

М. П. РУДЬ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автомобілів та технологій їх експлуатації
Черкаський державний технологічний університет
ORCID: 0000-0002-8936-6812

І. А. ШЛЬОНЧАК

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автомобілів та технологій їх експлуатації
Черкаський державний технологічний університет
ORCID: 0000-0002-5096-2414

ОЦІНЮВАННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ПЕРЕХРЕСТЯ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ МЕТОДОМ ТРАНСПОРТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У статті проаналізовано пропускну здатність перехрестя для різних сценаріїв, які можуть виникати в транспортній системі внаслідок надзвичайних ситуацій в умовах воєнного стану в Україні. Для цього було використано програмне забезпечення для транспортного мікромоделювання PTV Vissim. Дослідження здійснено на прикладі перехрестя магістральних вулиць з пожежовивільним рухом в обласному центрі країни, яке поєднує транспортні потоки з різних районів міста, в'їзні і виїзні потоки з нього.

Перехрестя відіграють вирішальну роль для ефективності, зручності, безпечності, екологічності вулично-дорожньої мережі міста, оскільки вони служать точками зустрічі, де перетинаються багато маршрутів громадських, комерційних та приватних транспортних засобів. Вони є життєво важливими компонентами транспортної інфраструктури та полегшують рух моторних транспортних засобів, пішоходів і велосипедистів містом і в той же час можуть бути причиною збільшення кількості заторів та аварійних ситуацій у випадку неправильної їх організації. Зі збільшенням кількості надзвичайних подій, викликаних як атаками агресора на об'єкти критичної інфраструктури, так і безпосередньо в результаті бойових дій в нашій країні, надзвичайно важливо зрозуміти, як ці події впливають на транспортні потоки на перехрестях. У цьому дослідженні пропонується використовувати методи імітаційного моделювання транспортних потоків для прогнозування різних сценаріїв надзвичайних ситуацій та оцінювання їх впливу на пропускну здатність перехрестя.

Для досягнення мети роботи проведено моделювання трьох сценаріїв роботи перехрестя: робота в існуючих умовах в нормальному режимі у період максимального завантаження (ранкову годину «пік»); робота в тих же початкових умовах, але з вимкненим світлофорним регулюванням; режим евакуації зі збільшеним потоком транспорту в напрямку виїзду з міста з відсутнім громадським транспортом. Це моделювання дозволило оцінити вплив цих сценаріїв на параметри дорожнього руху, розробити рекомендації для підвищення загальної готовності до реагування на надзвичайні ситуації і визначити напрямки подальших досліджень.

Ключові слова: транспортна система, імітаційне моделювання, система імітаційного моделювання транспортного руху, пропускну здатність перехрестя, надзвичайна ситуація.

M. P. RUD

Ph.D., Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automobiles
and Technologies of their Operating
Cherkasy State Technological University
ORCID: 0000-0002-8936-6812

I. A. SHLONCHAK

Ph.D., Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automobiles
and Technologies of their Operating
Cherkasy State Technological University
ORCID: 0000-0002-8936-6812

ASSESSMENT OF INTERSECTION CAPACITY UNDER EMERGENCY SITUATIONS USING THE TRANSPORT MODELING METHOD

The article analyzes the capacity of the intersection for different scenarios that may arise in the transport system due to emergencies under martial law in Ukraine. For this, the PTV Vissim transport microsimulation software was used.

The study was carried out on the example of the intersection of main streets with busy traffic in the regional center of the country, which combines traffic flows from different parts of the city, incoming and outgoing flows from it.

Intersections play a critical role in the efficiency, convenience, safety, and sustainability of a city's road network, as they serve as meeting points where many public, commercial, and private vehicle routes intersect. They are vital components of the transport infrastructure and facilitate the movement of motor vehicles, pedestrians and cyclists around the city and at the same time can cause more traffic jams and accidents if not properly organized. With an increase in the number of emergency events caused both by aggressor attacks on critical infrastructure facilities and directly as a result of hostilities in our country, it is extremely important to understand how these events affect traffic flows at intersections. This study proposes to use traffic simulation methods to predict various emergency scenarios and assess their impact on the capacity of the intersection.

