

## СТВОРЕННЯ ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ СКЛАДНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ ПРОГРАМ

© A. Bublikov, I. Taran

### THE CREATION OF SIMULATIONS OF ELEMENTS OF COMPLICATED TRANSPORT SYSTEMS BASED ON SPECIALIZED COMPUTER PROGRAMS

**Мета.** Мета полягає у створенні типових комп'ютерних моделей, що імітують окремі та відносно прості процеси формування транспортних потоків на невеликих ділянках транспортної мережі міста. Для цього необхідно обґрунтувати та створити механізми реалізації взаємовпливу між локальними комп'ютерними моделями, що є відображенням взаємозв'язків між елементами складної транспортної системи відповідно до теорії систем.

**Методика дослідження** полягає у встановленні механізмів реалізації взаємовпливу між локальними комп'ютерними моделями транспортних потоків на основі методів моделювання транспортних процесів та теорії систем.

**Результати дослідження.** Встановлена залежність постійної часу моделі формування транспортного потоку на перехресті у вигляді динамічної аперіодичної ланки від кількості машин до перехрестя, яка з високою точністю апроксимується квадратичним рівнянням. Визначена залежність використовується для обґрунтування та встановлення зв'язку між локальною моделлю формування транспортного потоку на перехресті та локальною моделлю формування транспортного потоку перед перехрестям. Інший зв'язок між цими моделями пропонується створювати шляхом порівняння результату інтегрування інтенсивності транспортного потоку через перехрестя з кількістю автомобілів перед перехрестям на різних тактах періоду світлофорного циклу. Коли результат інтегрування за часом інтенсивності транспортного потоку стане більше кількості автомобілів, що були перед перехрестям, це свідчить про проїзд через перехрестя усіх автомобілів, що чекали, і тому інтенсивність необхідно встановити рівною нулю.

**Наукова новизна** полягає у використанні в складній моделі формування транспортних потоків у транспортній мережі міста сукупності простих локальних моделей для опису окремих транспортних процесів з обґрунтуванням зв'язків між ними на основі теорії систем.

**Практичне значення.** Результати досліджень будуть використані для створення складної моделі, що описує процеси формування транспортних потоків у місті з метою їх аналізу та дослідження.

**Ключові слова:** моделювання, транспортні потоки у місті, локальна комп'ютерна модель, теорія систем

**Вступ.** У статті [1] обґрунтований та описаний новий підхід щодо моделювання процесів формування транспортних потоків у мегаполісі. Запропонований підхід є альтернативою складним моделям, що описують формування транспортних потоків [2,3], та використовує інструменти теорії систем за умови побудови моделі. Згідно з цим підходом, пропонується створювати модель транс-

портних потоків на основі децентралізованої структури, що складається з сукупності типових локальних моделей, які описують конкретні процеси формування транспортних потоків на невеликих ділянках міської транспортної схеми. З урахуванням великої кількості таких локальних моделей та, відповідно, математичних операцій за умови моделювання транспортних потоків у великому місті, необхідно запропонувати комп'ютерні моделі окремих типових й відносно простих процесів формування транспортних потоків з використанням математичних моделей, запропонованих у роботі [1]. Особливістю цих комп'ютерних моделей є їх максимальна адаптація для використання у якості елементів більш складної моделі транспортної системи. Тобто, у даних комп'ютерних моделях мають бути обґрунтовані та передбачені механізми реалізації взаємного впливу по відношенню до інших локальних комп'ютерних моделей, що імітують процеси формування транспортних потоків.

#### **Формулювання мети статті (постановка завдання).**

У статті поставлено за мету створити типові комп'ютерні моделі, що імітують окремі та відносно прості процеси формування транспортних потоків на невеликих ділянках транспортної мережі міста. Для цього необхідно обґрунтувати та створити механізми реалізації взаємних впливів між локальними комп'ютерними моделями, що є відображеннями взаємозв'язків між елементами складної транспортної системи згідно теорії систем.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для обґрунтування механізму реалізації взаємозв'язків комп'ютерної моделі імітації поведінки транспортних потоків одразу за перехрестям з іншими елементами транспортної системи проведено дослідження динаміки розгону групи автомобілів перед перехрестям для різної кількості автомобілів у групі. Досліджувалась залежність параметрів моделі поведінки транспортного потоку за перехрестям, що імітує процес розгону групи автомобілів, від характеристик потоку за умови представлення моделі аперіодичною динамічною ланкою [1]. Результати дослідження для конкретного прикладу наведені у табл.1.

