

ДИНАМІЧНІ МОДЕЛІ РОЗВИТКУ МІСТ І РЕГІОНІВ ЯК СЕРЕДОВИЩА ФОРМУВАННЯ АВТОТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Шевчук Я.В.

Розглянуто розроблені зарубіжними дослідниками динамічні моделі, які можуть використовуватись для дослідження розвитку міст і регіонів як середовища формування та функціонування автотранспортної інфраструктури. Враховуючи позитивні результати, отримані в процесі їх використання в інших країнах світу та очікуване зростання обсягів розбудови автотранспортної інфраструктури в Україні, пропонується адаптація таких моделей до сучасних вітчизняних умов.

Ключові слова: автотранспортна інфраструктура, динамічна модель, система динаміка, моделювання.

Автотранспортна інфраструктура формується, будується і розвивається у зовнішньому по відношенню до неї середовищі, яким є міста і регіони. Для того, щоб визначити оптимальну потужність автотранспортної інфраструктури, важливо знати закони і закономірності розвитку міст і регіонів, зокрема розміщення в них населення та місць прикладання праці, потреби населення і працівників у рівні розвитку автотранспортної інфраструктури, тощо. Такі закони і закономірності вивчаються в процесі побудови моделей їх розвитку. У ХХ ст. з цією метою широко почали застосовуватися динамічні моделі.

Питаннями використання динамічних моделей для оцінки прогнозування розвитку міст і регіонів, а також світової економіки займалися такі всесвітньо відомі вчені, як Дж.Форрестер, М.Месарович, Д.Медоуз, Е.Пестель, А.Еррера, Я.Кайя, Х.Ліннеманн, Я.Тінберген, В.Леонтьєв та ін. Динамічні моделі народного господарства на постсоціалістичному просторі досліджував А.Гранберг. В Україні моделюванням економічної динаміки займалися харківські вчені Новожилова М.В., Коюда П.М. Але, у вітчизняній економічній науці динамічні моделі для дослідження міст і регіонів використовуються недостатньо через брак коштів на фінансування подібних досліджень. Разом з тим, цей напрямок є важливим і перспективним, що потребує переоцінки зарубіжної і вітчизняної наукової спадщини у цій площині.

Метою статті є узагальнення і аналіз динамічних моделей, які використовувалися для вивчення міст і регіонів, та окреслення можливостей їх застосування для формування автотранспортної інфраструктури у середовищі міст і регіонів. При цьому, акцентується увага на необхідності адаптації таких моделей до українських умов.

Загальновідомо, що динамічна модель – це модель системи, у якій відбуваються зміни через виникнення подій у часі або рух об'єктів у просторі. Під динамічними моделями в економіці розуміють моделі економічних систем в яких відображаються їх зміни в часі, тому час в цих моделях представлений явно (як неперервна або як дискретна величина) скінченням набором чи нескінченною послідовністю дискретних значень. У першому випадку для величин (відомих і невідомих), що змінюються в часі, застосовують звичайні позначення як для математичних функцій [4]. Динамічні моделі стали справжнім проривом у дослідженні міст і регіонів. Так, у 1960-х роках Дж.Форрестер, американський кібернетик, провідний теоретик і практик соціального моделювання із використанням комп'ютерних технологій висунув ідею відображення розвитку міського середовища в динамічних моделях. Ця ідея перманентно розвивалася ним у роботах «Індустріальна динаміка» (1961), «Принципи систем» (1968), «Динаміка розвитку міста» (1969), «Світова динаміка» (1971). Дж.Форрестеру вдалося розробити методологію міждисциплінарних досліджень складних динамічних систем - системну динаміку, що стала фундаментом глобального моделювання.

На думку Дж.Форрестера, без застосування динамічних моделей неможливо досліджувати соціальні системи, які, як він вважає, належать до класу складних контрінтуїтивних нелінійних систем з численними зворотними зв'язками. Людині складно простежити, як функціонують соціальні системи і які наслідки можуть впливати з неточно сформульованої мисленої моделі. Отже, як підкрес-

лює Дж.Форрестер, будь-які спроби традиційного теоретичного осмислення і практичного вирішення нагальних проблем виходять з-під контролю цивілізації. А тому, розвинувши ідею У.Р. Ешбі, він наголошує про необхідність використання кібернетичного підсилювача розумових здібностей людини при аналізі зазначених процесів.

