

УДК 004.94:656.051

DOI: 10.31673/2412-9070.2024.015256

С. С. КОРОТКОВ, аспірант,

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

## ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМ ПОТОКОМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ S-ГІПЕРМЕРЕЖІ

*Розглянуто проблему впливу на пропускну здатність мережі запровадження одностороннього руху на певних ділянках вулиць. Запропоновано можливість застосування імітаційного моделювання для визначення правил керування потоками машин у мегаполісі. В основу побудови імітаційної моделі покладено нестационарну S-гіпермережу, яка дає можливість цілком адекватно відобразити потоки машин вулицями міста.*

*У процесі побудови моделі варто зважати не лише на містобудівні фактори дорожньо-транспортної мережі, а й на поведінку потоків та характеристики видів транспортних засобів, що їх становлять. Наприклад, уведення одностороннього руху може як збільшити, так і зменшити пропускну здатність ділянки дорожньо-транспортної мережі залежно від структури потоків даної території міста. Отже, імітаційна модель дасть можливість обчислити оптимальну орієнтацію руху вулицями міста.*

**Ключові слова:** потоки машин; керування транспортом; S-гіпермережі.

### Вступ

Основний показник завантаженості вулиць — середня швидкість руху транспортних засобів, яка з роками стрімко знижується. Причому ця проблема стала відчуватися не лише у великих містах, а й у дрібніших. Зростання скупчення транспортних засобів на дорожньо-транспортній мережі міста не тільки підвищує витрати через втрату часу, а також збільшує ймовірність пригод і негативно впливає на навколишнє середовище та якість життя людей.

Керування транспортними потоками дорожньо-транспортних мереж тісно пов'язане з їхньою пропускну здатністю. Для найефективнішої роботи мережі потрібно забезпечити можливість проходження крізь неї максимального потоку.

Як показав аналіз літературних джерел, до побудови моделей дорожньо-транспортної мережі застосовують теорію графів чи гіперграфів [1-4]. Однак у розроблених у такий спосіб моделей є недоліки, наприклад сильна перевантаженість у вузлах (перехрестя, розв'язки тощо). У разі додавання в модель потоків різного сорту граф перетворюється на абсолютно інший об'єкт, з яким часом незрозуміло як працювати.

Гіпермережі [5; 6], на відміну від графів, дають можливість адекватно описувати системи мережної структури пошарової ієрархії.

Оскільки транспортна інфраструктура мегаполісу є складною ієрархічною нестационарною системою мережної структури, вибрана теорія дає змогу близько до реальності моделювати транспортні мережі та розв'язувати низку завдань, пов'язаних із ними, зокрема моделювання транспортних потоків дорожньо-транспортної мережі міста, керування транспортними системами, оптимальне розміщення пунктів обслуговування тощо.

**Постановка задачі.** Розглядається проблема впливу на пропускну здатність мережі запровадження одностороннього руху на певних ділянках вулиць.

### Основна частина

Розглянемо ділянку дорожньо-транспортної мережі з двостороннім рухом (одна смуга руху в одному напрямку, друга — у протилежному). У цьому разі на перехресті виникає так звана проблема повороту ліворуч (рис. 1).

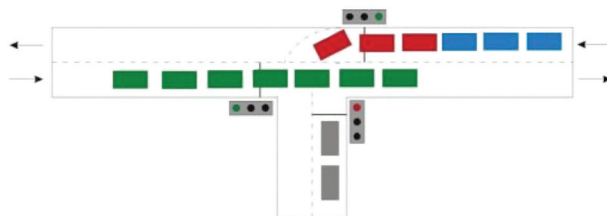


Рис. 1. Проблема повороту ліворуч

Червоні машини (див. рис. 1) за правилами дорожнього руху змушені чекати доти, доки проїдуть зелені, і тільки після цього вони можуть повернути ліворуч. Однак блакитним машинам потрібно рухатися прямо, але вони очікуватимуть, поки проїдуть червоні. Унаслідок цього виникає затор та знижується пропускну здатність цієї ділянки.

Уведення одностороннього руху (обидві смуги руху в одному напрямку) може повністю або частково розв'язати цю проблему, розвантажити ділянку дороги та збільшити пропускну здатність, а отже, і обсяг потоку (рис. 2).