To achieve the goal of the work, modeling of three scenarios for the operation of the intersection was carried out: work under existing conditions in normal mode during the period of maximum load (morning rush hour); work under the same initial conditions, but with the traffic light control turned off; an evacuation mode with an increased flow of traffic in the direction of leaving the city with no public transport. This simulation allowed the impact of these scenarios on traffic parameters to be assessed, recommendations to improve overall emergency preparedness and directions for further research to be developed.

Key words: transport system, simulation modeling, traffic simulation system, crossroads capacity, emergency.

Постановка проблеми

Повномасштабна збройна агресія російської федерації вплинула на різні аспекти повсякденного життя в Україні, зокрема транспорт і організацію дорожнього руху в містах. З 24.02.2022 року в країні оголошено воєнний стан – надзвичайний стан, який характеризується тимчасовим припиненням звичайних громадянських прав, що дозволяє посилити військовий і урядовий контроль [1]. Розуміння впливу надзвичайних ситуацій [2], що можуть виникати під час воєнного стану на пропускну здатність вулично-дорожньої мережі має важливе значення для розробки ефективних стратегій контролю дорожнього руху та забезпечення безперебійного руху людей, товарів і екстрених служб у цей критичний період.

Найважливішим чинником, який впливає на пропускну здатність вулично-дорожньої мережі сучасного міста є організація дорожнього руху на перехрестях, особливо магістральних вулиць загальноміського та районного значення. Перехрестя є критичними точками, де перетинаються транспортні потоки, і розуміння їх пропускну здатності має важливе значення для розробки ефективних стратегій управління дорожнім рухом, зменшення заторів і підвищення загальної безпеки дорожнього руху. Дослідження пропускну здатності перехресть є обов'язковим етапом в розробці інтелектуальних транспортних систем та рішень міського планування з метою створення ефективніших, зручніших для життя, екологічних та безпечних міст. При виникненні надзвичайних ситуацій в результаті атак на об'єкти критичної інфраструктури та бойових дій, підвищення пропускну здатності перехрестя може мати ключове значення як для зменшення економічних та екологічних збитків, так і врятування життів людей. Водночас результати таких досліджень залишаються важливими і в мирний час у разі виникнення таких подій як стихійні лиха, аварії та надзвичайні ситуації в містах.

Імітаційне моделювання дорожнього руху – це потужна методологія, яка дозволяє дослідникам вивчати й аналізувати поведінку учасників дорожнього руху із високою точністю. Використовуючи комп'ютерні моделі та розширені алгоритми, моделювання дорожнього руху відтворює реальні сценарії, дозволяючи оцінити пропускну здатність перехрестя, схеми транспортного потоку та ефективність стратегій управління дорожнім рухом.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз публікацій щодо дослідження транспортного планування вулично дорожньої мережі сучасних міст показує, що значну увагу привертає до себе метод імітаційного транспортного моделювання з використанням спеціалізованого програмного забезпечення. Зокрема в роботі [3] за допомогою програмного забезпечення PTV Vissim розроблено імітаційну модель в окремій зоні важливого перехрестя в місті Пардубіце в Чеській Республіці. Модель дозволила оцінити вплив реконструкції перехрестя на логістику міста та на прилеглі території. В роботі [4] за допомогою інструменту мікроскопічного моделювання транспортного потоку PTV Vissim автори змоделивали ділянки автостради з двома, трьома та чотирма смугами руху. Було кількісно оцінено результуючий потік транспорту на кожній окремій смузі для різних значень параметрів руху. Також дослідниками приділяється увага впливу на дорожній трафік природних катаклізмів. Так у статті [5] досліджено метод розподілу руху транспорту у випадку аварій та метод організації руху мережі аварійного спецтранспорту.

В Україні також опубліковано ряд досліджень різних аспектів транспортного планування з використанням ПЗ PTV Vissim. Зокрема в роботі [6] PTV Vissim використано для дослідження ефективності інженерно-планувальних елементів розв'язок на різних рівнях, а саме місць примикання лівоповоротних з'їздів до прямого магістрального напрямку.

Формулювання мети дослідження

Це дослідження має на меті оцінити пропускну спроможність перехрестя вул. В. Чорновола та бул. Шевченка м. Черкаси в надзвичайних ситуаціях під час воєнного стану в Україні методом транспортного моделювання з використанням ПЗ PTV Vissim.

Викладення основного матеріалу дослідження

Нами була побудована модель перехрестя, яке працює в звичайному режимі. Вимірювання транспортних потоків проведено з врахуванням їх змін в умовах воєнного стану.

