

УДК 004.94

В. Б. Мокін, д-р техн. наук, проф.;**О. В. Гавенко**, асп.

ТЕХНОЛОГІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У БАГАТОЗВ'ЯЗНИХ ПРОСТОРОВО- РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ

Запропоновано нову інформаційну технологію автоматизованої побудови інформаційної моделі для моделювання процесів у БПРС, що дозволяє здійснювати їх моделювання з урахуванням різних математичних співвідношень і залежностей між атрибутивними та просторовими параметрами системи та з урахуванням різних комбінацій цих параметрів і шарів ГІС.

1. Постановка задачі

Однією з найактуальніших проблем сьогодення є моніторинг стану та оптимального управління процесами у багатозв'язних просторово-розподілених системах (БПРС) таких як: транспортні системи, річкові системи, енергетичні системи, телекомунікаційні мережі, трубопроводи тощо [1, 2]. Інформація про числові, текстові та інші (атрибутивні) характеристики зберігається в реляційних базах даних (БД), а просторові характеристики формалізуються як шари геоінформаційних систем (ГІС), в яких векторні об'єкти пов'язуються з атрибутивними характеристиками у БД. Ці об'єкти також можуть мати певні обмеження на топологію їх елементів та формалізуватись у ГІС як геометричні мережі [3].

Для синтезу оптимального управління необхідною є побудова математичних моделей процесів у БПРС, що і стало темою величезної кількості робіт. Однак багатозв'язність систем, яка означає наявність великої кількості залежностей та зв'язків між параметрами різних складових цих систем, суттєво ускладнює процес моделювання. Під залежністю розуміється певна математична модель чи алгоритм, за яким один вихідний параметр обчислюється за одним чи багатьма іншими параметрами. Наприклад, під час моделювання середньої швидкості руху транспортного засобу у вулично-дорожній мережі міста можуть враховуватись різні комбінації параметрів об'єктів, в залежності від необхідної точності моделювання, що прямо чи опосередковано впливають на середню швидкість руху: довжина перегонів мережі, стан дорожнього покриття, фази роботи світлофорних об'єктів, інтенсивність та пропускна здатність транспортної мережі тощо. Тому постійно доводиться шукати компроміс між обсягом та точністю наявних даних та необхідною точністю моделювання процесів.

Отже, враховуючи багатозв'язність та взаємозалежність великої кількості параметрів БПРС, доводиться будувати цілі комплекси математичних моделей, які враховують ту чи іншу кількість атрибутивних параметрів та просторових об'єктів шарів ГІС. На практиці для програвання сценаріїв розвитку процесів у БПРС доводиться проводити моделювання та аналіз результатів щоразу для різної кількості параметрів, а це займає багато часу. Більше того, проблема ускладнюється ще й тим, що геоінформаційні системи та бази даних зберігаються у різних програмних середовищах, мають різну структуру та формати даних. Отже, є актуальними такі задачі:

1. Розробити єдиний уніформатний апарат формалізації просторових та атрибутивних характеристик об'єктів геоінформаційних систем, який дозволяв би автоматизувати процес створення та геокодування просторових об'єктів аналітичної геоінформаційної системи БПРС, незалежно від різних програмних середовищ для роботи з ГІС.

2. Розробити інформаційну модель просторових об'єктів геоінформаційної системи багатозв'язної просторово-розподіленої системи з довільними аналітичними залежностями між їх параметрами, яка дозволяла б збільшити швидкість адаптації інформаційної моделі до заданої комбінації шарів об'єктів та їх параметрів під час моделювання процесів у БПРС.

3. Розробити інформаційну технологію автоматизованої побудови інформаційної моделі прос-

торових об'єктів БПРС з урахуванням усіх можливих аналітичних зв'язків між атрибутивними та просторовими параметрами цих об'єктів та з урахуванням математичних моделей з різною кількістю факторів із різною точністю опису.

