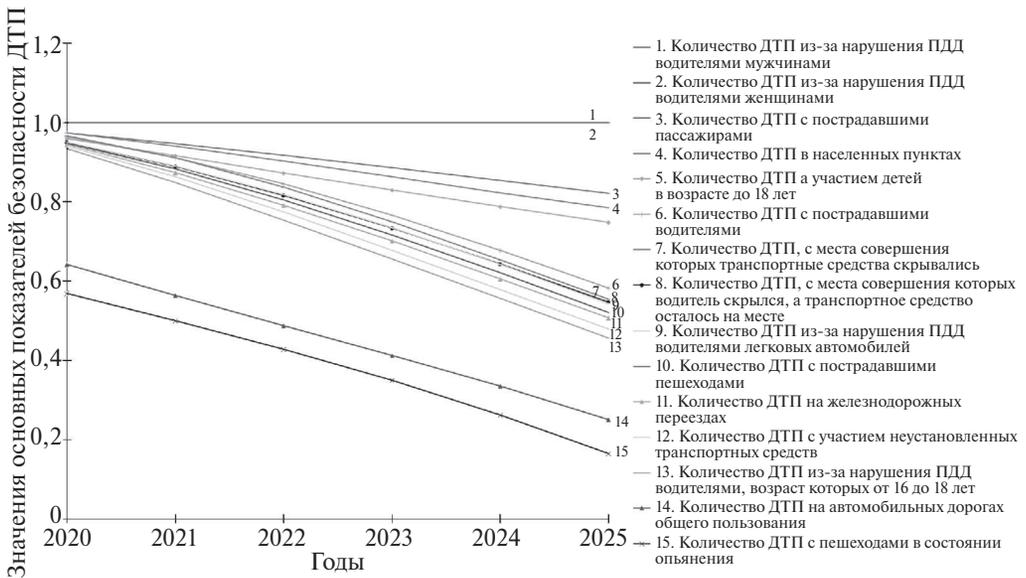


Рис. 7. Результаты решения.

На основе подобным образом выявленных зависимостей построена система нелинейных дифференциальных уравнений, для решения которой использовался метод Рунге–Кутты 4-го порядка точности (входит в состав одной из библиотек языка Python). Решение системы было получено при начальных условиях $X_1 = 0,89$, $X_2 = 1$, $X_3 = 0,86$, $X_4 = 1$, $X_5 = 0,95$, $X_6 = 0,87$, $X_7 = 0,84$, $X_8 = 1$, $X_9 = 0,86$, $X_{10} = 0,95$, $X_{11} = 1$, $X_{12} = 0,95$, $X_{13} = 0,62$. Результаты решения в виде графиков приведены на рис. 7 и аппроксимированы полиномами (12).

$$\begin{aligned}
 X_1(t) &= -0,00072t^2 - 0,0728t + 0,7135, \\
 X_2(t) &= -0,0035t^2 - 0,0638t + 1,0128, \\
 X_3(t) &= -0,0054t^2 - 0,0456t + 1,0198, \\
 X_4(t) &= -0,0044t^2 - 0,0503t + 1,0058, \\
 X_5(t) &= -0,0027t^2 - 0,0743t + 1,0198, \\
 X_6(t) &= -0,0054t^2 - 0,0385t + 1,0081, \\
 X_7(t) &= -0,0006t^2 - 0,0267t + 1,0017, \\
 X_8(t) &= -0,0043t^2 - 0,056t + 1,0097, \\
 X_9(t) &= 0,0004t^2 - 0,045t + 1,0041, \\
 X_{10}(t) &= -0,0006t^2 - 0,0338t + 1,0092, \\
 X_{11}(t) &= -0,0036t^2 - 0,0555t + 0,6269, \\
 X_{12}(t) &= -0,0052t^2 - 0,0469t + 1,0035, \\
 X_{13}(t) &= -0,0017t^2 - 0,0846t + 1,0217.
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