Таблиця 1

Результати дослідження залежностей параметрів моделі поведінки транспортних потоків за перехрестям від кількості автомобілів

Кількість автомобілів у групі, од.	Коефіцієнт підсилення $K$ , км/г / од.	Постійна часу $T$ , с
5	40,99	3,15
11	40,07	7,03
23	39,4	15,66

Проаналізуємо залежність параметрів динамічної моделі, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні перехрестя, від кількості автомобілів перед перехрестям. Коефіцієнт підсилення  $K$  за умови збіль-

шення кількості автомобілів перед перехрестям змінюється у дуже вузькому діапазоні від 39,43 до 40,996. Тому можна зробити висновок, що кількість автомобілів перед перехрестям не впливає на даний параметр, який приймемо постійною величиною, що дорівнює 40. На відміну від коефіцієнта підсилення  $K$ , постійна часу  $T$  відчутно збільшується за умови зростання кількості автомобілів перед перехрестям. За допомогою додатку «Basic Fitting» математичного пакету MATLAB здійснимо регресійний аналіз залежності постійної часу  $T$  від кількості автомобілів перед перехрестям (рис.2).

З рис.2 видно, що експериментальна залежність постійної часу  $T$  моделі поведінки транспортного потоку за перехрестям від кількості автомобілів перед перехрестям з високою точністю описується квадратичним рівнянням. При цьому максимальне значення абсолютного відхилення точок експериментальної залежності від апроксимуючої кривої не перевищує  $2,7 \cdot 10^{-15}$ , а корінь квадратний суми квадратичних відхилень точок експериментальної залежності від апроксимуючої кривої становить  $2,66 \cdot 10^{-15}$ . Це свідчить про високу точність апроксимації.

Таким чином у моделі поведінки транспортного потоку за перехрестям необхідно передбачити залежність постійної часу від кількості автомобілів перед перехрестям, що є параметром іншої локальної моделі формування транспортних потоків. Тобто, ця залежність є механізмом реалізації зв'язку між локальною моделлю поведінки транспортного потоку за перехрестям та локальною моделлю формування потоку до перехрестя.