2. Розв'язання задачі

Кількість можливих комбінацій зв'язків між параметрами просторових об'єктів БПРС можна визначити за допомогою формули

$$K = 2^{N_p},$$

де N_p — кількість параметрів БПРС, яку можна визначити за формулою

$$N_p = \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_{O_i}} N_{ij}, \quad (1)$$

де N_{ij} — кількість параметрів j -го просторового об'єкта i -го шару ГІС; N_{O_i} — кількість об'єктів у i -му шарі; N_L — кількість шарів у ГІС.

За умови, що кожен шар містить однакову кількість об'єктів, а кожен об'єкт — однакову кількість параметрів, формула (1) переписеться у вигляді

$$N_p = N_L N_{O1} N_{11}.$$

Так, наприклад, якщо БПРС складається з 200 шарів, кожен з яких містить 50 об'єктів різного типу, що описуються 10 параметрами, то $N_p = 100000$, а кількість можливих комбінацій зв'язків між параметрами $K = 2^{100000}$, тому виникає проблема представлення можливих комбінацій традиційними підходами. Наприклад, у разі представлення цих зв'язків за допомогою реляційних баз даних є можливими два варіанти інформаційної моделі:

1) таблиця з N_p стовпцями і 2^{N_p} рядками і в кожній комірці 0 або 1, що означає наявність чи відсутність зв'язків між параметрами, і ще два стовпці, в яких зберігається код параметра, з яким пов'язаний кожен параметр, та ідентифікатор залежності, яка характеризує цей зв'язок;

2) таблиця з 3-х стовпців і 2^{N_p} рядків: у першому стовпці знаходиться двійковий код довжиною в N_p біт, який відповідає кожному параметру, у другому і третьому стовпцях — ті ж дані, що й у першому варіанті.

У разі необхідності зміни характеру чи зв'язків якогось параметра, видалення його з інформаційної моделі та з усіх залежностей, де він фігурує, щоразу виникає проблема з редагуванням такої інформаційної моделі, її верифікацією та забезпеченням несуперечності та цілісності даних.

Отже, реляційні БД є непридатними для збереження великої кількості зв'язків між параметрами об'єктів БПРС разом із залежностями, що описують ці зв'язки, тому пропонується новий підхід до формалізації таких даних з використанням геоінформаційного простору параметрів.

Геоінформаційний простір параметрів (ГПП) — це геометричний образ, представлений множиною усіх можливих параметрів, наділених природним поняттям близькості, усіх можливих просторових об'єктів усіх можливих шарів, з яких складається геоінформаційна система БПРС. Множина усіх параметрів, представлених у вигляді точок (вузлів) з координатами (x, y) в математичному плані утворює площину, а в інформаційному — системний шар геоінформаційної системи, параметри якої вона описує. ГПП пропонується використовувати для формалізації усіх можливих функціональних чи алгоритмічних зв'язків між параметрами шляхом створення полігонів, вузлами яких є точки ГПП, які відповідають усім пов'язаним між собою параметрам, а самі залежності, що описують ці зв'язки, в інформаційному плані формалізуються («прив'язуються») як атрибути (параметри) цих полігонів, що зберігаються у базі даних ГІС. Ці зв'язки, в залежності від кількості K параметрів, які вони зв'язують, формалізуються одним із трьох варіантів:

— $K > 2$: точки ГПП є вузлами полігона (багатокутника), атрибутом якого є залежність, що пов'язує ці параметри;

— $K = 2$ (вироджений варіант першого типу): дві точки ГПП поєднуються лінією, атрибутом якої є залежність, що пов'язує ці два параметри;