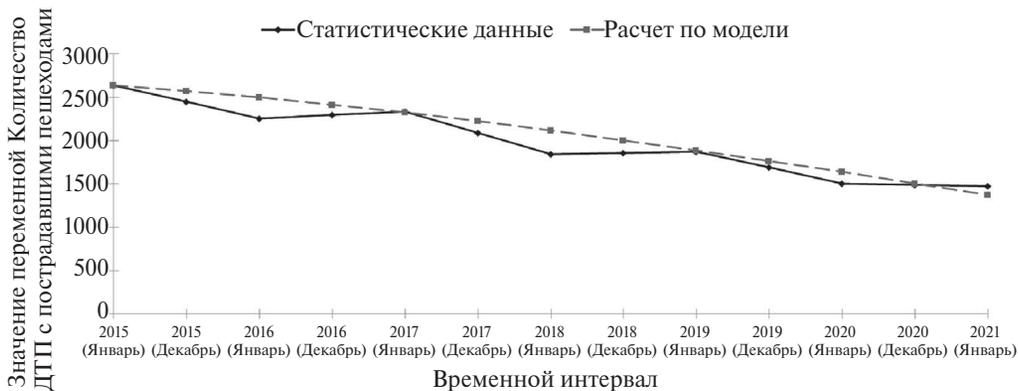


Рис. 8. Сравнение статистических и расчетных данных для показателей безопасности $X_8(t)$ и $X_{12}(t)$.

Полученные результаты достаточно хорошо коррелируют со статистическими данными, приведенными на сайте Госавтоинспекции МВД России [2]. Плавный характер графиков может быть объяснен тем, что Стратегия [1] предусматривала равномерное снижение значений этих показателей.

4.1. Коррекция модели

При разработке математической модели крупномасштабной системы необходимо выполнить ряд противоречивых требований. Во-первых, следует учесть высокую размерность объекта моделирования, наличие сложной системы взаимосвязей между его параметрами, а также их возможный значительный временной дрейф. Во-вторых, следует обеспечить требуемую точность модели особенно на длительных интервалах времени, а также сохранить приемлемую продолжительность ее разработки. Выполнение этих требований заставляет упрощать математическое описание крупномасштабной системы, что приводит к уменьшению трудоемкости, времени и точности создаваемой модели и делает необходимым проведение ее периодической коррекции. Коррекция математической модели проводится путем изменения спис-

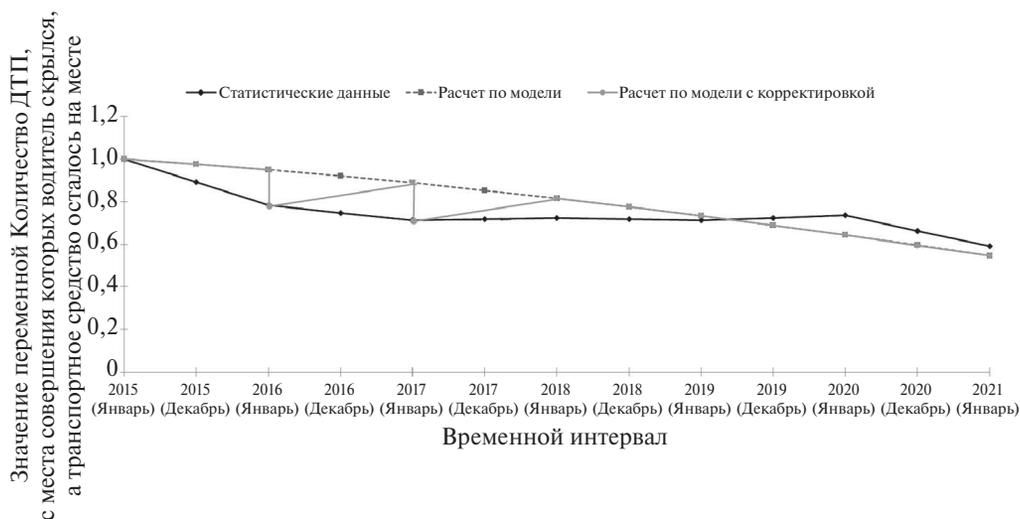


Рис. 9. Коррекция для переменной $X_4(t)$.

