

УДК 338.49

Шевчук Ярослав Васильович

доктор економічних наук, доцент, старший науковий співробітник,
завідувач кафедри товарознавства та комерційної діяльності
Ужгородський торговельно-економічний інституту КНТЕУ

**ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ
SIMULATION OF TRANSPORT SYSTEM**

Анотація. Досліджено застосування сучасних методів імітаційного моделювання для дослідження й обґрунтування розвитку автотранспортної інфраструктури. Розкрито сутність та особливості методу імітаційного моделювання на транспорті. Проаналізовано імітаційні моделі запропоновані зарубіжними та українськими вченими. Акцентується увага на необхідності застосування імітаційного моделювання для поліпшення умов руху міського і громадського транспорту, для оцінки його економічної ефективності. Доведено, що без використання методів імітаційного моделювання неможливе наукове обґрунтування інтеграції автотранспортної інфраструктури міст та регіонів України в сучасні аналогічні світові структури.

Ключові слова: автотранспортна інфраструктура, транспортна система, імітаційна модель, імітаційне моделювання, система імітаційного моделювання транспортного руху, мсто, регіон.

Анотация. Исследовано применения современных методов имитационного моделирования для исследования и обоснования развития автотранспортной инфраструктуры. Раскрыта сущность и особенности метода имитационного моделирования на транспорте. Проанализированы имитационные модели предложены зарубежными и украинскими учеными. Акцентируется внимание на необходимости применения имитационного моделирования для улучшения условий движения городского и общественного транспорта, для оценки экономической эффективности. Доказано, что без использования методов имитационного моделирования невозможно научное обоснование интеграции автотранспортной инфраструктуры городов и регионов Украины в современные аналогичные мировые структуры.

Ключевые слова: автотранспортная инфраструктура, транспортная система, имитационная модель, имитационное моделирование, система имитационного моделирования транспортного движения, мсто регион.

Summary. Investigated the use of modern methods of simulation for research and study of the transport infrastructure. The essence and peculiarities of simulation

modeling method of transport. Analyzed simulation models offered by foreign and Ukrainian scientists. The attention paid to the need for simulation modeling to improve urban traffic conditions and public transport, to assess its cost-effectiveness. Proved that without the use of simulation modeling techniques can not be scientific justification integration of motor transport infrastructure of cities and regions of Ukraine in the modern world similar structure.

Keywords: Transport infrastructure, transport system, simulation model, simulation, system simulation modeling of traffic, vengeance, region.

Потреба у моделюванні міст й регіонів, особливостей протікання процесів у їх межах, з'явилася задовго до появи віртуальних світів у мережі Internet. З розвитком системи планування міської забудови виникла потреба в системі такого моделювання, яке дозволило б оцінювати якість і ефективність нових проектів до їх реального втілення. Ця потреба стимулювала розробку проектів утворення віртуальних копій реальних міст. Подібна реалізація значно спрощує процес аналізу нових проектів і їх оцінки. Можливість накладання нових моделей на існуючий ландшафт дозволяє оцінити взаємний вплив нових будівель і навколишніх об'єктів ще на етапі проектування. Інтерактивні системи, що дозволяють спостерігати результати впливу на міський ландшафт тих чи інших змін, є ефективним засобом планування.

До таких систем відносять і транспортні системи, розвиток яких особливо активізувався в ХХ ст. у результаті поступу економіки, зростання кількості бізнес-структур та активної трансформації середовища міст і регіонів. Імітаційне моделювання актуалізується у зв'язку із збільшенням кількості транспортних засобів, експлуатація яких супроводжується значними фінансовими затратами і забрудненням довкілля.

Оскільки середовище міст і регіонів постійно ускладнюється, то й транспортні проблеми перманентно інтенсифікуються та загострюються. В наш час неможливо проектувати транспортні розв'язки у великих містах без урахування розвитку інфраструктури цих міст. Аналогічне можна сказати і про організацію дорожнього руху. В.О.Іванов зазначає, що саме тому

інтегроване розв'язання таких проблем можливе лише при застосуванні засобів імітаційного моделювання дорожнього руху і впровадженні комплексу математичних моделей, які орієнтовані на вирішення конкретних задач прогнозування і управління дорожнім рухом [7].

На думку експертів, фахівців і науковців системи імітаційного моделювання дорожнього руху, які використовуються на тлі моделювання розвитку міст і регіонів, дозволяють суттєво знизити фінансові витрати на вирішення транспортних проблем.