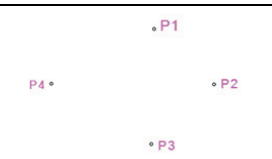
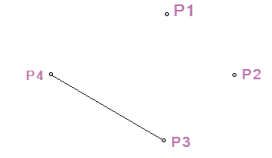
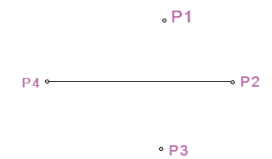
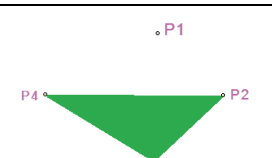
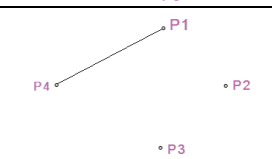
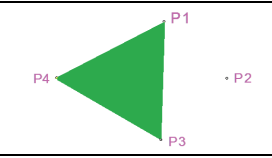
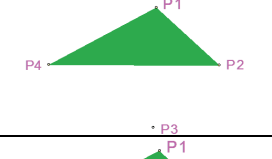
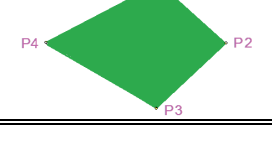
— $K = 1$ (вироджений варіант другого типу): сама точка ГПП і є геометричним образом зв'язку, наприклад, коли параметр задається константою або функцією, що залежить, наприклад, від часу,

а не від інших параметрів ГПП (хоча час, звичайно, теж може бути параметром якогось просторового об'єкта ГС БПРС, тоді ця залежність перетвориться на вироджений варіант першого типу).

У кожній залежності, яка формалізується у ГПП, усі параметри поділяються на вхідні, якщо $K > 1$, та один вихідний, який обчислюється через вхідні, тобто кожна залежність є розв'язком певної математичної моделі відносно однієї вихідної змінної або алгоритмом обчислення цієї змінної із вхідних змінних. Кожен параметр в одній залежності може бути вхідним, а в іншій — вихідним, формалізуючи у такий спосіб систему залежностей (математичних моделей).

Наприклад, у таблиці наведено графічне подання у ГПП усіх можливих комбінацій зв'язків (впливів) між вхідними параметрами P_1, P_2, P_3 та параметром P_4 (для $N_p = 4$).

Усі можливі комбінації зв'язків (впливів) між вхідними параметрами та вихідним параметром P_4

№	Комбінація вхідних параметрів	Графічний вигляд ГПП	Характеристика наявності зв'язків між P_4 та іншими параметрами
1	000		Параметр P_4 не залежить ні від жодного із параметрів
2	001		Параметр P_4 залежить лише від параметра P_3
3	010		Параметр P_4 залежить лише від параметра P_2
4	011		Параметр P_4 залежить від параметрів P_2 та P_3
5	100		Параметр P_4 залежить лише від параметра P_1
6	101		Параметр P_4 залежить від параметрів P_1 та P_3
7	110		Параметр P_4 залежить від параметрів P_1 та P_2
8	111		Параметр P_4 залежить від параметрів P_1, P_2, P_3

Кожний об'єкт ГПП зберігає ідентифікатор залежності (FID), на основі якої і здійснюється розрахунок параметра. Так, для $N_p = 4$ приклад схеми відповідності елементів ГПП залежностям між параметрами цього ГПП наведено на рис. 1.

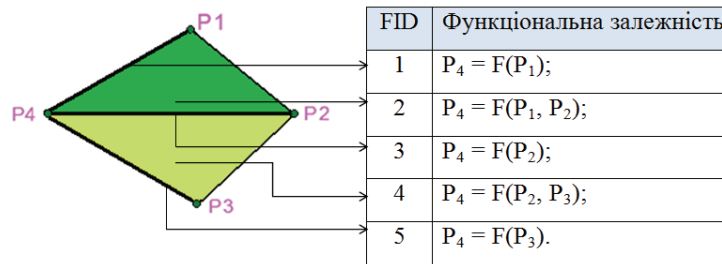


Рис. 1. Приклад схеми відповідності елементів ГПП залежностям між параметрами цього ГПП

Важливо відмітити, що залежність може бути як аналітичною (функціональною), так і алгоритмічною. Функціональна залежність може бути як лінійною, так і нелінійною, основою на апараті як чітких, так і нечітких множин. Для обчислення вихідного параметра за вхідними можуть використовуватись як прості співвідношення типу $P_1 + P_2$, так і складні, які, у свою чергу, можуть обчислюватись як з використанням зовнішніх модулів, що інтегруються в систему, так і з використанням спеціалізованих обчислювальних пакетів (MS Excel, Matlab, Mathcad та ін.), за умови забезпечення автоматичного обчислення без участі оператора.