ка причинно-следственных связей показателей и факторов, добавления новых показателей с целью увеличения точности моделирования. При решении задачи (1)–(3) предусмотрена коррекция модели, если ошибка определения по крайней мере одного из основных показателей $X_i(t)$, $i = \overline{1, 15}$, превышает 10%. Данная величина выбрана в результате обобщения мнения специалистов, ответственных за обеспечение транспортной безопасности города, и разработчиков модели системной динамики; при необходимости величина допустимой ошибки может быть изменена. Рассмотрим в качестве примера процедуру коррекции расчетного значения переменной X_4 , для чего воспользуемся статистическими данными по изменению этой величины в 2004–2020 гг. [2].

На рис. 9 видно, что с января 2004 г. по июнь 2005 г. коррекция не делалась, а далее – была проведена (ломаная линия).

4.2. Процедура решения задачи для модельного примера

Не снижая общности рассуждений, допустим, что множество альтернативных планов P , которые разработал ЛПР для решения задачи (1)–(3), состоит из трех элементов p_1, p_2, p_3 . В соответствии с постановкой задачи (1)–(3) для ее решения необходимо определить такой план мероприятий p_i , $i = \overline{1, 3}$, которому соответствует минимальное значение целевой функции $Z(p(t))$. Кроме того, этот план должен удовлетворять условию (3), в соответствии с которым основные показатели не должны выходить за заданные для них границы. Границы определяются для каждого показателя отдельно, их значения основаны на опыте и современных требованиях по безопасности движения. Эти границы на рис. 10 и 11 отмечены штрихпунктирной линией. На рис. 10 видно, что в 2023 г. для плана p_2 значения всех показателей находятся в допустимой области. Однако в 2024 г., как следует из рис. 11, показатель X_7 при реали-

Основные показатели ДТП Москвы в 2023 г.



Рис. 10. Изменения основных показателей безопасности Москвы в 2023 г.

Основные показатели ДТП Москвы в 2024 г.

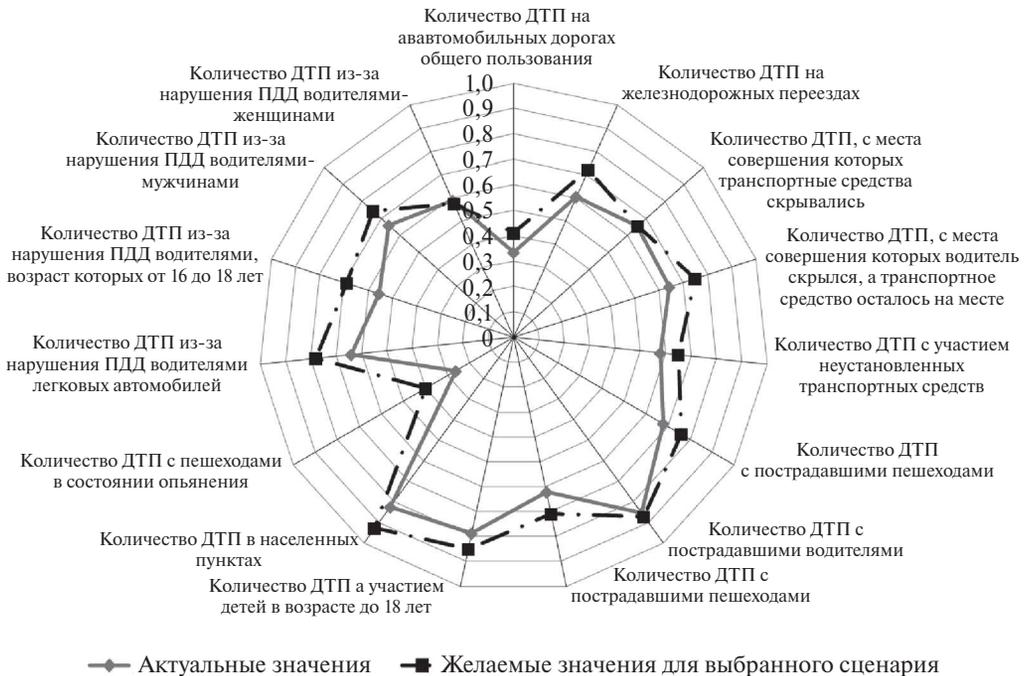


Рис. 11. Изменения основных показателей безопасности Москвы в 2024 г.

зации p_2 выйдет за допустимые пределы. Поэтому такой план исключается из дальнейшего рассмотрения.