Змодельовано дві критичні ситуації, а саме: відключення світлофорного регулювання у випадку аварійних відключень електроенергії та різке збільшення потоку автомобілів у випадку оголошення евакуації або стихійного збільшення потоку транспортних засобів.

На рисунку 1 представлено супутниковий знімок (датований листопадом 2021 року) та картографічне зображення, отримані з сервісу «Карти Google» досліджуваного перехрестя вул. В. Чорновола та бул. Шевченка у м. Черкаси.

За допомогою програмного комплексу PTV Vissim, створено імітаційну модель досліджуваного перехрестя (рис. 2). Для максимально точної побудови моделі на місці було проведено наступні вимірювання:

- обчислення кількості та розташування паркомісць;
- вимірювання фактичної ширини та розташування смуг руху;
- вимірювання розташування елементів дорожньої розмітки, таких як стоп-лінії, точки розгалуження смуг;
- визначення тривалості тактів світлофорного циклу;
- визначення напрямку руху та інтенсивності потоків ТЗ та пішоходів в ранкову годину пік.

Організація руху громадського транспорту в моделі здійснювалась з допомогою сервісу EasyWay [7].

На рисунку 2 представлено розроблену модель в 2D режимі з включеною видимістю всіх об'єктів. Для спрощення пояснень до рисунку напрямки руху з та до перехрестя позначені відповідно цифрами від 1 до 4. Серед особливостей перехрестя в моделі враховані наступні:

- три зупинки громадського транспорту у безпосередній близькості до перехрестя;
- три стоянки автомобілів на 52 паркомісця сумарно;
- світлофорне регулювання з трифазною організацією (дві фази дозволяють рух ТЗ в одному напрямку по бульвару Шевченка і одна – в обох напрямках по вул. В. Чорновола) тривалістю повного циклу 90 секунд;
- наявність ліній тролейбусної контактної мережі вздовж бульвару Шевченка та в напрямку 3 вул. В. Чорновола.
- у зв'язку з обмеженням в наявній ліцензії ПЗ до 30 пішоходів в мережі одночасно, пішохідні зони обмежені безпосередньо біля зупинок громадського транспорту та пішохідних переходів.

На рисунку 3 показана побудова циклограм світлофорного регулювання.

Відповідно до отриманих даних про склад потоків транспортних засобів, особливістю м. Черкаси є наявність досить значної кількості вантажних мікроавтобусів та використання в якості громадського транспорту переважно автобусів малого класу. Однак в стандартній бібліотеці PTV Vissim подібні транспортні засоби відсутні. Для додавання необхідних транспортних засобів було використано відкриту бібліотеку 3D Warehouse – SketchUp (рис. 4, 5) [8].

На рисунку 6 показано стоп кадр процесу імітації перехрестя в програмному комплексі PTV Vissim в режимі 3D представлення. Анімація роботи перехрестя дозволяє оцінити відповідність поведінки транспортних засобів у моделі до реального їх руху, виявити можливі помилки в моделі та виправити їх.

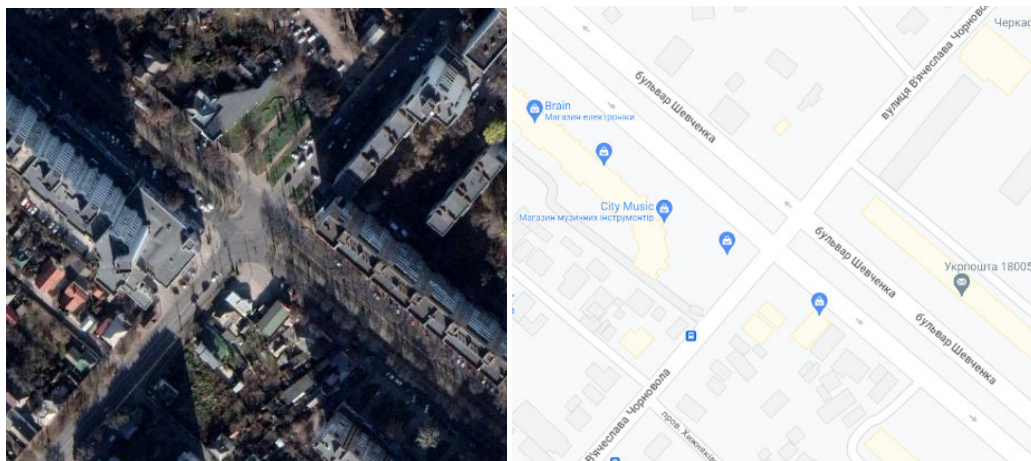


Рис. 1. Загальний вигляд перехрестя вул. В. Чорновола – бул. Шевченка, м. Черкаси