Доцільним є формування єдиної бібліотеки залежностей із присвоєнням кожній залежності спеціального ідентифікатора. Це дозволяє зберігати у базі даних ГПП тільки цей ідентифікатор.

Запропонований підхід до формалізації залежностей між параметрами об'єктів ГІС дозволяє ефективно формалізувати та зберігати усі можливі залежності для заданої БПРС. Проте, розрахунок параметрів об'єктів ГІС потребує засобів ідентифікації відношень між самими об'єктами ГІС. У загальному випадку відношення між об'єктами ГІС можна описати за допомогою логічних та просторових відношень. Просторові відношення між об'єктами ГІС ідентифікуються шляхом аналізу метричної інформації об'єктів. Логічні відношення більше відображають логічні зв'язки між об'єктами. Пропонуємо представляти ці відношення за допомогою реляційного простору зв'язків.

Так, наприклад, у роботі [4], запропоновано логічні відношення між просторовими об'єктами формалізувати за допомогою UML-нотації (рис. 2).

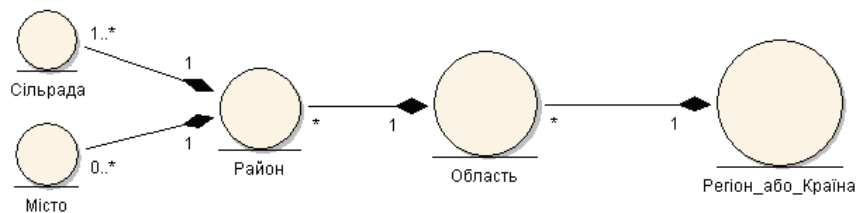


Рис. 2. UML-модель класу «Адміністративне утворення» [4]

Відношення між просторовим об'єктом ГІС та іншими просторовими об'єктами можна представити у такому вигляді:

$$R_{Tj}(O_i) = \{O_1, O_2, \dots, O_k\},$$

де $\{O_1, O_2, \dots, O_k\}$ — множина об'єктів, які отримуються шляхом застосування відношення R типу T з ідентифікатором відношення j (P — просторове відношення; L — логічне відношення; U — множина об'єктів, яка формується користувачем; I — інтегральне відношення) над об'єктом O_i , де i — унікальний ідентифікатор об'єкта).

Моделювання процесів на основі геоінформаційного та реляційного простору вимагає розробки єдиного уніфікованого апарату формалізації просторових та атрибутивних характеристик об'єктів геоінформаційних систем, який не залежить від різних програмних середовищ для роботи з ГІС.

Об'єкт ГІС, зазвичай, формалізується як комплекс його просторових та атрибутивних характеристик. Просторові характеристики об'єктів не залежать від конкретної реалізації ГІС. У загальному випадку атрибутивні характеристики одного і того самого об'єкта у різних ГІС можуть бути різними, проте у кожного об'єкта ГІС є також набір атрибутивних характеристик, які не залежать від конкретної реалізації ГІС. Тобто будь-який об'єкт ГІС можна описати як набір просторових та атрибутивних характеристик, а далі цю інформацію імпортувати у ГІС або експортувати з ГІС. Найдоцільніше зберігати об'єкти ГІС у форматі обмінного файлу XML, а можливий набір просторо-

рових та атрибутивних характеристик у вигляді схеми XSD. Слід зазначити, що такий підхід до формалізації об'єктів ГІС набуває популярності як в Україні, так і за її межами. Так, наприклад, в Україні з 2009 р. введені вимоги до формального опису об'єктів земельного кадастру, затверджені законодавством України — вимоги до структури, змісту та формату оформлення результатів робіт із землеустрою в електронному вигляді XML [5].