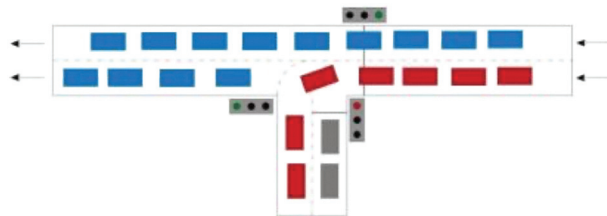


Рис. 2. Односторонній рух головною дорогою

Як впливає з рис. 2, встановлення одностороннього руху по всій горизонтальній проїжджій частині повністю вирішує проблему повороту ліворуч.

Запровадження одностороннього руху праворуч до перехрестя (рис. 3) розв'язує завдання частково: дозволяє блакитним машинам безперешкодно проїжджати перехрестя, але червоним машинам, як і раніше, потрібно чекати, поки проїдуть зелені.

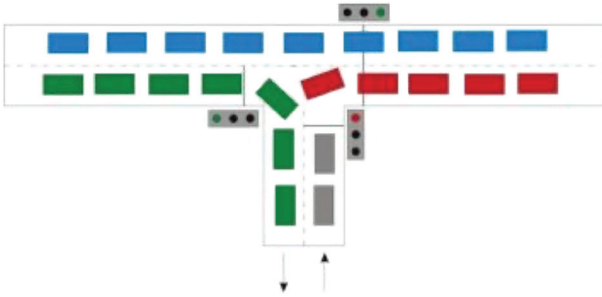


Рис. 3. Односторонній рух праворуч до перехрестя

Оскільки для побудови моделі дорожньо-транспортної мережі було вибрано теорію  $S$ -гіпермереж, то у статті використано поняття та визначення з [5; 6]. Тут варто зауважити, що теорія нестационарних  $S$ -гіпермереж дозволяє брати до уваги практично всі дорожні колізії, пов'язані зі структурою мережі, потоками машин, залежними від часу доби і/або днів тижня, системою керування транспортними потоками (світлофори, інверсні смуги, дорожні знаки як постійні, так і змінювані залежно від ситуації на дорогах), розміткою доріг тощо.

**Побудова моделі.** Рівні дорожньо-транспортної мережі (ДТМ) задають структуру  $S$ -гіпермережі для формального опису.

**1. Основа ДТМ:** вулична мережа міста, площі та перехрестя, тунелі, внутрішньодворові проїзди, стоянки та гаражі, різні перешкоди тощо.

**2. Дороги та інші транспортні лінійні споруди:** дорога, включно з поперечним перетином між зовнішніми межами тротуарів, проїзди, рейки (трамваю, метро, електропоїздів тощо), естакади, мости та інші інженерні споруди, призначені для проїзду транспорту.

**3. Проїжджа частина:** кордонами проїжджої частини є тротуари, узбіччя, газони, що відокремлюють проїжджу частину від тротуарів, або розділювальна смуга.

**4. Смуга руху:** будь-яка з поздовжніх смуг на проїжджій частині незалежно від дорожньої розмітки, що має ширину, достатню для руху в один ряд нерейкових транспортних засобів. Кінцевими вузлами смуг є ділянки проїжджих частин (алелі) між перехрестями, розгалуженнями та іншими вузлами дорожньої мережі; рейкові шляхи; смуги руху на дорогах; смуги руху з контактними провадами для тролейбусів; монорейки.

**5. Локуси:** локальні ділянки мережі на смугах руху, відповідні місцям, на яких перебувають транспортні одиниці протягом певного інтервалу часу.

**6. Маршрути руху:** затверджені маршрути міського пасажирського транспорту, маршрути автотранспорту підприємств, маршрути індивідуальних та інших транспортних одиниць.

**7. Граф алелів:** безліч вершин, що відповідають перетину стоп-ліній зі смугами руху на перехрестях, розгалуженнях та інших вузлах дорожньої мережі. Ребрам зіставляються алелі — ділянки смуг на проїжджій частині [7]. Фактично цей граф описує структуру руху транспорту, що визначається дорожньою розміткою та спеціальними знаками. Отже, алель є неперервною смугою руху між вузлами, зупинка в яких потрібна лише з огляду на правила дорожнього руху.