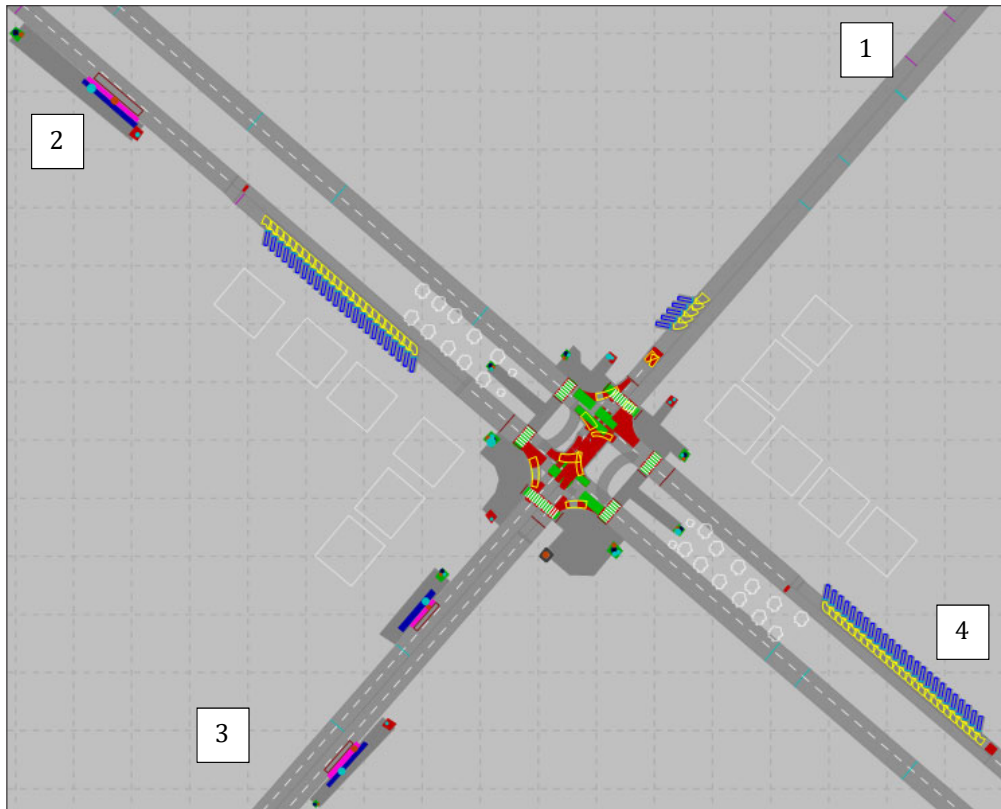


Рис. 2. Модель перехрестя, розроблена в програмному комплексі PTV Vissim

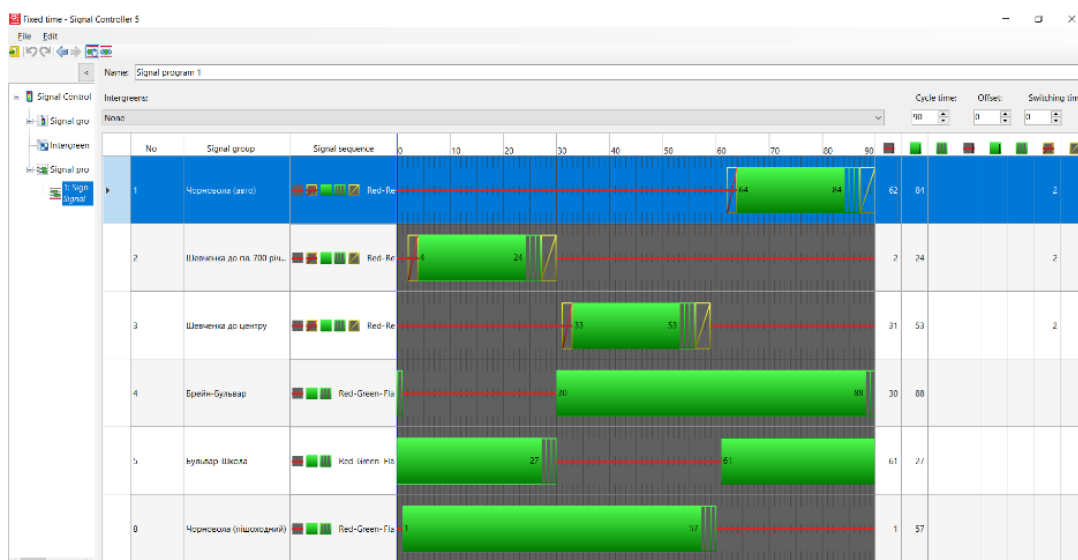


Рис. 3. Програма світлосигнальних пристроїв

Для проведення імітації сценарію вимкнення електроживлення в результаті атак на енергетичну інфраструктуру необхідно внести зміни в налаштуваннях розробленої моделі. А саме: видалити світлофорні об'єкти та маршрути громадського транспорту для тролейбусів. Також для підвищення достовірності моделі потрібно врахувати, що відключення в зимову пору року часто відбуваються