Такий підхід дозволяє працювати з об'єктами земельного кадастру у різних програмних продуктах, в першу чергу, у ГІС. Проте для того, щоб будь-який програмний продукт дозволяв працювати з такими даними, у ньому має бути реалізований відповідний модуль імпорту/експорту даних для обробки даних відповідно до їх інформаційної моделі.

Модель об'єкта O ГІС можна представити у такому вигляді:

$$O = [S, A]; A = [T, P];$$

$$S = [NS1, NS2, \dots]; T = [NT1, NT2, \dots]; P = [NP1, NP2, \dots],$$

де S — просторові характеристики об'єкта; A — атрибутивні характеристики об'єкта, які складаються з текстових (T) та числових (P) характеристик об'єкта; $NS1, NS2$ — назви просторових характеристик об'єкта O ; $NT1, NT2$ — назви текстових характеристик об'єкта O ; $NP1, NP2$ — назви числових характеристик (параметрів) об'єкта O . Під параметрами об'єкта P будемо розуміти характеристики процесів, що відбуваються у цьому об'єкті.

Значення параметрів у базі даних ГІС зберігаються у вигляді R -вимірної матриці. Якщо $R = 0$ — зберігається лише одне значення, якщо $R = 1$ — вектор-стовпець, якщо $R = 2$ — матриця і т. д.

На рис. 3 показано архітектуру інформаційної технології автоматизованої побудови інформаційної моделі просторових об'єктів багатозв'язної просторово-розподіленої системи з урахуванням усіх можливих аналітичних зв'язків між атрибутивними та просторовими параметрами цих об'єктів, яка відрізняється від існуючих структурою та алгоритмами і засобами ідентифікації інформаційної моделі, які дозволяють збільшити швидкість побудови інформаційних моделей для моделювання процесів у багатозв'язних просторово-розподілених системах з урахуванням у математичних моделях різної кількості факторів із різною точністю опису.

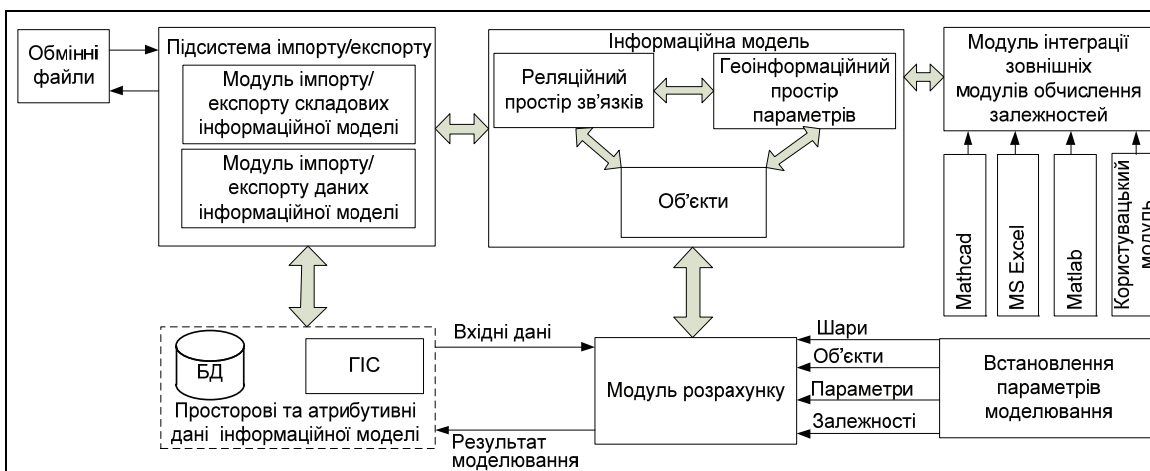


Рис. 3. Архітектура інформаційної технології

Продемонструємо запропоновану інформаційну технологію побудови інформаційної моделі для моделювання процесів у БІРС на прикладі.