**8. Граф локусів:** найбільший граф за кількістю вершин та ребер серед вторинних мереж  $S$ -гіпермережі транспортної системи міста. Цей граф будується так. Алелі розбиваються на ділянки, у кожній з яких може бути не більше одного автомобіля. У цьому разі вершинами є можливі зупинки транспорту чи кордону між локусами. Дві вершини вважаються суміжними, якщо автомобіль може бути переміщений з однієї вершини до другої за такт процесу руху.

Схему вкладення рівнів транспортної мережі відповідно до наведеної термінології зображено на рис. 4.

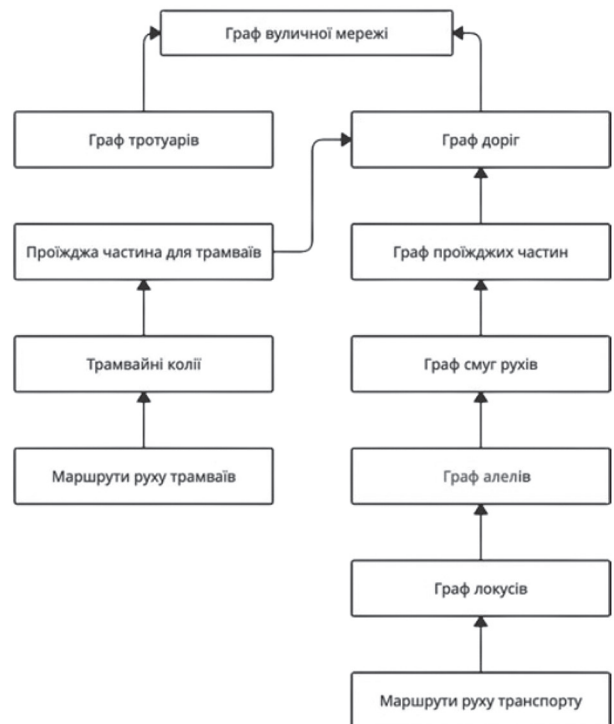


Рис. 4. Ієрархія вкладень транспортних мереж

**Локуси.** Як вже було зазначено, локуси — це ділянки мережі, на яких перебувають транспортні

одиниці. Кількість локусів, що припадають на один аallel, обчислюється за формулою

$$S = L_a / L_l,$$

де  $S$  — кількість локусів;  $L_a$  — довжина аалея;  $L_l$  — довжина локусу. Однак довжина локусу не може бути занадто маленькою, наприклад, якщо  $L_l$  дорівнює довжині автомобіля. За такого розкладу забезпечити безпечну швидкість руху (відмінну від нуля) неможливо.

Передбачається, що для безпечного руху ділянкою дороги потрібно дотримуватися дистанції між транспортними засобами. Причому дистанція залежить від швидкості автомобіля, крім місць, позначених знаком, що її визначає.

Орієнтовно безпечною дистанцією між транспортними засобами, що рухаються в транспортному потоці з однаковою швидкістю, заведено вважати відстань у метрах, яка дорівнює третині значення швидкості (при швидкості 60 км/год безпечна дистанція 20 м). Отже, у формулі довжина локусу  $L_l$  дорівнює  $-v/3$ , де  $v$  — швидкість транспортного засобу. У цьому разі маємо ситуацію, яку унаочнює рис. 5.

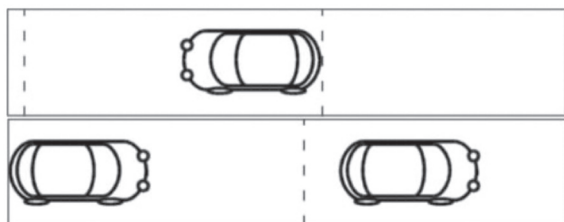


Рис. 5. Безпечна дистанція залежно від швидкості руху

Локус активізується і починає працювати тоді, коли в ньому з'являється транспортна одиниця (автомобіль). Залежно від того, якого типу автомобіль у нього потрапив, вибирається варіант «програма» його роботи. Наприклад, локуси можуть працювати за розкладом або випадково: з імовірністю 0,01 автомобіль поїде назад, з імовірністю 0,02 зупиниться, а з імовірністю 0,97 рухатиметься вперед, що дає змогу розглядати різнотипні потоки та їх поведінку [8].