в темний час доби і за відсутності вуличного освітлення погіршується видимість на перехресті, що в свою чергу призводить до зменшення середньої швидкості руху автомобілів (рис. 7).

На рисунку 8 показано стоп кадр процесу імітації перехрестя при відсутньому електроживленні світлофорів та тролейбусної мережі.



Рис. 4. Вантажні мікроавтобуси



Рис. 5. Автобуси малого класу для перевезення пасажирів на міських комерційних маршрутах

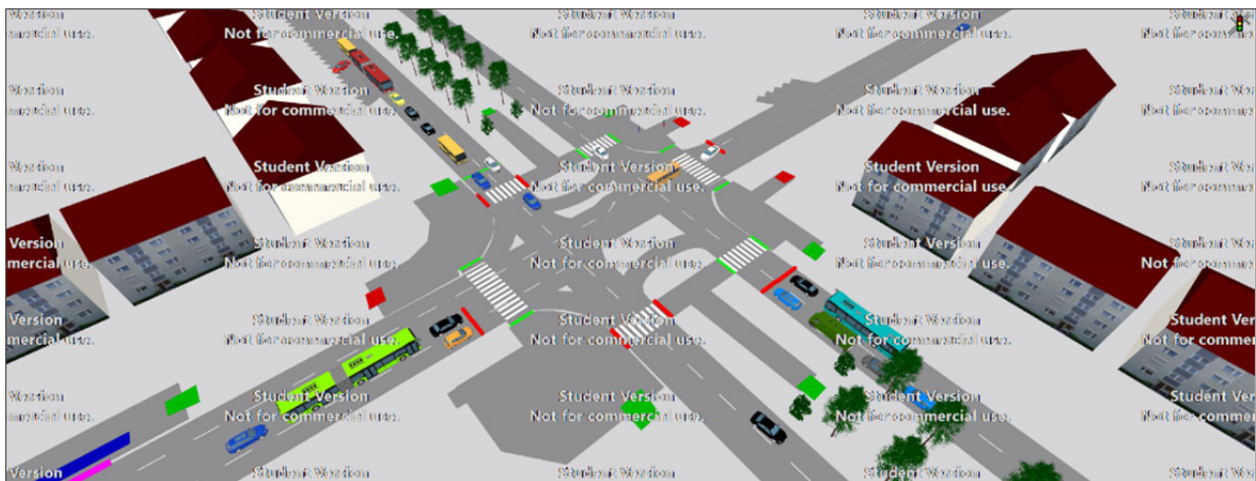


Рис. 6. 3D вигляд стоп кадру імітації перехрестя в програмному комплексі PTV Vissim