3. Приклад

Розглянемо застосування запропонованої інформаційної технології на прикладі транспортної системи міста чи його найбільш завантаженої транспортом частини, в якій проводиться моделювання середньої швидкості руху транспортних засобів, з метою її підвищення, що, у свою чергу, покращить ефективність функціонування транспортної мережі [6].

На першому кроці транспортну систему міста будемо формалізувати як набір об'єктів, кожен з яких має унікальний ідентифікатор типу об'єкта (OID), що логічно розміщені у шарах ГІС: вулично-дорожня мережа (проїжджа частина (OID = 1), смуга руху (OID = 2), перехрестя (OID = 3)),

дорожні знаки (обмеження максимальної швидкості (OID = 4)), дорожня розмітка (пішохідний перехід (OID = 5)) та світлофорні об'єкти (світлофор (OID = 6)).

Наступним кроком є ідентифікація відношень між об'єктами предметної області у вигляді логічних та просторових відношень. Оскільки просторові характеристики об'єктів транспортної системи міста є незмінними, то для представлення залежностей між ними достатньо логічних відношень. Реляційний простір зв'язків представлено у вигляді псевдографа реляційних зв'язків, де кожен зв'язок має унікальний ідентифікатор (рис. 4).

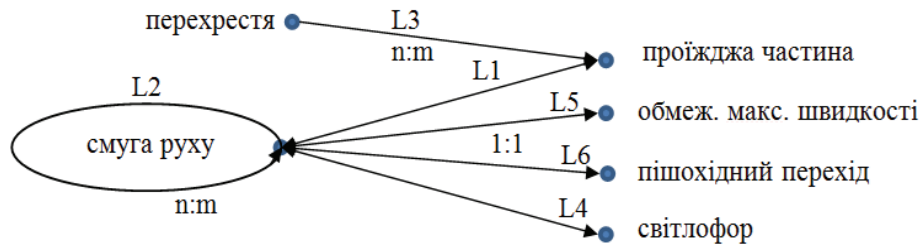


Рис. 4. Псевдограф реляційних зв'язків

Наступним етапом є побудова моделі залежностей між параметрами у вигляді геоінформаційного простору параметрів, для чого спочатку необхідно встановити типи залежностей між параметрами. Оскільки запропонована модель є досить простою, то залежність між параметрами будемо описувати лише за допомогою аналітичних залежностей. Так, наприклад, середню швидкість руху V на заданій ділянці транспортної мережі можна визначити за допомогою формули [7]

$$V = S / (S/V_{\min} + T_p),$$

де S — довжина ділянки транспортної мережі; V_{\min} — мінімальна швидкість руху, що враховує усі обмеження на швидкість і визначається за формулою $V_{\min} = \min(V_{sdp}, V_{vdz})$, де V_{sdp} — максимально можлива швидкість руху ТЗ з урахуванням стану дорожнього покриття, а V_{vdz} — максимальна швидкість руху з урахуванням дорожніх знаків; T_p — сумарний час простою ТЗ на цій ділянці транспортної мережі, який можна визначити за формулою $T_p = T + T_{pp}$, де T — час простою ТЗ на світлофорному об'єкті, а T_{pp} — час простою ТЗ на пішохідному переході, що визначається за формулою $T_{pp} = L/V_p + 5$, $V_p = 5$ км/год, де L — довжина пішохідного переходу, а V_p — середня швидкість руху пішохода.

Геоінформаційний простір параметрів, за умови активності усіх шарів транспортної мережі, має вигляд, зображений на рис. 5, де параметри ГПП, які представлені у вигляді круга, є вхідними параметрами моделі, а у вигляді кола — вихідними, тобто такими, що розраховуються.