**Імітаційне моделювання.** Розглянемо ділянку дорожньо-транспортної мережі, зображену на рис. 6.

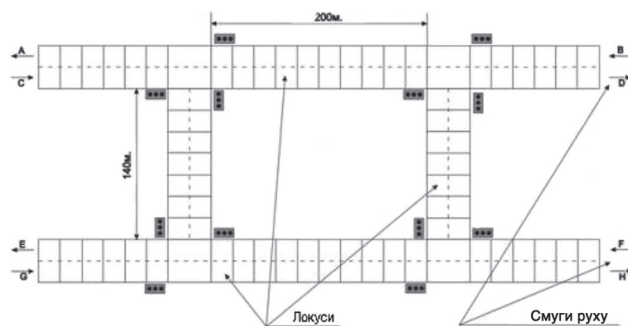


Рис. 6. Приклад ділянки дорожньо-транспортної мережі

Нехай із  $C$  їдуть машини, чергуючись у такий спосіб: п'ять — у  $D$ , 5 — у  $E$ ; із  $F$  їдуть машини, чергуючись так: п'ять — у  $E$ , п'ять — у  $D$ ; із  $B$  їдуть до  $A$ , але на кожні сім машин припадають три, які їдуть у  $H$ ; із  $G$  їдуть у  $H$ , але на кожні сім машин припадають три, які їдуть до  $A$ . Швидкість машин становить 60 км/год. Світлофори працюють із періодичністю 20 с (20 с горить зелений сигнал, 20 с — червоний); за цей час по одній смузі перехрестя встигають подолати 15 машин.

**Завдання:** обчислити пропускну здатність цієї ділянки.

Дослідимо потактово, що відбувається з потоками на розглядуваній ділянці. Стан ділянки в моменти часу  $t = 0$  с і  $t = 20$  с наведено відповідно на рис. 7 і рис. 8. Також на рис. 8 виокремлено дві ділянки, на яких із наступним тактом світлофора постає проблема повороту ліворуч, коли червоні та чорні машини, очікуючи на поворот, будуть заважати проїхати відповідно жовтим і коричневим [9].

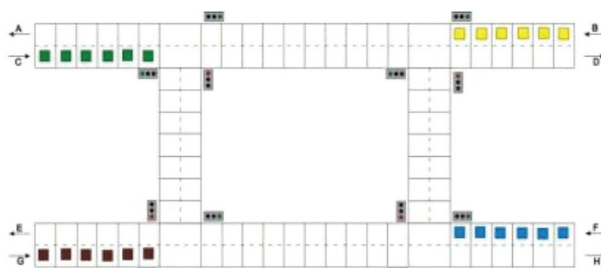


Рис. 7. Початок руху на цій ділянці

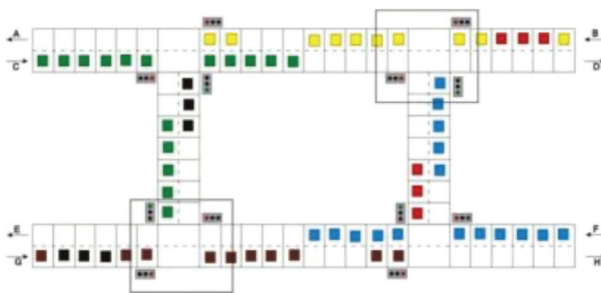


Рис. 8. Проблема повороту ліворуч

Змодельовавши кілька тактів світлофора, дістанемо пропускну здатність розглядуваної ділянки дорожньо-транспортної мережі, яка дорівнює приблизно 2600 машин/год в один бік.

Розглянемо аналогічне завдання, але без розкладу, скільки машин куди прямує. З  $E$  машини їдуть із імовірністю 0,33, інші їдуть у  $D$ ; із  $F$  в  $D$  машини рухаються з імовірністю 0,33, інші їдуть у  $E$ ; із  $B$  в  $A$  машини їдуть із імовірністю 0,8, інші — у  $H$ ; із  $G$  у  $H$  машини прямують із імовірністю 0,8, інші їдуть до  $A$ . Швидкість машин становить 60 км/год. Світлофори працюють із періодичністю 20 с (20 с увімкнено зелений, 20 с — червоний), за цей час по одній смузі перехрестя встигають подолати 15 машин.

**Завдання:** визначити пропускну здатність цієї ділянки.

Аналогічно минулому випадку, розглянемо по-тактово, що відбувається на ділянці. Стан ділянки в момент часу  $t = 0$  і  $t = 60$  с зображено відповідно на рис. 9 і рис. 10.

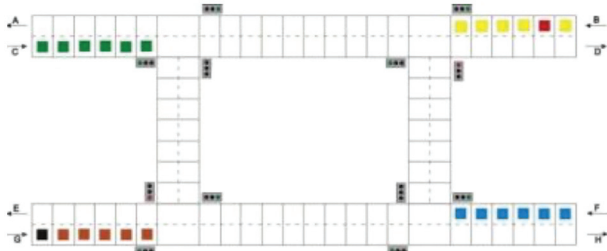


Рис. 9. Початок руху транспортних одиниць ділянкою

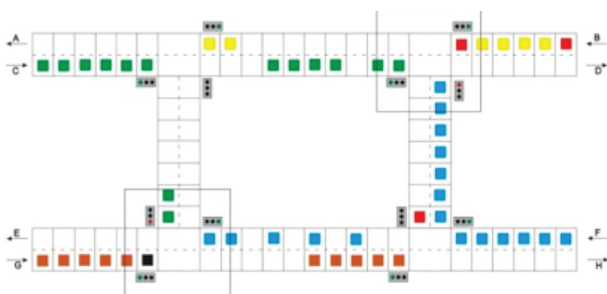


Рис. 10. Колізії, що виникають під час повороту ліворуч

Виокремленими ділянками позначено місця виникнення проблеми повороту ліворуч. Так, наприклад, за час з 40 до 60 с по самій верхній смузі перехрестя залишили всього три машини (одна червона та дві жовті).

Змодельовавши кілька тактів світлофора, дістанемо пропускну здатність розглядуваної ділянки дорожньо-транспортної мережі, яка становить майже 2220 машин/год в один бік.

Тепер розглянемо ситуацію, коли двосторонній рух замінили на односторонній (рис. 11).

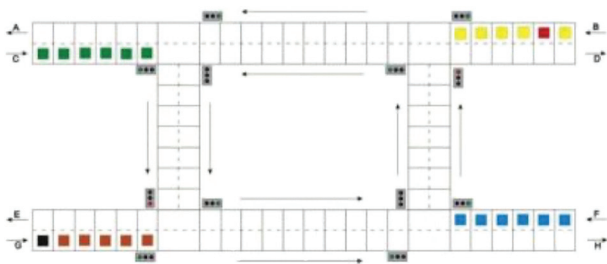


Рис. 11. Стан ділянки під час  $t = 0$

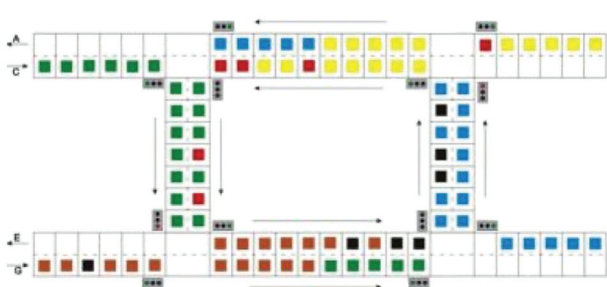


Рис. 12. Приклад неправильної орієнтації рокадних ділянок вулиць

Вихідні дані залишаються незмінними за винятком того, що з  $B$  машини їдуть у  $E$ , а не в  $H$ ; з  $G$  машини їдуть у  $D$ , а не в  $A$ .

**Завдання:** розрахувати пропускну здатність цієї ділянки.

Стан ділянки в момент часу  $t = 60$  с унаочнює рис. 12. У цьому разі затори виникають скрізь. Відбувається це через те, що надто великий потік машин надходить на вертикальні ділянки, які мають невелику місткість.

Змодельовавши кілька тактів світлофора, дістанемо пропускну здатність цієї ділянки дорожньо-транспортної мережі, яка становить приблизно 1860 машин/год в один бік.

Далі розглянемо ситуацію, коли двосторонній рух замінили на односторонній, як зображено на рис. 13. Тоді умову завдання можна переписати в такий спосіб: машини їдуть із  $B$  в  $A$ , але на кожні 15 машин зустрічаються п'ять, які їдуть у  $D$ ; машини їдуть із  $C$  у  $D$ , але на кожні 15 машин зустрічаються п'ять, які їдуть в  $A$  [10].