Решим задачу (1)–(3) на множестве управляющих воздействий, состоящем из двух оставшихся планов p_1 и p_3 . Получим значение $Z(p_1(t)) = 1,6031$. Аналогично определим $Z(p_3(t)) = 1,8573$. Так как $Z(p_1(t)) < Z(p_3(t))$, то решением задачи является план p_1 .

5. Заключение

В статье формулируется постановка задачи управления дорожно-транспортной системой мегаполиса по критерию безопасности. Предложена математическая модель динамики основных показателей безопасности дорожно-транспортного движения мегаполиса. Разработана процедура решения задачи, проиллюстрированная модельным примером. В примере показано построение системы нелинейных дифференциальных уравнений. Решение этой системы дает возможность смоделировать динамику рассматриваемых показателей на требуемых интервалах времени. Предложена процедура коррекции математической модели при определенном увеличении ошибки прогнозирования. Результаты решения проверены с использованием статистики показателей безопасности дорожно-транспортного движения г. Москвы [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 08.01.2018 N 1-р «Об утверждении Стратегии безопасности дорожного движения в Российской Федерации на 2018–2024 годы». [Электронный ресурс]: <http://static.government.ru> HYPERLINK "http://static.government.ru"
2. Сайт Госавтоинспекции МВД России, сведения о показателях состояния безопасности дорожного движения. [Электронный ресурс]: <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 24.03.2023).
3. *Yannis G., Weijermars W., Gitelman V., et al.* Road safety performance indicators for the interurban road network // Accident; Anal. Prevent. 2013. V. 60. P. 384–395.
4. *Salmon P.M., Read G.J.M., Thompson J., et al.* Computational modelling and systems ergonomics: a system dynamics model of drink driving-related trauma prevention // Ergonomics. 2020. V. 63(8). P. 965–980.
5. *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. No. 6. С. 32–43.
6. *Guo Q., Xu P., Pei X., et al.* The effect of road network patterns on pedestrian safety: A zone-based Bayesian spatial modeling approach // Accident; Anal. Prevent. 2017. V. 99(Pt A). P. 114–124.
7. *Dell'Acqua G., Luca M.D., Mauro R.* Road Safety Knowledge-Based Decision Support System // Proced. Soc. Behavior. Sci. 2011. V. 20. P. 973–983.
8. *Gettman D.M., Head L.* Surrogate Safety Measures from Traffic Simulation Models // Transport. Res. Record. 2003. V. 1840. P. 104–115.

9. *Баканов К.С., Ляхов П.В., Айсанов А.С. и др.* Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации за 6 месяцев 2022 года. М.: Научный центр безопасности дорожного движения МВД РФ, 2022.
10. *Forrester J.* Principles of systems. Cambridge: Wright Allen Press, 1960.
11. *Burkov V.N., Loginovskiy O.V., Dranko O.I., Hollay A.V.* The mechanisms of smart management for industrial enterprises // Appl. Math. Control Sci. 2020. No. 1. P. 59–73.
12. *Khamutova M.V., Kushnikov V.A., Dranko O.I.* A mathematical model for choosing an action plan for the prevention and elimination of flood effects // IFAC-PapersOnLine. 2022. T. 55. No. 3. P. 113–118.
13. *Tsvirkun A.D., Rezchikov A.F., Kushnikov V.A., et al.* Models and methods for verifying the accessibility and feasibility of goals and plans in large-scale systems by example for the elimination of consequences floods // Autom. Remote Control. 2023. No. 12. P. 49–63.
14. *Rezchikov A.F., Kushnikov V.A., Ivaschenko V.A., et al.* Controlling the welding process in robotic technological complexes by the criterion of product quality // Mechatronics, Automation, Control. 2019. T. 20. No. 1. P. 29–33.
15. *Поляков М.С., Кушников В.А., Богомолов А.С., Резчиков А.Ф.* Модели системной динамики для анализа характеристик дорожно-транспортной системы России // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023) : Тр. 16-й междунар. конф. Москва, Россия, 2023. С. 1002–1012.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Галяевым.

Поступила в редакцию 27.05.2024

После доработки 06.07.2024

Принята к публикации 25.07.2024