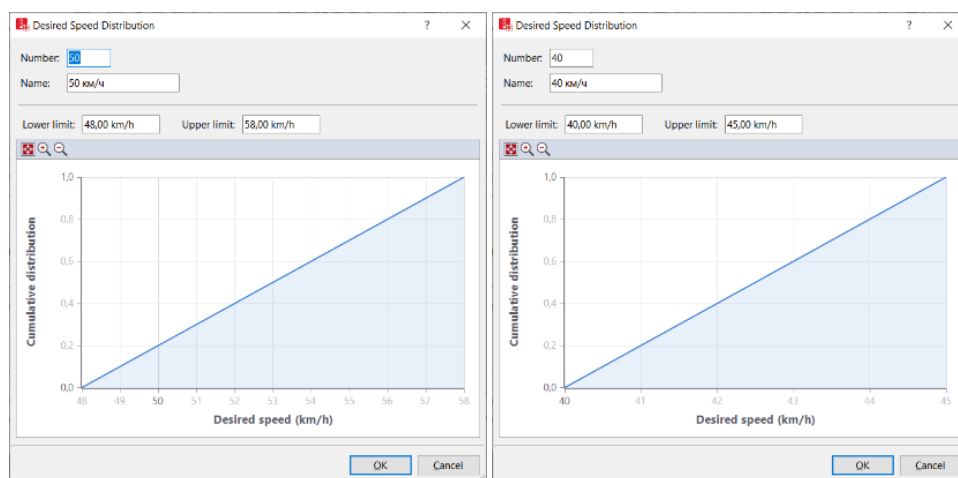


Рис. 7. Графіки розподілу бажаної швидкості легкових автомобілів за нормального освітлення (зліва) та у випадку блекауту (справа)

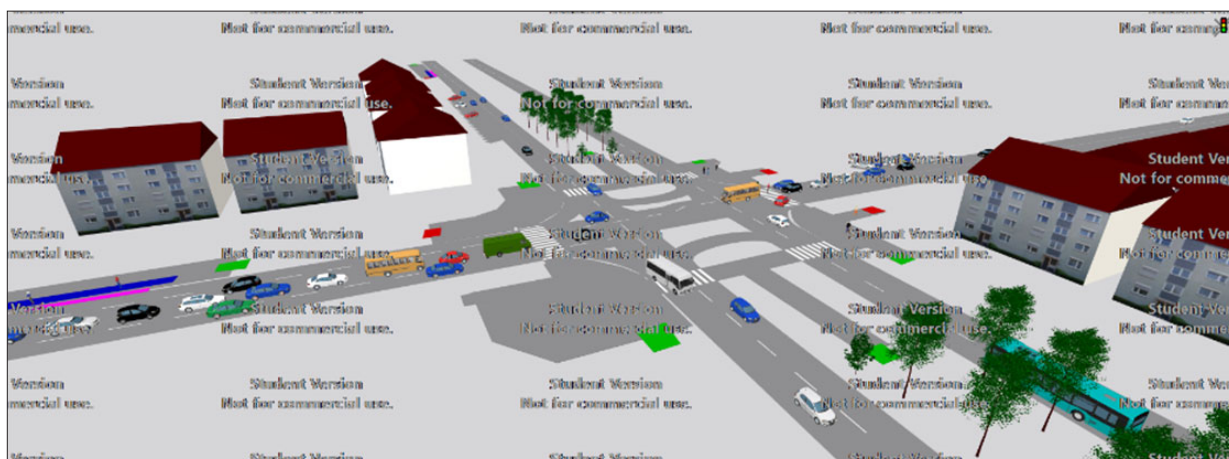


Рис. 8. 3D вигляд стоп кадру імітації перехрестя у випадку блекауту

Для проведення імітації сценарію евакуації населення необхідно внести наступні зміни до моделі:

- видалити світлофорні об'єкти, оскільки існує велика імовірність, що буде відсутнє електропостачання;
- видалити всі маршрути громадського транспорту;

– виходячи з припущення, що евакуація відбувається в напрямку 4 (рис. 2), який є найближчим від перехрестя виїздом з міста по бульвару Шевченка, необхідно змінити навантаження вхідних потоків транспортних засобів та перерозподілити відносно навантаження різних маршрутів цих потоків шляхом збільшення кількості транспортних засобів, які рухаються в напрямку 4 з напрямків 1 і 2 (з найбільш населених центру міста та мікрорайону Митниця) та зменшення до мінімуму кількості ТЗ в інших напрямках (які переважно мають складатись з службового та спеціального транспорту).

– змінити склад транспортних засобів, що рухаються в потоках, а саме збільшити відносну кількість автобусів, які будуть задіяні для евакуації громадян.