Імітаційне моделювання використовується і в процесі дослідження розвитку самих міст і регіонів. Найбільш повно результати таких досліджень викладені в роботі Дж. Форрестера «Динаміка розвитку міста» [20].

На сучасному етапі при моделюванні міст використовуються новітні комп'ютерні технології. В новітніх імітаційних моделях користувач отримує можливість майже "реально" помандрувати містами, які віддалені від нього на тисячі кілометрів. Крім того, такі системи моделювання можна використовувати як в розважальних, так і в наукових цілях, проводячи на них дослідження як технічного, так і соціального характеру [1].

Зазначимо, що імітаційне моделювання — це метод, який дозволяє відтворювати процеси та описувати їх за допомогою комп'ютера так, ніби вони відбуваються в реальних умовах, тобто насправді. Імітаційну модель можна «програти» в часі багато разів, вводячи різні дані, що дає можливість отримати достатньо стійку статистику. Імітаційна модель — (у вузькому значенні) логіко-математичний опис об'єкта, який може бути використаний для експериментування на комп'ютері в цілях проектування, аналізу і оцінки функціонування об'єкта.

Отже, імітаційне моделювання — це метод дослідження, заснований на тому, що система, яка вивчається, замінюється імітатором і саме з ним проводяться експерименти з метою отримання інформації про цю систему. Експериментування з імітатором називають імітацією (імітація — це проникнення в суть явища, не вдаючись до експериментів на реальному

об'єкті). Імітаційне моделювання розглядається як окремий випадок математичного моделювання. Існує клас об'єктів, для яких з різних причин не розроблені аналітичні моделі або не розроблені методи розв'язування задач про такі моделі. В цьому випадку математична модель замінюється імітатором або імітаційною моделлю.

Імітаційне моделювання дозволяє інтерпретувати стан транспортної системи у визначений момент часу, що ріднить його з фізичним експериментом [8].

Імітація як метод розв'язування нетривіальних задач отримала початковий розвиток у зв'язку із створенням ЕОМ в 1950х — 1960х роках.

В науковій літературі виділяють наступні різновиди імітації:

- метод Монте-Карло (метод статистичних випробувань);
- метод імітаційного моделювання (статистичне моделювання);
- імітаційне ігрове моделювання;
- агентне моделювання;
- метод дискретного моделювання;
- системна динаміка [8].

Наприкінці ХХ ст. вже цілі групи проєктантів використовували імітаційне моделювання для створення проєктів віртуальних міст. Так, одним з перших проєктів віртуальних міст був проєкт “Virtual Los Angeles”, розроблений групою UST (Urban Simulation Team) Каліфорнійського університету (1994-1995) [24].

База даних цього проєкту мала обсяг порядку 1-2 Гб і при цьому охоплювала площу в 4000 кв. миль. Даний проєкт реалізовувався на основі географічної інформаційної системи ArcView. Розроблена модель потребувала значної обчислювальної потужності апаратних засобів і тому була реалізована на транспортній станції Onyx фірми Silicon Graphics.

За зразком моделі для Лос Анжелеса у 1996-1997 рр. було створено подібні моделі для Філадельфії, Сан Дієго, Лас Вегаса та Санта Барбари. Таким чином група UST, ґрунтуючись на досвіді своєї роботи з віртуальними

моделями міст, сформулювала основні принципи моделювання міських територій [24].

Імітаційне моделювання було використане і при розробці ігрових моделей міст. Так, в 1970 році англійський математик Джон Конвей придумав гру «Життя» (Conway's Game of Life). Вона базується на використанні методу клітинних автоматів (КА). Місце дії цієї гри – «всесвіт» – поверхня, що поділена на клітини, безмежна, обмежена або замкнута. Задача у цій грі полягає в тому, щоб знайти таку первинну конфігурацію, за якої КА еволюціонував би бажаним чином. Всі спроби вирішити цю задачу формально не мали успіху. Тільки досвід і навички при великій кількості спроб можуть допомогти у цій справі.

На базі гри «Життя» розглянуто механізм запровадження властивості антисипації (передбачення) в клітинно-автоматній моделі взагалі. Навіть у межах цієї простої моделі введення антисипації (попередній спосіб розрахунків на початку кожного часового інтервалу) призводить до істотних змін у поведінці системи, результатом яких є поява кількох співіснуючих розв'язків. Типи поведінки, притаманні класичній грі «Життя», справедливі і для антисипаційної версії, хоч тут вони проявляються на рівні множин конфігурацій [11].

На основі правил клітинного автомата «Життя» побудовано декілька варіантів універсальної машини Т'юрінга, яка є абстрактним виконавцем, здатним імітувати всіх інших виконавців, які реалізують процес покрокового обчислення. Кожен з таких кроків обчислення є елементарним. Машина Т'юрінга має лінійну пам'ять, здатну перетворювати вхідні дані за допомогою послідовності елементарних дій [21].

Отже, машина Т'юрінга як клітинний автомат може здійснювати будь-які алгоритмічні обчислення. За допомогою КА «Життя» можна моделювати і сам цей клітинний автомат. При цьому клітини автомата більш високого рівня складатимуться з цілих конфігурацій більш низького рівня.

Існують онлайнові і оффлайнові симулятори гри, які можна реалізувати навіть на мобільних телефонах, в Інтернеті можна знайти цікаву енциклопедію КА «Життя», яка містить 239 анімаційних ілюстрацій [23]. Детальні відомості про гру можна знайти в [3, 19].

Для реалізації гри «Життя», і взагалі КА використовують такі технічні засоби, як САМ6 з картою розширення для ПК, САМ8 із зовнішнім пристроєм для SparcStation; програмне забезпечення: JCASim в Java, SIMP в Python.

На нашу думку, для дослідження автотранспортної інфраструктури більш доцільно використовувати імітаційні моделі транспортних систем.

Вчені констатують, що імітаційне моделювання, лінійне програмування і регресійний аналіз за діапазоном і частотою використання давно і стійко займають три перших місця серед усіх методів дослідження операцій [2]. Завдяки можливості досить повного відображення реальності імітаційне моделювання зручне для дослідження практичних транспортних задач, а саме, для визначення показників ефективності, порівняння варіантів побудови й алгоритмів функціонування транспортної системи, перевірки стійкості режимів системи при малих відхиленнях вхідних перемінних від розрахункових значень [2].

На сьогоднішній день є ґрунтовно розробленими теоретико-методологічні основи імітаційного моделювання транспортних систем. Вони представлені в роботі Томашевського В.М. «Моделювання систем» [17], книзі Томашевського В.Н., Жданової Є.Г. «Імітаційне моделювання в середовищі GPSS» [18], праці Глибовець М.М., Олецького О.В. «Штучний інтелект» [4], дослідженні Томашевського В.Н. «Імітаційне моделювання систем і процесів» [16], навчальному посібнику Ситника В.Ф., Орленка Н.С. «Імітаційне моделювання» [14] та ін.

В науковій літературі описано ряд різних систем імітаційного моделювання транспортних мереж, зокрема AIMSUN, PA-RAMICS,

AUTOBAHN, IHSDM, INTEGRATION, PLANSIM-T, FLEXSYT-II, TRANSIMS, SimTraffic 6, VISSIM та ін. [7].

Подібні системи імітації дорожнього руху розроблені в країнах Західної Європи й Америки, такі, як MITSIM, FRESIM, PHAROS (США), AUTOBAHN, PLANSIM-T (Німеччина), DRACULA, PADSIM (Великобританія), ANATOLL, SIMDAC (Франція) й інші. Вони використовуються, у першу чергу, для поліпшення умов руху міського і суспільного транспорту, а також для оцінки його економічної ефективності [15].

Система імітаційного моделювання транспортного руху AIMSUN – це така система, яка моделює транспортний рух на макрорівні і використовується переважно для моделювання трафіку міських транспортних мереж, автострад і автомагістралей, кільцевих доріг і дорожніх розгалужень. У цій системі, яка забезпечує високий рівень деталізації моделі транспортної мережі, поведінка кожного окремого транспортного засобу моделюється на кожному кроці протягом всього часу моделювання. В системі AIMSUN також можуть бути змодельовані дорожньо-транспортні пригоди та аварійні ситуації тощо. Управління транспортним рухом в AIMSUN здійснюється з використанням дорожніх знаків, адаптивного управління транспортом, котрий має пріоритет руху (швидка допомога, пожежна служба, міліція і т.п.).

Як зазначають І.Яцків, Є.Юршевич та Н.Колмакова, в системі AIMSUN поведінка транспортних засобів визначається функціями від декількох параметрів, що дозволяє моделювати рух різних типів транспортних засобів (автомобілів, автобусів, вантажівок і т.д.) [23]. Система AIMSUN дозволяє проаналізувати переміщення транспортних засобів двома способами (за заданими маршрутами і за конкретним розподіленням потоку), що полегшує здійснення вибору кінцевого рішення.

Наступною системою імітаційного моделювання транспортного руху є система MITSIMLab, яка була розроблена для оцінювання впливу альтернатив проектування систем управління рухом на оперативному рівні.

Вона представляє собою синтез різних моделей і дозволяє здійснювати вибір різних варіантів проектування систем управління рухом, моделювання реакції водіїв на поточну інформацію щодо руху і управляючих сигналів. MITSIMLab об'єднує динамічну взаємодію між системою управління рухом і водіями в мережі. MITSIM дозволяє відслідковувати переміщення транспортних засобів з ряду в ряд, визначати реакцію водія на зміну ситуації на дорозі.

Цікавим є також модуль імітаційного моделювання управління рухом (TMS), який використовує широкий спектр систем управління рухом і маршрутизації («лежачі поліцейські»; засоби управління рухом на швидкісній автостраді; засоби управління рухом на перехрестях; знаки дорожнього руху). Структура TMS дозволяє представляти різні проекти систем з логікою різного рівня складності.

Одним з недоліків системи імітаційного моделювання MITSIM є те, що вона не може бути використана для моделювання великих мереж (мережа доріг великого міста). Для таких цілей більш придатною є система імітаційного моделювання транспортного руху PARAMICS, яка призначена для моделювання транспортних вузлів в містах (перехрестя, що регулюються правилами пріоритету та світлофорами, транспортні розв'язки і т. д), моделювання перевантажених автострад, оптимізації роботи громадського транспорту, з'їздів з автомагістралей, регулювання маршрутів, світлофорів [23].

Модуль імітаційного моделювання системи PARAMICS забезпечує три фундаментальні операції: побудову моделі, імітаційне моделювання трафіка (з 3D візуалізацією) і вивід статистичної інформації з використанням дружнього графічного інтерфейсу користувача. За допомогою моделюючого модуля можуть бути проаналізовані такі елементи транспортної мережі (міська мережа і мережа автострад; правосторонній і лівосторонній рух; управління рухом за допомогою знаків дорожнього руху; ділянка дороги з

круговим рухом; громадський транспорт; паркування машин; ДТП; зміна смуги руху; затори на дорогах) [7].

Ще однією системою імітаційного моделювання транспортного руху є VISSIM – пакет для моделювання трафіку на макрорівні, який може використовуватися для аналізу і оптимізації міських та міжміських транспортних сполучень, а також для моделювати міських перехресть, аналізу пропускної спроможності транспортних систем і тестування схем транзитних пріоритетів [22].

Як зазначає В.Іванов в пакеті VISSIM можна здійснювати вибір між різними типами маршрутизації – статичною і вільною [7].

Недоліком Vissim є те, що за його допомогою можна моделювати обмежену кількість перехресть, залежно від потужності комп'ютера. Час розрахунку залежить від кількості транспортних засобів в транспортній мережі, при зростанні яких модельний час може досягти реального часу [7].

Д.С. Печенежський та В.М. Томашевський обґрунтували підходи до керування автомобільним дорожнім рухом з використанням транспортної моделі. Вони запропонували концепцію створення імітаційного проекту для управління рухом автотранспортних засобів на основі візуального моделювання. При цьому, ними описано архітектуру і принципи функціонування основних компонентів і засоби їх реалізації на основі використання імітатора моделі руху транспортних засобів в умовах застосування технології Java [13].

Імітаційна модель цих вчених значно краща від моделей їх попередників, які імітували дорожній рух достатньо умовно, були доволі неточними та трудомісткими. У цій моделі для імітації дорожнього руху використано мережне уявлення ділянок доріг (граф), організацію керування потоком автомобілів, відтворення особливих ситуацій, маршрутизація транспортних засобів і їх переміщення. При цьому, деталізація імітаційної моделі може змінюватися в залежності від рівнів візуального відображення,

визначених користувачем, що дає можливість моделювати як окремі транспортні засоби, так і потоки автомобілів [13].