Унікальною є динамічна модель світу, яка обґрунтована ним у «Світовий динаміці», де Дж.Форрестер пропонує розглядати світ як єдине ціле, складну систему різних взаємопов'язаних рівнів (шести фазових змінних): населення, фондів у промисловості, фондів у сільському господарстві, природних ресурсів, забруднення навколишнього середовища і часу. Абсолютними величинами є, з точки зору цього вченого, кількість населення і час.

Ще одним унікальним досягненням Дж.Форрестера є формулювання теорії «меж зростання», у якій спрощено відображена реальна світова економічна ситуація, що моделюється не як економічний розвиток, а як екстенсивне зростання. Таке моделювання дозволило зробити висновок про те, що екстенсивне зростання не може тривати нескінченно, тому що має «фізичні межі». Окрім того, на його думку, екстенсивне зростання є суперечливим за своїм характером. Адже, природні ресурси не здатні зростати, кількість земель, придатних для сільськогосподарського обробітку, обмежена; врожайність, економія сировини та матеріалів зростають у арифметичній прогресії, в той час як населення, споживання і забруднення середовища - у геометричній. Дж.Форрестер вважає, що пік життєвого рівня був необоротно пройдений людством в середині 1960-х рр. Згідно з його розрахунками, при збереженні експоненціального характеру росту основних параметрів економічного організму в середині наступного століття наступить неминуча криза у взаєминах суспільства і природи. На думку вченого, інерційність біосферних процесів приховує масштаб кризи, що наближається, в ході якої три чверті населення Землі вимре «природною» смертю від голоду, епідемій і забруднення середовища. Катастрофічні зміни відбудуться в житті найближчих поколінь. «Відстрочка» катастрофи можлива на 20-30 років, за умови зміни граничної чисельності населення. Отже, очевидно, що Дж.Форрестер розглядає функціонування світової системи як стихійний процес, будь-свідоме втручання в який представляється ним як фактор, дестабілізуючий стійкість системи. При виборі альтернатив майбутнього розвитку людства між деградацією соціуму і середовища та тотальною регламентацією народжуваності, темпів споживання і виробництва, що ставлять під сумнів саму можливість особистої свободи, Дж.Форрестер віддає перевагу іншому варіанту. Розв'язання ситуації, що склалася він розуміє, за аналогією з еволюцією природних популяцій, як самостійний вихід суспільства з кризи в результаті переходу на деякий вищий рівноважний рівень. Головний висновок Дж.Форрестера полягає в необхідності узгодження людської діяльності з можливостями біосфери. Зрівноваженого функціонування суспільства можна досягнути через стабілізацію чисельності населення, при якій використовуються вдосконалені механізми планування, і через застосування нових технологій, котрі сприяють самоочищенню та самовідновленню середовища.

Вихідні методологічні принципи глобального моделювання, розроблені Дж.Форрестером, були покладені в основу проектів М. Месаровича, Д. Медоуза, Е. Пестеля, латиноамериканського проекту А. Еррери, проектів Я. Кайя, Х. Ліннеманна, Я. Тінбергена, В. Леонтьєва. Ці проекти можливість зрозуміти роль і місце автотранспортної інфраструктури у стихійному екстенсивному зростанні економіки та важливості її вивчення за допомогою динамічних моделей.

На нашу думку, при використанні динамічних моделей у дослідженні автотранспортної інфраструктури в першу чергу слід звернути увагу на фундаментальну працю Дж.Форрестера «Динаміка розвитку міста» [7], в якій відображені підходи до оцінки міста, як середовища функціонування різних систем, у тому числі і автотранспортної інфраструктури. В цій праці він оперує поняттям «системна динаміка», яке широко використовується і в інших роботах [8, 17]. При цьому, під системною динамікою він розуміє напрям у вивченні складних систем, в рамках якого досліджується їх поведінка в часі і просторі залежно від структури елементів системи та взаємодії між ними, зокрема причинно-наслідкових зв'язків, петель зворотних зв'язків, затримок реакції, впливу середовища тощо.