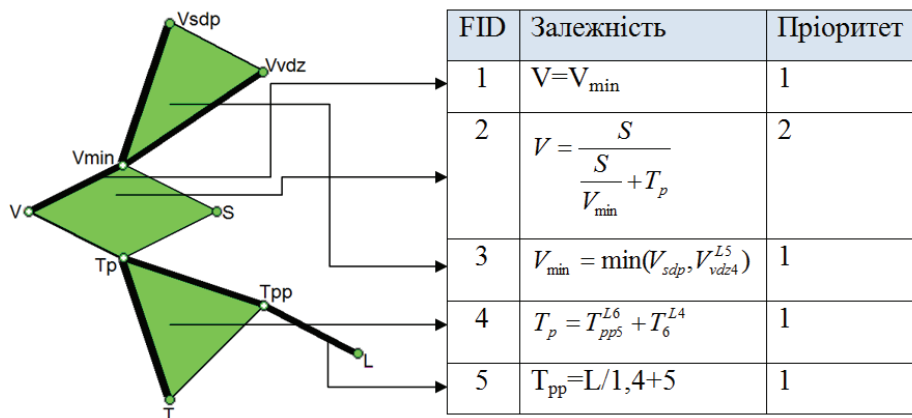


Рис. 5. Геоінформаційний простір параметрів транспортної мережі

Залежність показує, як здійснюється розрахунок параметрів, а пріоритет — порядок, якого слід дотримуватись під час розрахунку параметра, який у більшості випадків може бути обчислений за допомогою різних залежностей.

У залежностей (див. рис. 5) верхні індекси показують тип та номер відношення (у нашому випадку усі відношення логічні), а нижні індекси — номер типу об'єкта, до якого належить цей параметр. Так, наприклад, формула для розрахунку сумарного часу простою ТЗ на смузі руху має вигляд

$$T_p = T_{pp5}^{L6} + T_6^{L4},$$

де T_{pp5}^{L6} — означає, що параметр T_{pp} є параметром об'єкта з ідентифікатором типу об'єкта $OID = 5$, значення якого визначається на основі логічного відношення з номером 6.

Після формалізації ГІС за запропонованою технологією система готова для введення даних та здійснення моделювання. Для цього необхідно лише задати, які саме шари, об'єкти та параметри будуть враховуватись в інформаційні моделі на кожному етапі (ітерації) моделювання. Так, наприклад, у разі врахування шарів «Вулично-дорожня мережа» та «Світлофорні об'єкти» інформаційна модель буде мати вигляд, як на рис. 6.

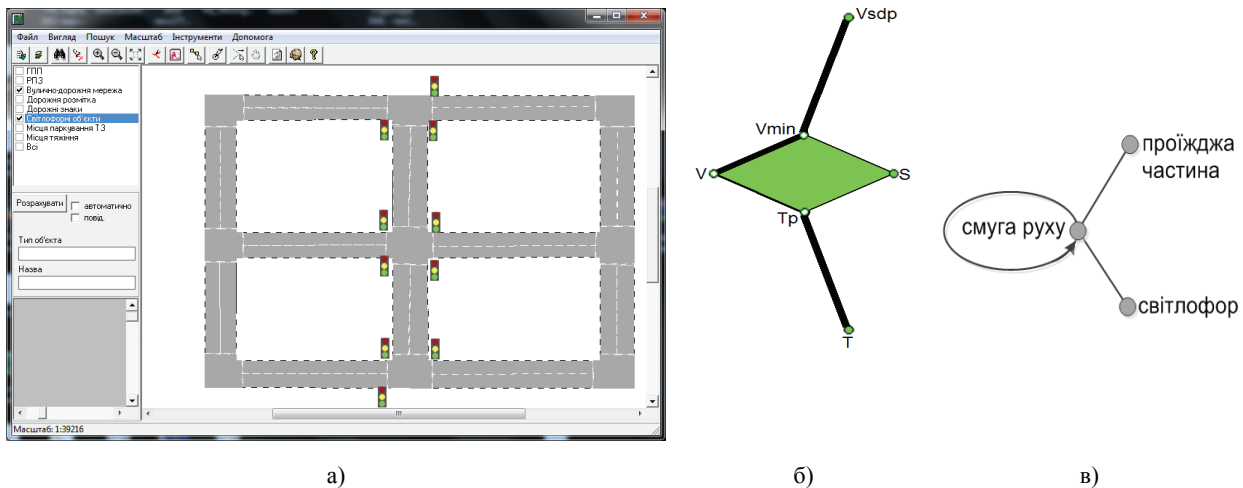


Рис. 6. Інформаційна модель транспортної мережі у разі врахування шарів «Вулично-дорожня мережа» та «Світлофорні об'єкти»: а — приклад програмної реалізації інформаційної технології; б — геоінформаційний простір параметрів; в — реляційний простір зв'язків