Як зазначають творці згаданої імітаційної моделі Д.С. Печенежський та В.М. Томашевський, імітаційний проект є зручним засобом моделювання процесу автомобільного руху на різноманітних ділянках доріг. Він достатньо просто може бути прив'язаний до топографічної карти району, міста або області, тому що імітатор докладно відображає мережі доріг і моделює індивідуальні переміщення транспортних засобів з використанням зміни смуг і логіки сигналів руху. На їх думку, наявність засобів візуалізації дозволяє як будувати саму імітаційну модель ділянок доріг, так і відображати процес переміщення транспортних засобів під час моделювання [13].

Василенко Т.Є., Фесенко Д.В., Дульнявка О.Й. в роботі «Процес імітації функціонування зупиночного пункту сумісної ділянки руху автобусів різних маршрутів» наголошують, що застосування методів імітаційного моделювання для подолання транспортних проблем є актуальною задачею, оскільки воно, на відміну від інших методів, дозволяє відтворити функціонування транспортних процесів за значно коротший час, ніж ці події відбувалися б насправді [2].

Імітаційні моделі часто використовують для дослідження функціонування вантажного автомобільного транспорту. При цьому, увага концентрується на вивченні організаційної виробничої структури автотранспортного підприємства; управлінні виробництвом та ремонтом й обслуговуванням автомобілів; організації роботи технічної допомоги автомобілям на лінії; управлінні складськими запасами автомобільних запасних частин, вузлів і агрегатів; продуктивності станцій технічного обслуговування автомобілів; організації роботи автомобільних майстерень закритих парків спеціальних транспортних машин; технології ремонту автомобільних деталей [12].

Ряд задач вирішується за допомогою імітаційного моделювання і на пасажирському транспорті. Зокрема, важливе значення для практики мають

розробки модуля автоматизованої системи управління пасажирськими автобусними перевезеннями [10].

Імітаційне моделювання є неоцінимим для прокладення руху маршрутних транспортних засобів по вулично-дорожній мережі міста [6]. Його також застосовують для розробки автоматизованих систем оплати проїзду на маршрутах пасажирського транспорту для пільгових категорій громадян і для визначення оптимального місця розташування і функціонування автобусного терміналу як пасажирського логістичного центру [5].

За допомогою імітаційного моделювання прогнозують викиди шкідливих забруднюючих речовин від автотранспортних засобів [9].

Василенко Т.Є., Фесенко Д.В., Дульнявка О.Й. запропонували імітаційну модель, що дозволяє одержати закономірність зміни часу очікування пасажирами автобусів різних маршрутів на сумісній ділянці руху, що, у свою чергу, дає можливість його оптимізувати шляхом імітації (підбору) кількості автобусів, що проходять повз конкретний зупиночний пункт, спочатку в цілому, а потім за кожним маршрутом [2].

Таким чином, очевидно, що імітаційне моделювання автотранспортної інфраструктури має величезне теоретичне і практичне значення. Без його використання неможливе наукове обґрунтування інтеграції автотранспортної інфраструктури України в сучасні аналогічні світові структури, що дозволить суттєво поліпшити організацію дорожнього руху в державі.

Література:

1. Бабков В. С. Створення реалістичних моделей міських ландшафтів / В.С. Бабков. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://masters.donntu.edu.ua/2001/fvti/babkov/dis/article.htm>
2. Василенко Т. Є. Процес імітації функціонування зупиночного пункту сумісної ділянки руху автобусів різних маршрутів /Т.Є. Василенко, Д.В.Фесенко, О.Й. Дульнявка. // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. – 2009. - № 2(9). С. 164 – 171.
3. Гарднер М. Крестики-нолики / М. Гарднер. – М. : Мир, 1988. – С. 287-343.