Системна динаміка – це імітаційне моделювання, що дозволяє зрозуміти структуру і динаміку складних систем. Системна динаміка – це також метод моделювання, що використовується для створення точних комп'ютерних моделей складних систем для подальшого використання з метою

проектування ефективнішої організації і політики взаємин з даною системою. Ці інструменти дозволяють створювати мікросвіти-симулятори, де простір і час можуть бути стислими і сповільненими так, щоб ми могли вивчати наслідки наших рішень, швидко засвоювати методи і розуміти структуру складних систем, розробляти тактику і стратегію для одержання для більшого успіху [6].

Системна динаміка, головним чином, використовується у довготривалих, стратегічних моделях і приймає високий рівень абстракції. Люди, продукти, події та інші дискретні елементи представлені в моделях системної динаміки не як окремі дискретні елементи, а як система в цілому [6].

До методів системної динаміки належать причинно-наслідкові та потокові діаграми. Існує дві точки зору з приводу того, який з методів має застосовуватись першим. Джон Стерман притримується порядку: потокові діаграми - а потім вже причинно-наслідкові діаграми. Денніс Медоуз же пропонує зворотній порядок [5].

Зазначимо, що для вивчення функціонування автотранспортних об'єктів (підприємств і організацій) важливим є розуміння філософії системної динаміки, яка базується на припущенні, що поведінка (або історія розвитку в часі) організації головним чином визначається її інформаційно-логічною структурою. Вона відображає не лише фізичні і технологічні аспекти виробничих процесів, але, що набагато важливіше, політику і традиції, які явно або неявно визначають процес ухвалення рішень в організації.

Інший аспект філософії системної динаміки полягає в припущенні, що організація ефективніше представляється в термінах, що лежать в основі її потоків, ніж в термінах окремих функцій. Потоки людей, грошей, матеріалів, заявок і устаткування, а також інтегрованих потоків інформації можуть бути виявлені у всіх організаціях. Спрямованість на поточкову структуру заставляє аналітика природним чином долати внутрішньоорганізаційні кордони.

До позитивів моделі належать:

- можливість відображати практично будь-який причинно-наслідковий зв'язок;
- проста математична форма;
- використання термінології, синонімічної мови економіки і виробництва.
- доступність для використання фахівцями, що не володіють високою кваліфікацією в області математики і програмування;
- можливість швидко прораховувати різні варіанти майбутнього (моделювати сценарії), змінюючи вихідні дані, отримані експертним шляхом;
- виявлення найбільш критичних чинників (наприклад, що важливіше: динаміка цін на сировину або конкурентоспроможність продукції конкурентів?), отже, можна ранжувати за мірою важливості погрози і можливості, що з'являються в модельованому середовищі;
- використання великої кількості причинно-наслідкових зв'язків між елементами імітаційної моделі, які об'єктивно існують в модельованому середовищі (наприклад, зростання курсу долара (причина) а зменшення об'єму імпорту і збільшення експорту (наслідок) тощо).

Наведемо тлумачення системної динаміки як методу стимуляційного моделювання [3], який включає:

- структуризацію об'єкту;
- побудову системної діаграми об'єкту, де вказуються зв'язки між елементами;
- визначення змінних для кожного елемента і темпів їх зростання;
- прийняття гіпотез про залежності кожного темпу зростання від змінних і формальний опис цих гіпотез;
- процес оцінки введених параметрів за допомогою наявної статистики [3].

Для побудови і дослідження моделей за допомогою методу системної динаміки Дж. Форрестер розробив спеціальну мову програмування DYNAMO і застосував її в повній мірі в роботі «Динаміка розвитку міста» [7].

Модель Дж. Форрестера включає такі елементи:

- рівні (ресурси):
- потоки, що переміщують вміст одного рівня до іншого;
- функції рішень, які регулюють темпи потоку між рівнями;

– канали інформації, що сполучають функції рішень з рівнями [3].