Висновки

1. Вперше запропоновано інформаційну модель просторових об'єктів геоінформаційної системи багатозв'язної просторово-розподіленої системи (БПРС) на основі геоінформаційного простору параметрів цих об'єктів, з довільними аналітичними (чи алгоритмічними) залежностями між параметрами об'єктів, формалізованими як системний шар їх ГІС, та реляційного простору зв'язків між цими об'єктами, що дозволяє збільшити швидкість адаптації інформаційної моделі до заданої комбінації шарів об'єктів та їх параметрів під час моделювання процесів у БПРС.

2. Вперше розроблено інформаційну технологію автоматизованої побудови інформаційної моделі аналітичної ГІС просторових об'єктів БПРС з урахуванням усіх можливих аналітичних зв'язків між атрибутивними та просторовими параметрами цих об'єктів, яка відрізняється від існуючих структурою та методами і засобами формалізації та ідентифікації інформаційної моделі, які дозволяють збільшити швидкість побудови аналітичних ГІС БПРС для моделювання процесів у багатозв'язних просторово-розподілених системах з урахуванням у математичних моделях різної кількості факторів із різною точністю опису.

3. Дістала подальший розвиток формалізація інформаційних моделей просторових об'єктів геоінформаційної системи БПРС мовою XML на основі відомої XML-формалізації даних земельного кадастру України, що враховує ще й параметри та характеристики об'єктів, необхідні для проведення моделювання різних процесів у БПРС, та дозволяє автоматизувати процес створення та гео-

кодування просторових об'єктів аналітичної геоінформаційної системи БПРС, незалежної від різних програмних середовищ для роботи з ГІС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Баранов Г. Л. Структурное моделирование сложных динамических систем / Г. Л. Баранов, А. В. Макаров. — К. : Наукова думка, 1986. — 272 с.
2. Zeiler Michael. Modeling our World. / Zeiler Michael. — ESRI : Redlands, USA, 1999. — 202 p.
3. Mitchell A. Environmental Systems Research Institute, Inc. The ESRI Guide to GIS Analysis. V. 1 : Geographic Patterns and Relationships : Redlands / A. Mitchell. — USA, 1999. — 186 p.
4. Комп'ютеризовані регіональні системи державного моніторингу поверхневих вод: моделі, алгоритми, програми : моногр. / [В. Б. Мокін, М. П. Боцула, Г. В. Горячев та ін.]. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. — 315 с.
5. Наказ Державного комітету України із земельних ресурсів від 02.11.2009 р. № 573 «Про затвердження Вимог до структури, змісту та формату оформлення результатів робіт із землеустрою в електронному вигляді (обмінного файлу)» / Державний комітет України із земельних ресурсів.
6. Лобашов О. О. Моделювання впливу рівня автомобілізації на ефективність функціонування транспортної мережі / В. К. Доля, О. О. Лобашов, О. В. Прасоленко // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. — 2010. — Вип. 3. — С. 19—23.
7. Введение в математическое моделирование транспортных потоков / [А. В. Гасников, С. Л. Кленов, Е. А. Нурминский и др.]. — М. : МФТИ, 2010. — 362 с.

Рекомендована кафедрою комп'ютерного еколого-економічного моніторингу та інженерної графіки

Стаття надійшла до редакції 16.04.2013
Рекомендована до друку 16.04.2013

Мокін Віталій Борисович — завідувач кафедри, **Гавенко Олег Віталійович** — аспірант.

Кафедра комп'ютерного еколого-економічного моніторингу та інженерної графіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця