

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ В УСЛОВИЯХ ИНЦИДЕНТОВ НА УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ

И.В. УРБАНОВИЧ¹, д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ², А.В. КОРЖОВА³

Г.М. КУХАРЕНКО¹, Д.В. МОЗАЛЕВСКИЙ³

(¹Белорусский национальный технический университет, Минск;

²Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой;

³Филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт», Минск)

Статья посвящена актуальной проблеме снижения негативных последствий от инцидентов на улично-дорожной сети городов. Рассмотрена проблема прогнозирования перераспределения транспортных потоков, возникающая вследствие непредвиденных блокировок движения. Целью исследования является разработка программного комплекса, способного в режиме, близком к реальному времени, моделировать развитие дорожной ситуации и предоставлять прогноз для принятия оперативных управленческих решений. Для достижения поставленной цели был проведен анализ существующих подходов к моделированию транспортного спроса, на основе которого был выбран метод динамического неравновесного распределения как наиболее адекватно описывающий поведение водителей в условиях инцидентов. В качестве инструментальной платформы использована среда имитационного микромоделирования SUMO. Разработана и откалибрована имитационная модель репрезентативного участка УДС г. Минска, погрешность которой по интенсивности движения на ключевых пересечениях не превысила 5%. Создан программный комплекс, состоящий из модуля управления имитационной моделью (на языке Python с использованием API TraCI) и модуля графического интерфейса пользователя (на базе библиотеки PyQt5). Экспериментальное исследование показало, что применение разработанного комплекса для прогнозирования и превентивного изменения режимов светофорного регулирования позволяет снизить средние задержки транспорта в зоне инцидента на 21%. Расчетный годовой экономический эффект от внедрения предлагаемого решения составил около 31 тыс. у.е. при сроке окупаемости капитальных вложений в 1,85 года.

Ключевые слова: транспортное моделирование, перераспределение транспортных потоков, транспортный инцидент, имитационная модель, SUMO, прогнозирование, интеллектуальные транспортные системы, оптимизация трафика.

Введение. Современные города сталкиваются с постоянно растущим уровнем автомобилизации, что неизбежно приводит к перегрузке улично-дорожной сети (УДС) и возникновению заторов [1–3]. Наиболее острые и масштабные транспортные проблемы возникают не в результате регулярных суточных колебаний спроса, а вследствие непредвиденных событий – инцидентов [4–6]. К таким инцидентам относятся дорожно-транспортные происшествия (ДТП), поломки транспортных средств, временные перекрытия полос для проведения дорожных работ и другие события, нарушающие нормальный режим движения [7–11].

Возникновение инцидента провоцирует цепную реакцию: локальное снижение пропускной способности вызывает резкое увеличение задержек, что заставляет водителей искать альтернативные маршруты [8; 9; 12]. Этот стихийный процесс перераспределения потоков часто приводит к каскадному распространению затора на соседние улицы, вызывая эффект «взаимоблокировки перекрестков» и коллапс на значительной части городской сети [1; 2; 8; 13]. Последствия таких событий носят комплексный характер: это прямые экономические потери из-за увеличения времени в пути и расхода топлива, ухудшение экологической обстановки, а также значительные социальные издержки [15].

В этих условиях ключевую роль приобретают системы оперативного управления дорожным движением, являющиеся частью интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Однако их эффективность напрямую зависит от способности не только реагировать на уже случившееся событие, но и прогнозировать его развитие. Возможность получить краткосрочный (до нескольких часов) прогноз перераспределения потоков позволяет дорожным службам принимать превентивные меры: заблаговременно изменять планы координации светофоров, выводить информацию для водителей на динамические табло, корректировать маршруты общественного транспорта.

Одним из наиболее эффективных инструментов для решения задачи прогнозирования является имитационное моделирование. Создание программных комплексов, базирующихся на адекватных транспортных моделях, дает возможность в режиме, близком к реальному времени, «проигрывать» сценарии развития инцидентов и оценивать эффективность различных управляющих воздействий.