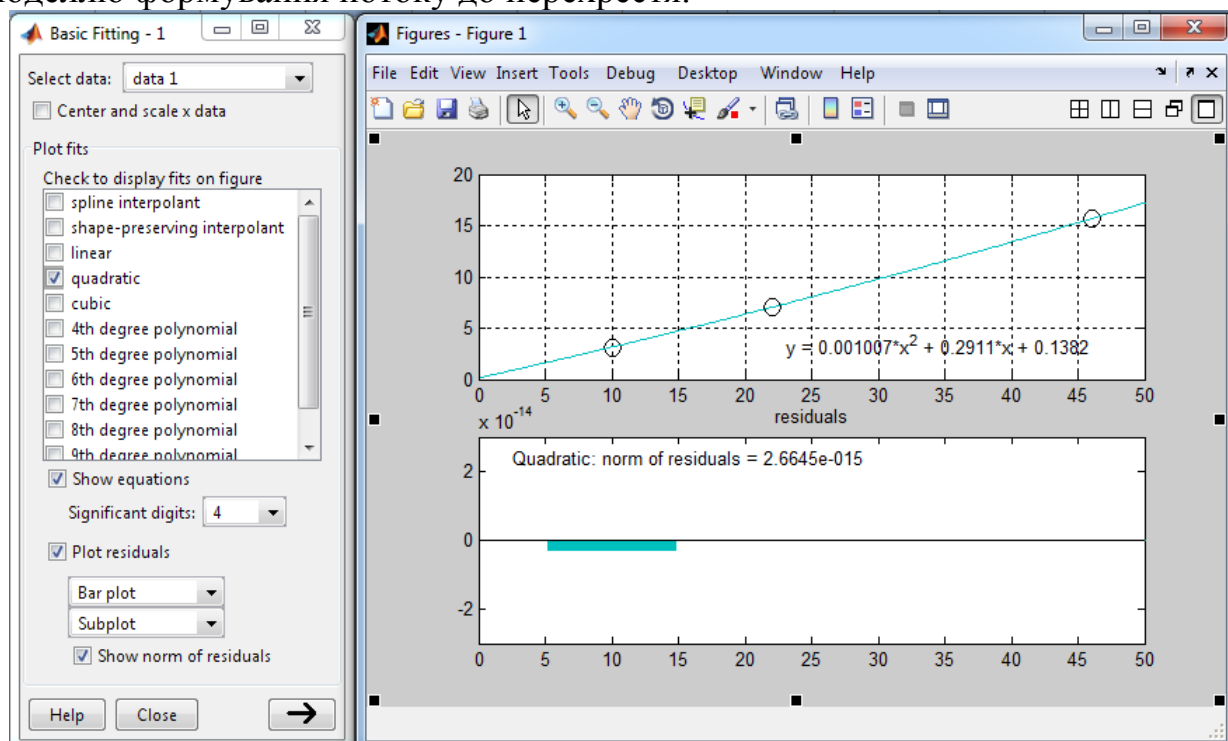


Рис. 2. Результат регресійного аналізу залежності постійної часу  $T$  моделі поведінки транспортного потоку за перехрестям від кількості автомобілів перед перехрестям

Представимо диференціальне рівняння в операторній формі, що лежить в основі моделі поведінки транспортного потоку за перехрестям, у вигляді:

$$\bar{V}_{m.n.} \cdot p = \frac{K}{T} \cdot \bar{U} - \frac{1}{T} \cdot \bar{V}_{m.n.} \quad (1)$$

де  $V_{m.n.}$  – середня просторова швидкість транспортного потоку, км/г;  $U$  – керуючий вплив від автоматизованої системи керування дорожнім рухом (АСКДР) на світлофорний об'єкт;  $p$  – оператор Лапласа.

Реалізуємо рівняння (1) у додатку Simulink математичного пакету MATLAB (рис.3). Модель поведінки транспортного потоку за перехрестям, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні перехрестя, складається з трьох основних частин, які виділені на рис.3 пунктирними лініями. Перша частина представляє собою блок імітації керуючого впливу, на виході якого формується керуючий сигнал, що подається на світлофорний об'єкт (1 – зелене світло, 0 – червоне або жовте світло). Друга частина представляє собою блок, що реалізує функціональну залежність постійної часу  $T$  моделі від кількості автомобілів перед перехрестям. Третя частина реалізує рівняння (1). Крім того, вихід динамічної моделі на рис.3 помножується на керуючий вплив для того, щоб імітувати різку зупинку транспортного потоку, коли загоряється червоне світло. При цьому нехтуємо динамікою транспортного потоку на проміжному такті світлофорного циклу.