На рисунку 9 показано стоп кадр імітації перехрестя в умовах збільшеної в 10 разів інтенсивності потоків з напрямів 1 і 2 відносно нормальних умов.

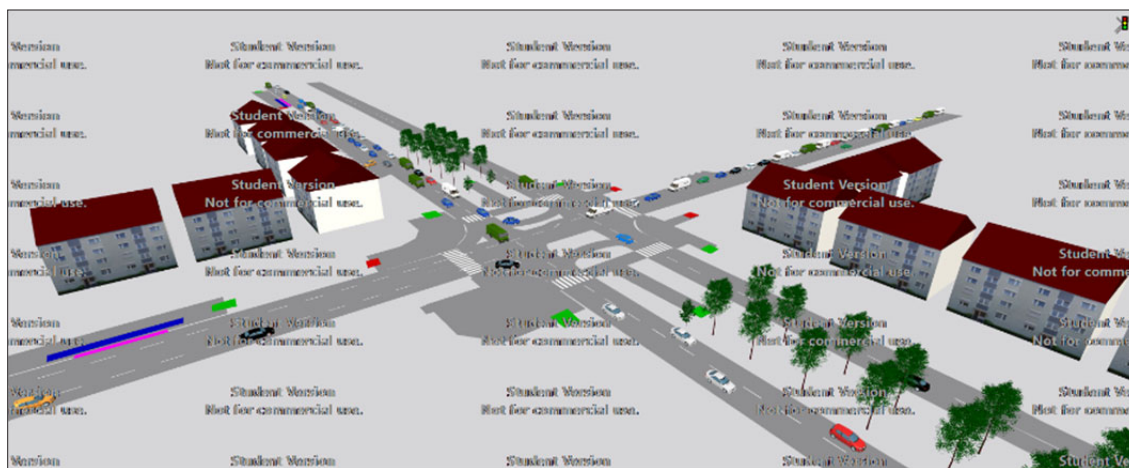


Рис. 9. 3D вигляд стоп кадру імітації перехрестя у випадку сценарію евакуації

Програмний комплекс PTV Vissim має вбудовані можливості для всебічного аналізу характеристик модельованих транспортних систем. Існує можливість отримати результати поведінки як окремих транспортних засобів та пішоходів такі і класів ТЗ або всіх ТЗ в змодельованому середовищі.

Для досягнення мети дослідження було обрано середні показники за весь час моделювання по всім ТЗ, які прийняли участь в імітації різних сценаріїв на перехресті. В таблиці 1 наведено значення часу затримки, кількості та часу зупинок ТЗ і їх середня швидкість.

Таблиця 1

Результати аналізу імітації перехрестя для різних сценаріїв

	Нормальний режим	Режим блекаут	Режим евакуація
Час затримки в мережі, с	50,703	37,920	59,477
Середня кількість зупинок ТЗ	2,731	2,496	5,517
Час затримки за рахунок зупинок, с	32,034	19,831	25,746
Середня швидкість всіх ТЗ, км/год	15,953	17,652	16,217

Картограма відносного часу затримки (середнє значення за всіма ТЗ) показана на рисунку 10.

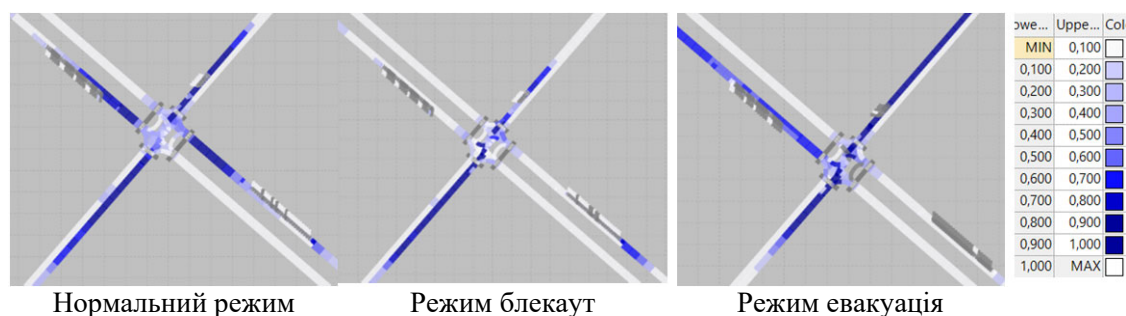


Рис. 10. Картограма відносного часу затримки (середнє значення за всіма ТЗ) для різних сценаріїв