Рис. 13. Стан ділянки в момент часу  $t = 0$

Змодельовавши кілька тактів світлофора, дістанемо пропускну здатність цієї ділянки дорожньо-транспортної мережі, яка становить майже 3600 машин/год в один бік.

### Висновки

У процесі розв'язання проблеми впливу на пропускну здатність мережі запровадження одностороннього руху на певних ділянках вулиць треба зауважити, що введення одностороннього руху не тільки вирішує проблему повороту ліворуч, а може як збільшити, так і зменшити пропускну здатність ділянки дорожньо-транспортної мережі залежно від структури потоків даної території міста. Отже, імітаційна модель дасть змогу обчислити оптимальну орієнтацію руху вулицями міста.

Також варто зазначити, що під час побудови моделі варто брати до уваги не тільки містобудівні фактори дорожньо-транспортної мережі, а й поведінку потоків та характеристики видів транспортних засобів, що їх становлять.

### Список використаної літератури

1. *Elsken T., Metzen J.H., Hutter F. Multi-objective Architecture Search for CNNs. 2018.*

2. Domhan T., Springenberg J.T., Hutter F. *Speeding up automatic hyperparameter optimization of deep neural networks by extrapolation of learning curves* // *International Joint Conferences on Artificial Intelligence*. 2015.

3. Bergstra J. *Algorithms for hyper-parameter optimization* // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2011.

4. Bengio Y. *Gradient-based optimization of hyper-parameters* // *Neural Computation*. 2000.

5. Snoek J., Adams R. *Practical bayesian optimization of machine learning algorithms* // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2012.

6. Li L., Talwalkar A. *Random Search and Reproducibility for Neural Architecture Search*. 2019.

7. Bergstra J., Bengio Y. *Random search for hyper-parameter optimization* // *Journal of Machine Learning Research*. 2012. No. 13. P. 281–305.

8. Cai H., Chen T., Zhang W. *Efficient Architecture Search by Network Transformation* // *AAAI*. 2017. No. 18.

9. Elsken T., Metzen J., Hutter F. *Neural Architecture Search: A Survey* // *Journal of Machine Learning Research*. 2019. No. 20. P. 1–21.

10. Лящинський П. Б., Лящинський П. Б. *Автоматизований синтез структур згорткових нейронних мереж* // *Problèmes et perspectives d'introduction de la recherche scientifique innovante*. 2019. Bun. 2. С. 104–105.

S. Korotkov

### SIMULATION OF TRAFFIC FLOW CONTROL USING S-HYPERNETWORK

The problem of the influence of the network capacity of the introduction of one-way traffic on certain sections of the streets is considered. The possibility of using simulation modeling to determine the rules for managing the flow of cars in the metropolis is offered. The construction of the simulation model is based on a non-stationary s-hypernetwork, which makes it possible to adequately reflect the flow of cars on city streets. The main indicator of street congestion is the average speed of vehicles, which has been decreasing sharply over the years. Moreover, this problem began to affect not only large cities, but also smaller ones. The increasing congestion of vehicles on the city's road network not only increases costs due to lost time, but also increases the likelihood of accidents and negatively affects the environment and people's quality of life.

Management of traffic flows of road transport networks is closely related to their carrying capacity. For the most effective operation of the network, it is necessary to ensure the possibility of passing through it the maximum flow.

Since the transport infrastructure of the metropolis is a complex hierarchical non-stationary system of the network structure, the selected theory allows to simulate transport networks close to reality and to solve a number of tasks related to them, such as: modeling of traffic flows of the city's road transport network; management of transport systems; optimal placement of service points, etc.

It is also worth noting that when building the model, it is necessary to take into account not only the urban planning factors of the road and transport network, but also the behavior of the flows and the characteristics of the types of vehicles that make them up. For example, the introduction of one-way traffic can both increase and decrease the carrying capacity of a section of the road network, depending on the flow structure of a given area of the city. Thus, the simulation model will allow to calculate the optimal orientation of the traffic on the streets of the city.

**Keywords:** traffic flows; transport management; S-hyper networks.