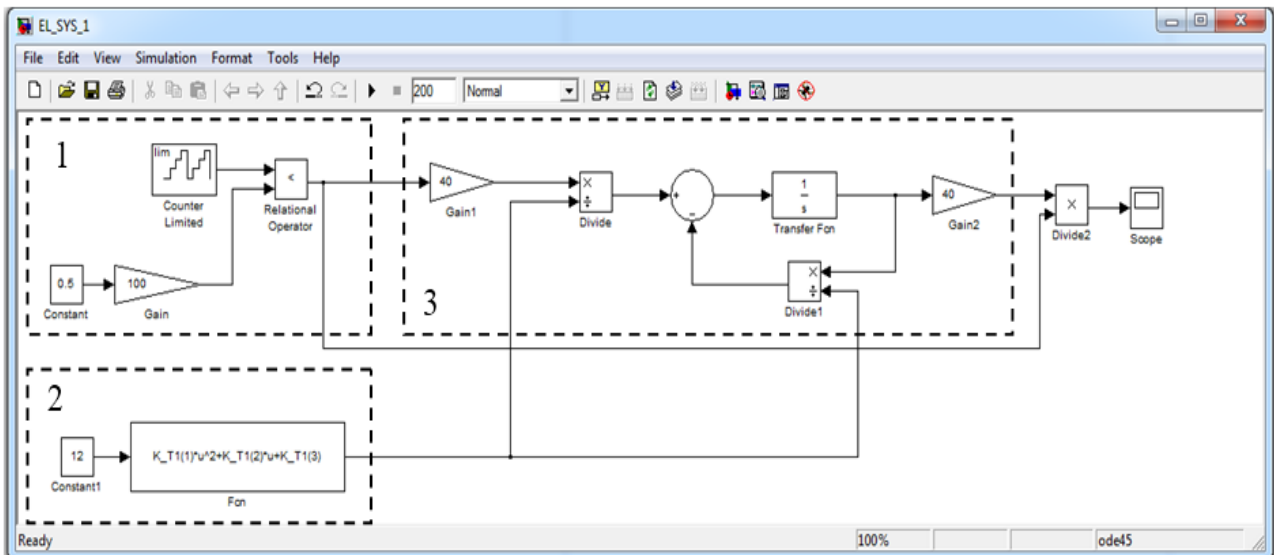


Рис. 3. Структурна схема динамічної моделі, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні перехрестя

Блок “Counter Limited” на рис.3 генерує пилкоподібний сигнал з періодом, що дорівнює періоду світлофорного циклу. Пилкоподібний сигнал порівнюється з константою, що представляє собою час, протягом якого повинне горіти зелене світло у відповідному напрямі. Ця константа формується в результаті

множення частки періоду, коли горить зелене світло, на весь період світлофорного циклу. На рис.3 частка періоду, коли горить зелене світло, складає 0,5, що означає горіння зеленого світла протягом половини періоду світлофорного циклу (тобто 50 с). Порівняння сигналів здійснюється за допомогою блока “Relational Operator”. За умови змінної структури світлофорного циклу константа 0,5 на рис.3 замінюється на змінну, що є параметром іншої локальної моделі (моделі системи керування транспортним потоком).

В моделі на рис.3 також застосовується операція інтегрування сигналу за часом (щоб прискорення транспортного потоку перетворити на його швидкість), яка реалізується за допомогою блока “Transfer Fcn”.

Результат роботи динамічної моделі, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні перехрестя у випадку присутності 12 автомобілів перед перехрестям, показаний на рис.4.

Із рис.4 ми бачимо, що після загорання зеленого світла (нульова та сота секунди моделювання) транспортний потік розганяється до максимально допустимої для дорожніх умов в зоні перехрестя просторової швидкості 40 км/год приблизно за 12 с. Далі протягом 38-ми секунд моделювання спостерігається постійна просторова швидкість транспортного потоку 40 км/год. Після закінчення відповідного такту на 50 та 150 секундах моделювання просторова швидкість транспортного потоку різко знижується до нуля та залишається на цьому рівні, доки на перехресті для напрямку, що розглядається, горить червоне світло.