Висновки

В результаті імітаційного моделювання перехрестя вул. В. Чорновола – бул. Шевченка, м. Черкаси можна зробити наступні висновки:

– існуюча організація перехрестя при відключенні електроенергії не призводить до виникнення критичних заторів і зменшення пропускної здатності перехрестя за існуючої інтенсивності руху транспорту. Винятком є напрям **3** по вул. В. Чорновола. Це можна пояснити відсутністю повільних габаритних тролейбусів на перехресті, а також обмеженням доступної ліцензії у 10 хвилин моделювання. Також не враховується можливість порушень правил учасниками дорожнього руху;

– у випадку зростання інтенсивності руху з двох напрямів до 10 разів середній час затримки ТЗ на перехресті зростає приблизно на 20% відносно нормального режиму роботи перехрестя. При цьому суттєво зменшиться пропускна здатність напрямку **1**. Однак загалом перехрестя не блокується заторами та залишається прохідним. Подібно до попереднього сценарію зростання інтенсивності руху компенсується відсутністю тролейбусів та іншого громадського транспорту, а також відсутністю зупинок на світлофорі.

В подальшому для підвищення достовірності отриманих результатів планується використати академічну ліцензію програми, що дозволить перевірити отримані дані на більшому інтервалі часу, а також врахувати можливість порушень правил дорожнього руху водіями.

Список використаної літератури

1. Указ Президента України Про введення воєнного стану в Україні 24.02.2022. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/64/2022#n2>. (дата звернення: 30.06.2023).
2. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text>. (дата звернення: 30.06.2023).
3. Kučera T., Chocholáč J. Design of the City Logistics Simulation Model Using PTV VISSIM Software. Transportation Research Procedia. 2021. Vol. 53. P. 258–265. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.033> (date of access: 01.07.2023).
4. Parameters Influencing Lane Flow Distribution on Multilane Freeways in PTV Vissim / C. M. Weyland et al. Procedia Computer Science. 2021. Vol. 184. P. 453–460. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.03.057> (date of access: 01.07.2023).
5. Emergency traffic distribution and related traffic organization method under natural disasters / X. Ma et al. Sustainable Operations and Computers. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.09.001>.
6. Транспортне моделювання як один із методів оцінки ефективності інженерно-планувальних елементів розв'язок в різних рівнях. / Осетрин М., Беспалов Д., Дорош М., Тарасюк В. // Містобудування та територіальне планування, (70), 2019 417–430. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2019.70.417-430>

7. EasyWay. URL: <https://www.eway.in.ua/ua/cities/cherkasy>. (дата звернення: 30.06.2023).
8. 3D Warehouse – SketchUp. URL: <https://3dwarehouse.sketchup.com/>. (дата звернення: 30.06.2023).

References

1. Decree of the President of Ukraine On the introduction of martial law in Ukraine 02/24/2022. Official Website of the Parliament of Ukraine. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/64/2022#n2>
2. Code of Civil Protection of Ukraine. Official Website of the Parliament of Ukraine. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text>
3. Kučera, T., Chocholáč J. (2021). Design of the City Logistics Simulation Model Using PTV VISSIM Software. Transportation Research Procedia, 53, 258–265. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.033>
4. Weyland, C. M., Baumann, M. V., Buck, H. S., & Vortisch, P. (2021). Parameters Influencing Lane Flow Distribution on Multilane Freeways in PTV Vissim. Procedia Computer Science, 184, 453–460. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.03.057>
5. Ma, X., Guo, H., Tang, X., Gao, X., & Wang, X. (2023). Emergency traffic distribution and related traffic organization method under natural disasters. Sustainable Operations and Computers, 4, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.09.001>
6. Osetrin, M., Bepalov, D., Dorosh, M., & Tarasiuk, V. (2019). Transport modeling as one of the methods of evaluating the efficiency of engineering and planning elements of junctions at different levels. Urban planning and territorial planning., (70), 417–430. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2019.70.417-430>
7. EasyWay. EasyWay. <https://www.eway.in.ua/ua/cities/cherkasy>
8. 3D Warehouse. SketchUp. <https://3dwarehouse.sketchup.com/>