Рівні характеризують накопичення усередині системи, що виникають. Це можуть бути заготовки, комплектуючі і готова продукція, страхові міжопераційні запаси, виробничі площі, чисельність працюючих, фінансові ресурси тощо. Це може бути й інформація про складові автотранспортної інфраструктури, потужність її окремих об'єктів, кількість працюючих на них та ін. Кожен рівень описується його змінною величиною, залежною від різниці потоків, що входять і виходять. Темпи визначають існуючі миттєві потоки між рівнями в системі і відображають роботу, тоді як рівні вимірюють стан, якого система досягає в результаті виконання деякої роботи.

Функції рішень (або рівняння темпів) є формулюванням правила поведінки, що визначає, яким чином наявна інформація про рівні приводить до вибору рішень, пов'язаних з величинами поточних темпів.

Базова структура моделі Дж. Форрестера представлена лише одною мережею з елементарною схемою інформаційних зв'язків між рівнями і темпами. Для відображення, наприклад, діяльності одного автотранспортного чи промислового підприємства, необхідно декілька взаємозв'язаних мереж. Виділяють шість типів мереж, які представляють істотно різні типи змінних: замовлення, матеріали, грошові кошти, робочу силу і устаткування, з'єднаних воєдино за допомогою мережі інформації. Будь-яка з цих мереж може бути розбита ще на декілька окремих частин. Інформаційна мережа служить для останніх мереж з'єднувальною тканиною. Вона переносить інформацію від рівня до точок рішень, а також інформацію про темпи в двох мережах до рівнів у мережі інформації. У самій мережі інформації теж існують рівні і темпи. Наприклад, інформація про фактичний поточний темп в потоці матеріалів усереднюється для визначення рівня середнього темпу потоку матеріалів. Цей рівень відноситься до мережі інформації [7].

Програмними засобами, що реалізують модель Форрестера, є AnyLogic, VenSim, PowerSim [2], Stella, ModelMaker тощо. Для побудови моделей за їх допомогою використовується графічне представлення залежностей змінних у вигляді так званих «stock and flow diagrams».

В основі системної динаміки лежить ствердження, що поведінка системи часто залежить настільки ж від її структури (множини замкнених зв'язаних взаємодій складових компонентів, що часто запізнюються), наскільки і від самих елементів. Зазначимо, що використання системної динаміки може дати різні результати. Адже, основною проблемою системного динамічного моделювання складних систем є те, що всі соціально-економічні системи при недостатній і «розмитій» інформації про їх функціонування, не дозволяють створити адекватні їм моделі (Pitfalls of Simulation) [16]. Завдання такого моделювання виходить за рамки формальних постановок і вимагає застосування експертних методів рішення. Основою кожної системи, що використовує експертні знання, є концептуальна модель предметної області. Концептуальна модель необхідна для переходу від неформальних знань експертів до формального опису цих знань, що допускає єдину інтерпретацію [1].

Незважаючи на складність і трудомісткість динамічних моделей при дослідженні автотранспортної інфраструктури, вважаємо що їхнім використанням не варто нехтувати. Але, можливо більшу увагу звернути на використання таких динамічних моделей, які поєднані з КА-моделюванням та ГІС. Так, до КА-моделей з використанням ГІС на базі системної динаміки відноситься модель LEAM (Land Use Evolution and impact Assessment Model), яка розроблена в університеті штату Іллінойс (США) на початку 2000-х років групою дослідників. Створення такої моделі ініціювали Брайян Дел (Brian Deal) і Варкі Паллатучеріл (Varkki Pallathucheril) [15]. Теоретичною базою LEAM є інтеграційний, мультидисциплінарний, екологічний та інженерний підходи до моделювання просторової і системної динаміки.

При розробці моделі використовувалась робота Р. Парка і Е. Баргесса, яку було опубліковано ще у 1925 році і яка ґрунтувалась на статичній структурній моделі та теорії екологічної рівноваги.