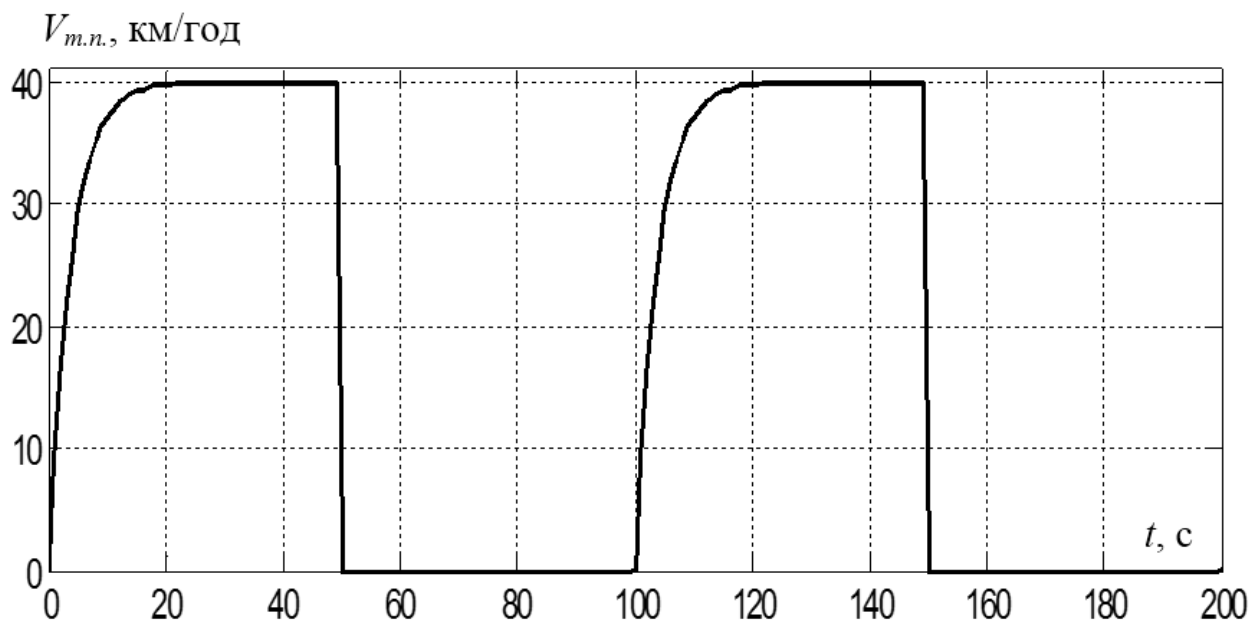


Рис.4. Зміна у часі просторової швидкості транспортного потоку в зоні перехрестя в одному напрямі

Перейдемо від просторової швидкості транспортного потоку до його інтенсивності, прийнявши лінійну залежність між цими характеристиками (інтенсивність потоку розглядається відносно стоп-лінії перед перехрестям):

$$I_{m.n.} = n \cdot \frac{V_{m.n.} \cdot \frac{1000}{3600}}{L_{авт.сер} + 2}, \text{ од./с}, \quad (2)$$

де  $I_{m.n.}$  – інтенсивність транспортного потоку відносно стоп-лінії перед перехрестям, од/с;  $n$  – кількість ліній руху у відповідному напрямі;  $L_{авт.сер.}$  – середня довжина автомобіля у відповідному напрямі, м. Середня відстань між автомобілями протягом всього такту у формулі (2) прийнята незмінною величиною, рівною 2 м.

Зазначимо, що інтенсивність транспортного потоку може стати рівною нулю ще до закінчення такту, коли горить зелене світло, якщо всі автомобілі, що були перед перехрестям у відповідному напрямі, встигли проїхати через стоп-лінію до закінчення такту. Щоб передбачити цей випадок, треба протягом такту результат інтегрування за часом інтенсивності транспортного потоку порівнювати з кількістю автомобілів, що були перед перехрестям у відповідному напрямі. І як тільки результат інтегрування за часом інтенсивності транспортного потоку стане більше кількості автомобілів, що були перед перехрестям, інтенсивність необхідно встановити рівною нулю. Відмітимо, що в кінці кожного світлофорного циклу результат інтегрування за часом інтенсивності транспортного потоку треба скидати в нуль.

На основі динамічної моделі на рис.3, що описує зміну у часі просторової швидкості транспортного потоку в одному напрямі, та з урахуванням формули (2) розроблена модель поведінки транспортного потоку на перехресті в обох напрямках (рис.5).

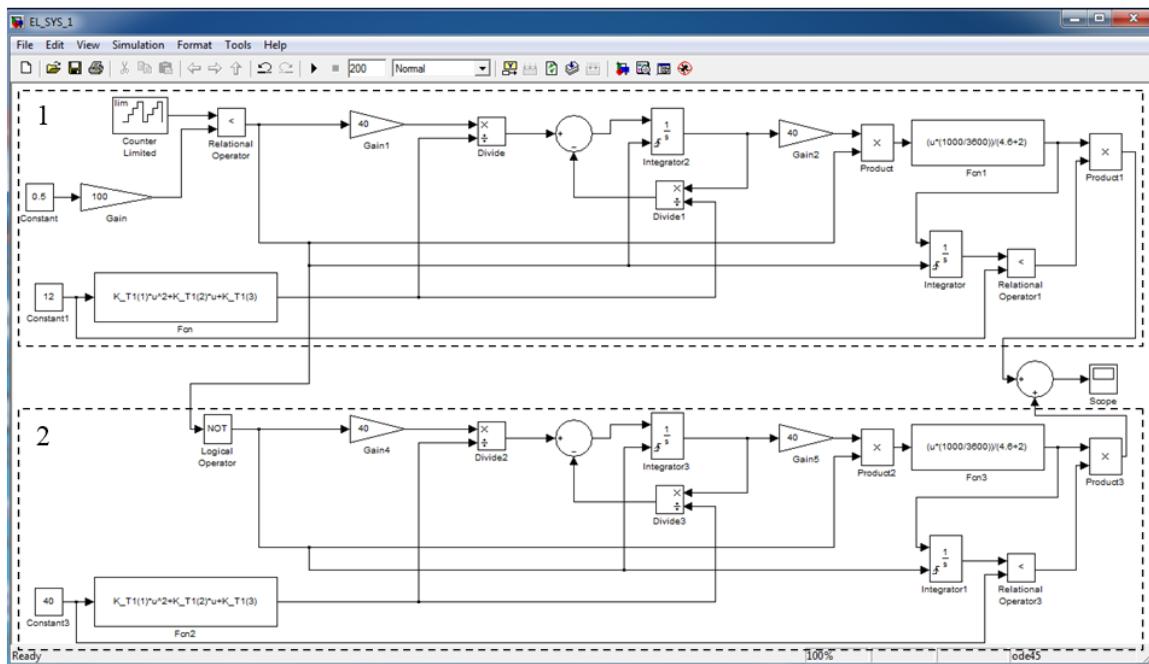


Рис. 5. Структурна схема моделі поведінки транспортного потоку на перехресті в обох напрямках у додатку Simulink математичного пакету MATLAB

Модель поведінки транспортного потоку на перехресті в обох напрямках складається з двох основних частин, що виділені на рис.5 пунктирними лініями. Перша частина формує інтенсивність транспортного потоку для конфліктного напрямку перехрестя, а друга – інтенсивність транспортного потоку для головного напрямку. Для конфліктного напрямку кількість автомобілів перед перехрестям прийнята рівною 12 (блок “Constant1” на рис.5), а для головного напрямку – 40 (блок “Constant3” на рис.5). Оскільки горіння зеленого та червоного світла для головного та конфліктного напрямів носить протифазний характер, керуючим впливом на другу частину моделі є результат інверсії керуючого сигналу на першу частину. Операція інверсії реалізується за допомогою блока “Logical Operator”.

В моделі поведінки транспортного потоку на рис.5 перехід від просторової швидкості транспортного потоку до його інтенсивності за формулою (2) відбувається у блоках “Fcn1” та “Fcn3”. При цьому приймається, що кількість ліній руху для всіх напрямів перехрестя дорівнює двом, а середня довжина автомобіля в обох напрямках складає 4,6 м.

Інтегрування за часом сигналів в кожній із частин моделі на рис.5 здійснюється за допомогою блока “Integrator”. Відмінність даного блоку від блоку “Transfer Fcn” в тому, що його вихідний сигнал можна скидати в нуль за зовнішнім сигналом, яким є керуючий вплив, оскільки він визначає початок кожного нового світлофорного циклу.

Результат роботи моделі поведінки транспортного потоку на перехресті в обох напрямках показаний на рис.6.

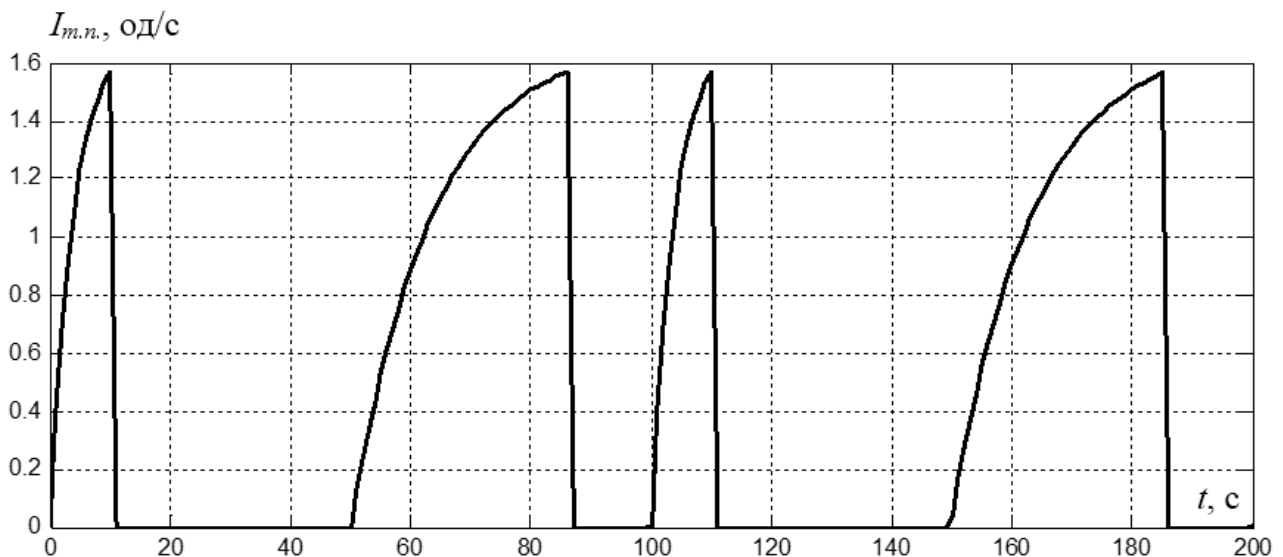


Рис. 6. Зміна у часі інтенсивності транспортного потоку на перехресті в обох напрямках

Із рис.6 ми бачимо, що через значно більшу кількість автомобілів перед перехрестям динаміка росту інтенсивності транспортного потоку у головному

напрямі суттєво повільніша, ніж у конфліктному. Щоб всі автомобілі перед перехрестям перетнули стоп-лінію, для головного напрямку потрібно 37 с, тоді як для конфліктного – 11 с.

Також можна зробити висновок, що за умови знаходження перед перехрестям у конфліктному напрямі 12 автомобілів на цьому напрямі перехрестя спостерігається значний запас за пропускнуою здатністю, оскільки автомобілі конфліктного транспортного потоку проїжджають перехрестя приблизно за 11 секунд. Таким чином, залишається 89 секунд, які можна виділити для пропуску автомобілів головного транспортного потоку через перехрестя (період світлофорного циклу прийнятий 100 с).

**Висновки.** Встановлена залежність постійної часу моделі поведінки транспортного потоку за перехрестям у вигляді динамічної аперіодичної ланки від кількості автомобілів перед перехрестям, що з високою точністю описується квадратичним рівнянням. При цьому максимальне значення абсолютного відхилення точок експериментальної залежності від апроксимуючої кривої не перевищує  $2,7 \cdot 10^{-15}$ , а корінь квадратний суми квадратичних відхилень точок експериментальної залежності від апроксимуючої кривої становить  $2,66 \cdot 10^{-15}$ . Це свідчить про високу точність апроксимації.

Визначену залежність використано для обґрунтування та створення зв'язку між локальною моделлю поведінки транспортного потоку за перехрестям та локальною моделлю формування потоку до перехрестя.

Ще один зв'язок між локальною моделлю поведінки транспортного потоку за перехрестям та локальною моделлю формування потоку до перехрестя запропоновано реалізовувати через порівняння результату інтегрування за часом інтенсивності транспортного потоку через перехрестя та кількістю автомобілів перед перехрестям на різних тактах світлофорного циклу. Коли результат інтегрування за часом інтенсивності транспортного потоку стане більше кількості автомобілів, що були перед перехрестям, це свідчить про проїзд через перехрестя усіх автомобілів, що чекали, і тому інтенсивність необхідно встановити рівною нулю.

#### Перелік посилань

1. Бубликов, А. В., & Таран, І. О. (2017). Створення моделі формування транспортних потоків на основі теорії систем. *Збірник наукових праць НГУ*, (51), 156-164.
2. Lighthill, M. J., & Whitham, F.R.S. (1995). On kinetic waves II. A theory of traffic flow on crowded roads. *Proc. Of the Royal Society ser. A*, 229 (1178), 317 – 345.
3. Мурований, І., & Селезньов, В. (2015). Математичне моделювання транспортних потоків. *Міжнародна конференція “Проблеми з транспортними потоками і напрямі їх розв’язання”* (pp. 33-34). Львів, Україна: Національний університет «Львівська політехніка».

#### АННОТАЦІЯ

**Цель.** Цель заключается в создании типовых компьютерных моделей, имитирующих отдельные и относительно простые процессы формирования транспортных потоков на небольших



участках транспортной сети города. Для этого необходимо обосновать и создать механизмы реализации взаимовлияния между локальными компьютерными моделями, которое является отражением взаимосвязей между элементами сложной транспортной системы в соответствии с теорией систем.

**Методика исследования** заключается в установленных механизмах реализации взаимовлияния между локальными компьютерными моделями транспортных потоков на основе методов моделирования транспортных процессов и теории систем.

**Результаты исследования.** Установлена зависимость постоянной времени модели формирования транспортного потока на перекрестке в виде динамического апериодического звена от количества машин до перекрестка, которая с высокой точностью аппроксимируется квадратичным уравнением. Определенная зависимость используется для обоснования и установления связи между локальной моделью формирования транспортного потока на перекрестке и локальной моделью формирования транспортного потока перед перекрестком. Другую связь между этими моделями предлагается создавать путем сравнения результата интегрирования интенсивности транспортного потока через перекресток с количеством автомобилей перед перекрестком на разных тактах периода светофорного цикла. Когда результат интегрирования по времени интенсивности транспортного потока становится больше количества автомобилей, которые были перед перекрестком, то это свидетельствует о проезде через перекресток всех ожидавших автомобилей, и поэтому интенсивность потока необходимо установить равной нулю.

**Научная новизна** заключается в использовании в сложной модели формирования транспортных потоков в транспортной сети города совокупности простых локальных моделей для описания отдельных транспортных процессов с обоснованием связей между ними на основе теории систем.

**Практическое значение.** Результаты исследований будут использованы для создания сложной модели, описывающей процессы формирования транспортных потоков в городе с целью их анализа и исследования.

**Ключевые слова:** *моделирование, транспортные потоки в городе, локальная компьютерная модель, теория систем*

## ABSTRACT

**Purpose.** The purpose is to create typical computer models simulating separate and relatively simple processes of forming of traffic flows on small sections of the city's transport network. To do this, it is necessary to substantiate and create the mechanisms for realization of mutual influences between local computer models, which are the reflections of interconnections between elements of a complex transport system in accordance with the theory of systems.

**The methodology** of research consists on establishment of the mechanisms for realization of mutual influences between local computer models of transport flows based on methods of simulation of transport processes and theory of systems.

**Findings.** The dependence of the time constant of the model of transport flow formation on the crossroads in the form of a dynamic aperiodic link from the number of cars before the crossroads is established, which is approximated by the quadratic equation with high accuracy. The defined dependence is used to substantiate and establish a connection between the local model of transport

flow formation at the crossroads and the local model of transport flow formation before the crossroads. Another connection between the local model of transport flow formation at the crossroads and the local model of transport flow formation before the crossroads is proposed, to be realized by comparing the result of integration of the intensity of transport flow through the crossroad and the number of cars before the crossroad at the different moments of the period of traffic light cycle.

**The originality** lies in the use in the model of formation of transport flows of a set of simple local models to describe individual transport processes with the justification of the set of connections between them based on the theory of systems.

**Practical implications.** The results of investigations will be used for the creation of the model, that is described the processes of formation of transport flows in city with the aim of their analysis and investigation.

**Keywords:** *simulation, transport flows in the city, local computer model, theory of systems*

УДК 622.831

© А.М. Гайдін

## ПРОВАЛИ

© А. Gaidin

## COLLAPSES

**Мета.** Встановлення зв'язку між руйнуванням підземних порожнин і утворенням провалів земної поверхні з метою прогнозування їх величини і форми. Докладний огляд усіх стадій розвитку провалів, а також різних фізичних та геологічних умов, які цьому розвитку сприяють. Розробка комплексного підходу до вирішення задачі прогнозування деформацій земної поверхні над підземними порожнинами. На основі оцінки ситуації та її змін, застосувати розроблений нами підхід на практиці.

**Методика дослідження** полягає у спостереженні за деформаціями виробок аварійних соляних шахт, провалів земної поверхні поряд з їх фізичним моделюванням. Обстеження гірничих виробок і карстових провалів на земній поверхні, гідро-хімічні опробування шахтних вод. Спостереження за зміною рівня води в стволах шахти, що затоплюється.

**Результати дослідження.** Розглянуто деякі типові схеми, які виявляють зв'язок між руйнуванням підземних порожнин та провалами земної поверхні. В якості прикладу описаний провал над видобувними камерами Стебницького рудника на Львівщині. Встановлені усі необхідні умови, за яких можливі провали земної поверхні та надано наочний огляд стадій розвитку провалів. Розроблено комплексний підхід до вирішення задачі прогнозування деформацій земної поверхні.

**Наукова новизна.** Вперше виявляється зв'язок між розміром і формою провалів земної поверхні та об'ємом підземних порожнин. Встановлена причина того, чому утворення провалу не супроводжується суттєвим землетрусом. Запропоновані формули для визна-