Целью данной работы является разработка и апробация программного комплекса для оперативного прогнозирования перераспределения транспортных потоков на УДС, вызванного возникновением инцидента. Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Проанализировать существующие подходы к моделированию распределения транспортных потоков и выбрать наиболее подходящий для описания ситуаций с инцидентами.
2. Выбрать инструментальные средства для построения имитационной модели и разработки программного обеспечения.
3. Создать, откалибровать и верифицировать имитационную модель репрезентативного участка УДС г. Минска.
4. Разработать архитектуру и реализовать программный комплекс, включающий модули управления моделью и графического интерфейса.
5. Провести вычислительные эксперименты для оценки результативности и экономической эффективности предлагаемого решения.

Основная часть. *Анализ подходов к моделированию и выбор методологии.* Процесс распределения транспортных средств по маршрутам в сети описывается четырехстадийной моделью транспортного спроса^{1,2} [14]. Ключевым этапом в контексте нашей задачи является последний – распределение корреспонденций по конкретным маршрутам. Существующие подходы можно классифицировать по двум признакам: статическое или динамическое распределение и равновесный или неравновесный подход.

Статическое распределение предполагает, что маршруты для всех пар «источник–назначение» рассчитываются один раз до начала моделирования и не меняются во времени. Динамическое распределение учитывает изменение дорожной ситуации и позволяет пересчитывать маршруты в ходе симуляции.

Согласно равновесному подходу, основанному на принципах пользовательского равновесия Уордропа (Wardrop), в состоянии равновесия время в пути на всех используемых маршрутах между одной и той же парой «источник–назначение» одинаково и минимально. Неравновесный подход описывает ситуацию, когда водители не обладают полной информацией о сети или реагируют на внезапные изменения, выбирая маршруты, которые не обязательно приводят систему в состояние равновесия.

В штатных условиях дорожное движение стремится к состоянию, близкому к равновесному. Однако при возникновении инцидента ситуация кардинально меняется. Водители, столкнувшись с непредвиденной задержкой, начинают активно менять маршруты, основываясь на сиюминутной информации, собственном опыте или указаниях навигационных систем. Этот процесс является динамическим и по своей природе неравновесным. Следовательно, для адекватного моделирования последствий инцидентов наиболее подходящим является динамическое распределение на основе неравновесного подхода. Данный подход позволяет моделировать отклонение транспортных средств от их привычных маршрутов в ответ на внешние (информация на табло) или внутренние (превышение порога задержки) раздражители.

Разработка и калибровка имитационной модели. В качестве объекта исследования был выбран репрезентативный участок УДС в центральной части г. Минска, включающий фрагменты Советского, Первомайского и Партизанского районов. Участок ограничен магистральными улицами (пр-т Независимости, ул. Сурганова, ул. Козлова, пр-т Машерова и др.), характеризуется высокой интенсивностью движения, наличием 49 светофорных объектов и множеством альтернативных маршрутов, что делает его сложным для аналитического прогнозирования.

Для реализации модели был выбран программный пакет микромоделирования Eclipse SUMO (Simulation of Urban MObility). Ключевыми преимуществами SUMO являются: открытый исходный код, высокая производительность, поддержка микроскопического моделирования (каждое транспортное средство является отдельным объектом), а также наличие мощного API – TraCI (Traffic Control Interface), позволяющего управлять симуляцией в режиме «онлайн» из внешних приложений.

Процесс создания модели включал несколько этапов:

1. Создание транспортной сети: на основе картографических данных была построена граф-модель участка УДС, включающая все дороги, перекрестки, полосы движения и светофорные объекты с их актуальными фазовыми диаграммами.
2. Оценка транспортного спроса: поскольку готовая матрица корреспонденций для исследуемого участка отсутствовала, был проведен сбор натурных данных об интенсивностях на всех входах и выходах участка. На основе этих данных с использованием гравитационной модели была восстановлена матрица «источник–назначение». Расчет объема корреспонденций (q_{ij}) между входом i и выходом j производился по формуле

$$q_{ij} = A_i B_j (o_i * d_j) / (e^{l * \gamma}),$$

где o_i , d_j – объемы транспортного спроса на i -м входе и j -м выходе; l – длина кратчайшего маршрута; γ – параметр модели, отражающий чувствительность к длине маршрута; A_i , B_j – балансировочные коэффициенты (находятся с помощью процедуры балансировки).