Відтак, передвісником моделі LEAM були модельна система SME (Spatial Modeling Environment), яка ґрунтується на піктографічних зображеннях і не є складною в комп'ютерному аспекті [14], а також на математичному інструменті STELLA?, розробленому на базі системної динаміки Дж. Форрестера. Згідно з моделлю SME, просторовий регіон розбивається на клітини, які подібні ком-

іркам решітки GIS. Поведінку кожного клітинного об'єкта, яку називають також локальними правилами, описують за допомогою STELLA?. В системі дві клітини пов'язані між собою, відтак, між собою пов'язуються і всі клітини. Одержана система є основою для роботи клітинного автомата.

В моделі використовують мапи землекористування від Національної класифікаційної системи землекористування (National Land use Classification System, NLCD MAP). Потім модель STELLA розраховує імовірність розвитку (DEV PROBABILITY) кожної клітини на кожному часовому кроці. Імовірність зміни клітини, яка трансформується від існуючого стану (LU A) до альтернативи землекористування (LU B), залежить від зміни CHANGE та її асоційованої імовірності зміни (DEV PROBABILITY), які розраховуються на кожній ітерації. Для розрахунку ймовірностей використовуються ланцюги Маркова. На кожній ітерації кожна комірка обраховується на предмет можливості переходу її в одну з трьох чітких категорій, наприклад: житлове використання землі, торгівельне, промислове чи автотранспортне або відкритий простір. Відповідно модель прораховує імовірності таких переходів.

Модель LEAM здатна проводити чотири симуляції типу «what if» («що буде, якщо»): міський розвиток, спонтанний розвиток, дифузійний розвиток і органічний розвиток. Виконання досліджень в ряді регіонів США привели до збільшення сценаріїв розвитку і відповідного ускладнення моделі. Перш за все це стосується державної політики або великих державних інвестицій в тому чи іншому регіоні. В сценарії включено вплив транспортних інвестицій на розвиток сільського господарства, лісоохорону тощо.

При розробці моделі LEAM було взято до уваги обмеження, які існують в міському моделюванні і є проблемами, а саме: а) відсутність незалежних теоретичних пояснень можливості підтримки системи міського комплексу; б) слабкість програміста, який виконує всю роботу; в) труднощі масштабування, тобто переходу симуляції від малого до великого регіону; г) відсутність зворотного зв'язку і підтримки питань «so-what» («ну так що з цього?»), які асоціюються зі змінами в міських агломераціях.

Першу проблему, на думку авторів, моделі потрібно вирішувати за допомогою теорії міської екології, яка заснована на ієрархічній динаміці структур, інкорпорації, рівноваги і теорії різноманітності. Другу проблему, потрібно розв'язувати групою незалежних програмістів, хоча це приведе до зростання витрат. Третю проблему потрібно вирішувати розбиттям великого регіону на маленькі, які за масштабом еквівалентні масштабу району, на якому відпрацьовувалась стандартна модель. Нарешті, модель потребує доопрацювання шляхом введення позитивних або негативних зворотних зв'язків для поглиблення рівня досліджень, щоб питання типу «ну так що?» не виникали.

Зазначимо, що сьогодні теоретичною основою моделі є регіональна економетрична модель «вхід-вихід», у якій одночасно одержують два тренди: економічний і популяційний. Таку модель апробували для оцінки просторового розвитку міста Сент-Луїс, який знаходиться на границі штатів Іллінойс і Міссурі (США). Для симуляційного моделювання були використані дані з 1970 по 2000 роки. За цей період населення міста зросло на 7 %, а площа урбанізації збільшилась на 125%¹. Така різниця пояснюється тим, що значна частина населення міста для проживання обирала приміську зону.

Після виконання симуляційних досліджень за умов і тенденцій, що склались у регіоні протягом 1970-2000 років, автори моделі висловили гіпотезу, що через ріку Міссісіпі буде побудовано новий міст, який різко змінить транспортні потоки і мережу шляхів. Внаслідок цього зміняться економічні і житлові ареали. Вирішено провести дослідження за сценарієм, який одержав назву «Новий міст». Дослідження виконувались в два етапи. На першому етапі від 2000 до 2007 року прогнозувався розвиток за попереднім сценарієм (міст тільки будувався), а на другому в симуляційні дослідження додавались нові транспортні умови.