4. Глибовець М. М. Штучний інтелект / М.М. Глибовець, О.В. Олецький. – К. : Вид.дім «КМ Академія», 2002. – 366 с.
5. Громуле В. Автобусний транспорт як важнейший елемент транспортної інфраструктури / В. Громуле, І. Яцків // Transport (Транспорт). — Vilnius: Technika, 2007. — Т. 22. — № 3.— Р. 200-206.
6. Давидіч Ю. О. Теоретичні основи ергономічного забезпечення автотранспортних технологічних процесів: автореф. р. на здобуття наук. Ступеня канд. фіз.-мат. наук: спец. 05.22.01 «Транспортні системи» / Ю.О. Давидич; Харківська національна академія міського господарства. — Харків, 2007. — 39с.
7. Іванов В.О. Розподілена система імітаційного моделювання дорожнього руху. // Вісник НТУУ «КПІ» Інформатика управління та обчислювальна техніка. – 2008. - № 48 С. 41 – 45.
8. Імітаційне моделювання. Матеріал з Вікіпедії — вільної енциклопедії. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://uk.wikipedia.org/wiki>
9. Кравченко Е.А. Методологические подходы научно-технического прогнозирования экологической безопасности автобусного транспорта в муниципальных образованиях транспорт зон / Кравченко Е.А., Кравченко А.Е. // Вестник Кубанского государственного технологического университета. — 2003. — № 8.
10. Лахно В.А. Использование объектно-ориентированных языков программирования для проектирования АСУ пассажирскими перевозками / В.А. Лахно, А.И. Пилипенко // Штучний інтелект Луганський національний аграрний транспортний. — 2004. — №4. — С. 201-210.
11. Макаренко О. С. Модель клітинного автомата з антиципацією / О.С. Макаренко, Д.А. Крушинський, Б.І. Гольденгорін // Наукові вісті «КПІ». – 2009. – № 1. – С.30-35.
12. Моделирование случайных транспортных процессов и транспортных потоков: метод. Указания к работе: в 2 ч. Ч.2. / сост.: С.И. Коновалов, В.В. Савин; Владим. Гос. Ун-т. — Владимир: Ред.-издат. Комплекс ВлГУ, 2004. — 52 с.
13. Печенежський Д.С., Томашевський В.М. Керування автомобільним транспортом з використанням транспортних моделей. // Имитационное моделирование систем – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.simulation.org.ua/show.php?mode=prj&file=proj001.html&id=1>
14. Сытник В. Ф. Имитационное моделирование: Учебно-методич. Пособие / В.Ф. Сытник, Н.С. Орленко - К. : КНЕУ, 1999. – 208 с.
15. Теленик С. Ф. Концепция моделирования и управления движением транспортных средств / С.Ф. Теленик, В.Н. Томашевський //Автомобильный транспорт. – Сб. Науч. Трудов. Вып. 1, 1998. – Харьков: ХГАДТУ, 1998. - С. 98-100.

16. Томашевский В. Н. Имитационное моделирование систем и процесс сов / В.Н. Томашевський. – К. : ІСДО, «ВІПОЛ», 1994. – 124 с.
17. Томашевський В. М. Моделювання систем / В.М. Томашевський – К. : «Вид. ра. БХВ», 2005. – 352 с.
18. Томашевский В. Н. Имитационное моделирование в ранс GPSS / В.Н. Томашевський, Е.Г. Жданов. – М.: Бестселлер, 2003. – 416 с.
19. Тоффоли Т. Машины клеточных автоматов / Т.Тоффоли, Н. Марголуc. – М. : «Мир», 1991. – 280 с.
20. Форрестер Дж. Динамика развития города: Пер. С ранс. – М.: Прогресс, 1974. – 281 с.
21. Хопкрофт Дж., Мотвани Р, Ульман Дж. Глава 8. Введение в рансп машин Тюринга // В ра.: Введение в рансп автоматів, языков и расчетов (Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation). – М.: Вильямс, 2002. –528 с.
22. Шевчук Я.В. Автотранспортна інфраструктура: теорія і методи сучасних регіональних досліджень. Монографія. – Ужгород: Видавництво ТзОВ «Ліга-Прес», 2011. – 450 с.
23. Яцкив И. В. Использование возможностей имитационного моделирования для анализа транспортных узлов И.В. Яцкив, Е.А. Юршевич, Н.В. Колмакова [Электронный ресурс] // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД 2005): Материалы второй Всероссийской научно-практической конференции по вопросам применения имитационного моделирования в промышленности. (19-21 октября 2005 г, Россия, Санкт-Петербург) (<http://www.gpss.ru/immod05/s3/yackiv/>).
24. Eric Weisstein's Treasure Trove of the Life Cellular Automata. – <http://www.ericweisstein.com/encyclopedias/life/>
25. R.Liggett, S. Friedman, W. Jepson, Interactive Design/Decision Making in a Virtual Urban World: Visual Simulation and GIS, 1996 (<http://www.aud.ucla.edu/~robin/ESRI/p308.html>).