¹ U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Traffic Analysis Toolbox Volume XIV: Guidebook on the Utilization of Dynamic Traffic Assignment in Modeling.

² U.S. BUREAU OF PUBLIC ROADS, EDITOR. Traffic Assignment Manual. – U.S. Department of Commerce, Washington, D.C., 1964.

3. Калибровка и валидация модели: калибровка модели производилась путем подстройки параметра γ для достижения максимального соответствия модельных и реальных интенсивностей. Валидация проводилась путем сравнения суммарных интенсивностей движения по всем полосам на двух ключевых перекрестках: пр. Независимости – ул. Сурганова и ул. Якуба Колоса – ул. Сурганова. Сравнение показало, что относительная погрешность модельных данных по отношению к реальным не превышает 5%, что позволяет сделать вывод об адекватности созданной модели реальной дорожной ситуации.

Структура и реализация программного комплекса. Разработанный программный комплекс имеет модульную структуру, обеспечивающую гибкость и возможность дальнейшего расширения. Он состоит из трех основных компонентов (рисунок 1):

1. Имитационная модель SUMO: ядро системы, выполняющее микроскопическое моделирование движения транспортных потоков.
2. Программный модуль управления моделью: внешнее приложение, написанное на языке программирования Python, которое взаимодействует с моделью SUMO через API TraCI.
3. Программный модуль графического интерфейса (GUI): оконное приложение для пользователя (диспетчера), реализованное с использованием библиотеки PyQt5.



Рисунок 1. – Общая структура программного комплекса

Модуль управления реализует ключевую логику работы комплекса и включает два подмодуля:

- подмодуль создания инцидента позволяет пользователю через GUI указать географические координаты инцидента. Модуль находит ближайшую полосу движения и останавливает на ней транспортное средство (существующее или вновь созданное), тем самым симулируя блокировку;
- подмодуль перемаршрутизации реализует неравновесный подход к распределению. С заданным временным интервалом (например, 60 с) модуль запрашивает у SUMO данные о времени простоя для каждой полосы движения. Для снижения вычислительной нагрузки и сглаживания случайных всплесков рассчитывается медианное значение времени простоя за последние 30 измерений. Если медианное значение на какой-либо полосе превышает заданные пользователем пороговые значения (например, 300, 400, 600 с), эта полоса попадает в список проблемных. Затем для транспортных средств, находящихся на этих полосах, запускается процесс перемаршрутизации. Учитывая, что не все водители меняют маршрут одновременно, в GUI предусмотрена возможность задать процент водителей, которые примут решение о смене маршрута при достижении каждого из порогов.

GUI обеспечивает интуитивно понятное взаимодействие диспетчера с системой. Оно позволяет загрузить модель, задать параметры инцидента и порогов перемаршрутизации, запустить симуляцию и визуализировать результаты. Для наглядного представления проблемных зон на карте SUMO полосы, где время простоя превышает пороговые значения, подсвечиваются красным цветом. Разработанный комплекс на типовом компьютере способен смоделировать ситуацию на два часа вперед за пять минут реального времени, что соответствует требованиям оперативного прогнозирования.

Оценка экономической эффективности. Для оценки эффективности разработанного комплекса было проведено моделирование двух сценариев на временном отрезке 1,5 ч (нормативное время ликвидации последствий ДТП).

- сценарий 1 (существующая ситуация): моделируется инцидент с блокировкой одной полосы на оживленном участке. Управление светофорами остается в штатном режиме;
- сценарий 2 (предлагаемая ситуация): моделируется тот же инцидент, но предполагается, что на основе прогноза, полученного от комплекса, через 10 мин после начала инцидента на нескольких ключевых перекрестках активируются заранее разработанные специальные диаграммы светофорного регулирования, направленные на минимизацию заторов.