Крім досліджень регіону Сент-Луїс, автори моделі провели ще низку досліджень, результати яких опубліковані в [9, 10, 11, 12]. З наведених результатів можна бачити практичну цінність LEAM-моделі для обґрунтування розвитку автотранспортної інфраструктури.

ВИСНОВКИ

На жаль, в Україні динамічні моделі, які представлені вище, недостатньо використовуються при проектуванні автотранспортної інфраструктури. Але, при розгортанні у найближчій перспективі будівництва нових автодоріг, автотранспортних розв'язок, мостів та тунелів зарубіжний досвід може мати величезне значення і практичне застосування. Наголосимо, що при цьому такий досвід використання динамічних моделей слід адаптувати до вітчизняних умов.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Горохов А. В. Инструментальная система поддержки создания концептуальных моделей сложных систем и синтеза адекватных им динамических моделей / А. В. Горохов, С.А. Фаныгин. // Системы управления и информационные технологии/ Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 9. — Воронеж: Центрально-Черноземное книжное издательство, 2002. — С.54-57.
2. Евсюхина К. Работа с пакетом динамического моделирования Powersim (версия 2.01). / К. Евсюхина, М.Чесалова. — М.: ТОРА-ИнфоЦентр, 1998. — 136 с.
3. Макроэкономическое моделирование. : [Електрон. ресурс]. — Режим доступа: fevt.vstu.ru/files/materials/TOAY/lec4_3.doc
4. Моделювання економіки. Динамічні моделі. Словопедія.: [Електрон. ресурс]. — Режим доступу: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:xBOd—J166EJ: slovopedia.org.ua/53/53396/363007.html>
5. Системна динаміка.: [Електрон. ресурс]. — Режим доступу: <http://uk.wikipedia.org/wiki/>
6. Системная динамика.: [Електрон. ресурс]. — Режим доступу: <http://www.xjtek.ru/anylogic/approaches/systemdynamics/>
7. Форрестер Дж. Динамика развития города: Пер. с англ. — М.: Прогресс, 1974. — 281 с.
8. Форрестер Д. Основы кибернетики предприятия (Индустриальная динамика): пер. с англ. — М.: Прогресс, 1971. — 340 с.
9. Deal B., Pallathucheril V.G., Sun Z., Terstriep J., Hartel W. LEAM Technical Document. Overview of LEAM Approach, 2005.: [Електрон. ресурс]. — Режим доступу: http://www.lead.uiuc.edu/gLEAM/report/LEAM_Model_Technical.pdf
10. Deal B., Schunk D. Spatial Dynamic Modeling and Urban Land Use Transformation: A Simulation Approach to Assessing the Costs of Urban Sprawl // Ecological Economics. — 2004. — V. 51. — P. 79-95.
11. Deal B. Ecological Urban Dynamics: the Convergence Spatial Modeling and Sustainability // The Journal of Building Research and Information. — 2001. — V. 29. — P. 381-393.
12. Deal B., Fournier D. Ecological Urban Dynamics and Spatial Modeling // in The proceedings of the American Council for an Energy Efficient Economy Summer Study on Efficiency and Sustainability. — Monterey, CA., 2000.
13. Joseph G. Whelan (Prepared for the MIT System Dynamics in Education Project Under the Supervision of Prof. Jay W. Forrester). Modeling Exercises. Section 2.: [Електрон. ресурс]. — Режим доступу: sysdyn.clexchange.org/sdep/Roadmaps/RM7/D-4451-3.pdf
14. Maxwell T., Costanza R. An open geographic modeling environment // Simulation. — 1997. — V. 68. — P. 175-185.
15. Sun Zh., Deal B., Pallathucheril V.G. The Land-use Evolution and Impact Assessment Model: A Comprehensive Urban Planning Support System (Version 2/8/05). : [Електрон. ресурс]. — Режим доступу: http://www.urisa.org/publications/journal/articles/the_land_use_evolution
16. Sterman J. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. — McGraw-Hill, 2000. — 982 p.
17. Forrester J. W. Urban Dynamics. — Cambridge, Massachusetts: M.I.T. Press, 1970; Форрестер Дж. Динамика развития города: пер. с англ. — М.: Прогресс, 1974. — 281 с.