По результатам 15 прогонов для каждого сценария были определены общие часовые задержки транспорта. Расчеты показали, что *средняя задержка в существующей ситуации составляет 1516 авт.-ч, в то время как в предлагаемой – 1204 авт.-ч.* Таким образом, прогнозирование и превентивное управление позволяют *снизить задержки транспорта на 21%*. Экономический эффект и короткий срок окупаемости подтверждают целесообразность внедрения подобных систем прогнозирования.

Разработан подмодуль графического интерфейса для предоставления результатов моделирования пользователю в простом виде.



Рисунок 2. – Графическое представление результатов моделирования

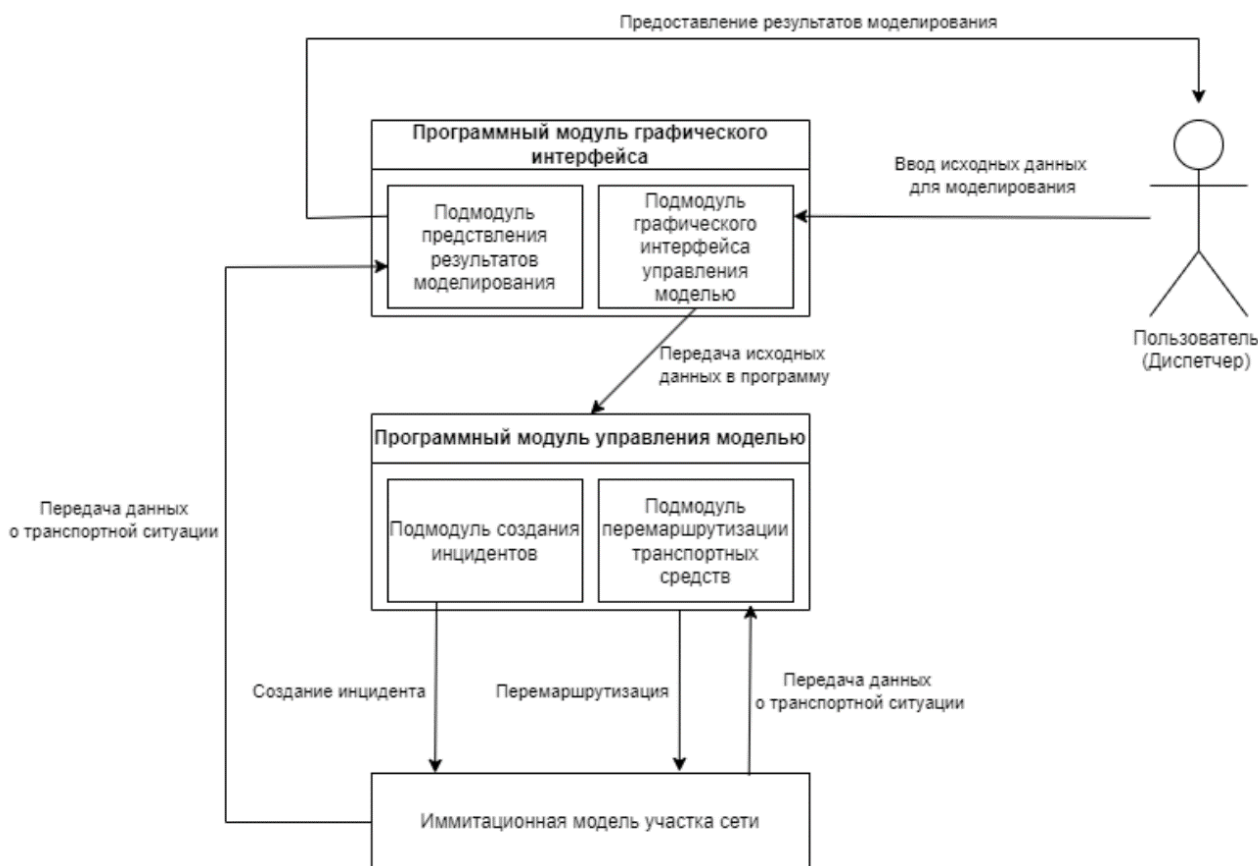


Рисунок 3. – Принципиальная схема работы программного комплекса

В качестве отправного был использован графический интерфейс, предоставляемый пакетом SUMO (sumogui). В разрабатываемом подмодуле предусмотрено предоставление пользователю информации о превышении времени простоя пороговых значений в виде изменения цвета соответствующих полос на красный и отображение красных кругов в месте их локализации (см. рисунок 2). Такое представление облегчает пользователю эффективно локализовать проблемные участки и соответственно своевременно принимать управляющие решения.

В ходе разработки программного продукта, была создана имитационная модель выбранного участка реальной сети города. Верификация модели показала, что отклонения от реальных значений на выбранных пересечениях не превышает 5%. Разработаны программные модули управления моделью и графического интерфейса. Разработанный программный комплекс на типовом компьютере способен смоделировать ситуацию на 2 ч вперед за 5 мин. Принципиальная схема работы – см. рисунок 3.

Заключение. В ходе выполненного исследования была решена важная научно-практическая задача разработки программного комплекса для оперативного прогнозирования последствий транспортных инцидентов. На основе анализа существующих методологий был обоснован выбор динамического неравновесного подхода к моделированию, который наиболее реалистично отражает поведение участников дорожного движения в нестандартных ситуациях. Созданная и верифицированная имитационная микромодель участка УДС г. Минска в среде SUMO продемонстрировала высокую адекватность (погрешность < 5%), что позволяет использовать ее в качестве надежного инструмента для прогнозирования. Разработанный программный комплекс с интуитивно понятным графическим интерфейсом обеспечивает высокую производительность, позволяя получить прогноз развития ситуации на 2 часа вперед в течение 5 мин, что критически важно для принятия оперативных решений. Результаты вычислительных экспериментов показали, что использование прогнозов для превентивного управления светофорными объектами способно снизить общие транспортные задержки в зоне влияния инцидента на 21%. Расчеты подтвердили высокую экономическую эффективность предлагаемого решения, с годовым экономическим эффектом более 31 тыс. у.е. и сроком окупаемости менее двух лет.

Таким образом, разработанный программный продукт является действенным инструментом для повышения эффективности работы центров управления дорожным движением и снижения негативных последствий от транспортных инцидентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капский Д.В. Анализ существующих подходов к прогнозированию аварийности в дорожном движении / Вестник Белорусского национального технического университета. – 2008. – № 5. – С. 58–63. EDN TQIFBY
2. Капский Д.В. Методология повышения безопасности движения в городских очагах аварийности: принципы и способы // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 3, № 3(57). – С. 59–65. EDN XRJLEF
3. Капский Д.В. Повышение качества дорожного движения в очагах аварийности // Наука и техника. – 2015. – № 3. – С. 36–43. EDN VBQRIL
4. Лагереv Р.Ю., Капский Д.В. Снижение вероятности образования транспортных заторов на дорогах высших категорий управлением доступом к сети // Наука и техника. – 2016. – Т. 15, № 1. – С. 52–60. EDN VQBMWH
5. Оценка эффективности движения транспортных потоков на основе обработки навигационных данных о движении транспортных средств / Д.В. Капский, В.В. Касьяник, А.В. Евтух и др. // Наука и техника. – 2017. – Т. 16, № 5. – С. 444–454. DOI 10.21122/2227-1031-2017-16-5-444-454. EDN XQGIER
6. Капский Д.В., Навой Д.В. Развитие автоматизированной системы управления дорожным движением Минска как части интеллектуальной транспортной системы города // Наука и техника. – 2017. – Т. 16, № 1. – С. 38–47. DOI 10.21122/2227-1031-2017-16-1-38-48. EDN YMFDXR
7. Капский Д.В., Навой Д.В., Пегин П.А. Управление в интеллектуальной транспортной системе г. Минска // Наука и техника. – 2018. – Т. 17, № 5. – С. 401–412. DOI 10.21122/2227-1031-2018-17-5-401-412. EDN YOLTLI
8. Капский Д.В., Шуть В.Н., Пегин П.А. Графовая модель конфликтного взаимодействия транспортных средств на различных перекрестках // Наука и техника. – 2018. – Т. 17, № 3. – С. 246–254. DOI 10.21122/2227-1031-2018-17-3-246-254. EDN YOFSEV
9. Капский Д.В., Навой Д.В., Пегин П.А. Разработка модели транспортных потоков на улично-дорожной сети города // Наука и техника. – 2019. – Т. 18, № 1. – С. 47–54. DOI 10.21122/2227-1031-2019-18-1-47-54. EDN YZFJET
10. Estimating parameters for traffic flow using navigation data on vehicles / M. Burinskienė, D. Kapski, V. Kasyanik et al. // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. – 2020. – Vol. 15, No. 4. – P. 1–21. DOI 10.7250/bjrbe.2020-15.492. EDN HJJOQX
11. Зедгенизов А.В., Капский Д.В., Лагереv Р.Ю. Оценка влияния объектов капитального строительства на прилегающую улично-дорожную сеть при организации дорожного движения посредством регулируемых пересечений // Наука и техника. – 2021. – Т. 20, № 6. – С. 506–513. DOI 10.21122/2227-1031-2021-20-6-506-513. EDN DIPKOD
12. Метод определения достаточности сети автомобильных дорог региона / П.А. Пегин, Д.В. Капский, А.А. Ильин и др. // Наука и техника. – 2023. – Т. 22, № 4. – С. 301–307. DOI 10.21122/2227-1031-2023-22-4-301-307. EDN ZDDAHQ
13. Бульгичева Н.В., Капский Д.В., Лосин Л.А. Исследование влияния параметров транспортной модели на результаты расчетов пассажиропотоков (на примере Санкт-Петербурга) // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-матэматычных навук. – 2023. – Т. 59, № 3. – С. 253–264. DOI 10.29235/1561-2430-2023-59-3-253-264. EDN QLMSR

14. Wardrop J. G., Whitehead J. I. Correspondence. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. – 1952. – № 1(5). – P. 767–768.
15. Врубель Ю.А., Капский Д.В., Кот Е.Н. Определение потерь в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.

Поступила 30.03.2026

FORECASTING THE REDISTRIBUTION OF TRAFFIC FLOWS UNDER INCIDENT CONDITIONS ON AN URBAN ROAD NETWORK

*I. URBANOVICH¹, V. IVANOV², A. KORZOVA³,
G. KUCHARONAK¹, D. MOZALEVSKI³*

(¹Belarusian National Technical University, Minsk;

²Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk;

³Branch of BNTU "Research Polytechnic Institute", Minsk)

The article is devoted to the urgent problem of reducing the negative consequences of incidents on the urban road network. The problem of forecasting the redistribution of traffic flows arising from unforeseen traffic blockages is considered. The aim of the research is to develop a software package capable of simulating the development of the traffic situation in near-real-time and providing a forecast for making operational management decisions. To achieve this goal, an analysis of existing approaches to traffic demand modeling was carried out, based on which the method of dynamic non-equilibrium assignment was chosen as the one that most adequately describes driver behavior under incident conditions. The SUMO simulation micro-modeling environment was used as an instrumental platform. A simulation model of a representative section of the Minsk road network was developed and calibrated, with an error in traffic intensity at key intersections not exceeding 5%. A software package was created, consisting of a simulation model control module (in Python using the TraCI API) and a graphical user interface module (based on the PyQt5 library). An experimental study showed that using the developed package for forecasting and preventive changes in traffic signal control modes can reduce average transport delays in the incident zone by 21%. The estimated annual economic effect from the implementation of the proposed solution is 31,283 conventional units, with a payback period for capital investments of 1.85 years.

Keywords: *traffic modeling, traffic flow redistribution, traffic incident, simulation model, SUMO, forecasting, intelligent transport systems, traffic optimization.*