

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**В. Б. Мокін, І. В. Варчук, Є. М. Крижановський**

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ  
АНАЛІЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ  
ТОПОЛОГІЧНОЇ СПОСТЕРЕЖУВАНOSTІ  
БАГАТОЗВ'ЯЗНИХ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2019

---

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/522>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

УДК 004.6+519.6

М74

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № 7 від 31.01.2019 р.)

Рецензенти:

**В. Я. Данилов**, доктор технічних наук, професор

**О. В. Бісікало**, доктор технічних наук, професор

**Мокін, В. Б.**

М74 Інформаційна технологія аналізу та оптимізації топологічної спостережуваності багатозв'язних геоінформаційних систем : монографія [Електронний ресурс] / В. Б. Мокін, І. В. Варчук, Є. М. Крижановський. – Вінниця : ВНТУ, 2019. – 121 с

ISBN 978-966-641-765-0

В монографії розв'язано актуальну задачу аналізу та оптимізації топологічної спостережуваності багатозв'язних геоінформаційних систем, шляхом створення інформаційної технології аналізу та оптимізації топологічної спостережуваності багатозв'язної геоінформаційної системи, яка дозволяє визначити та підвищити рівень топологічної спостережуваності систем і дозволяє більш швидко та ефективно вибрати математичну модель та інформаційні складові багатозв'язної геоінформаційної системи, які забезпечать цей рівень її топологічної спостережуваності. Розрахована на науковців і фахівців у сфері інформаційних технологій, а також може бути корисною студентам та аспірантам ВНЗ.

УДК 004.6+519.6

ISBN 978-966-641-765-0

В. Мокін, І. Варчук, Є. Крижановський, 2019

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ОПТИМІЗАЦІЇ СПОСТЕРЕЖУВАНOSTІ БАГАТОЗВ'ЯЗНИХ СИСТЕМ.....	8
1.1 Методи визначення топологічної спостережуваності багатозв'язних систем.....	8
1.2 Аналіз підходів до формалізації моделей багатозв'язних геоінформаційних систем.....	13
1.2.1 Технології інтегрування математичних моделей з ГІС.....	19
1.2.2 Технологія формалізації математичних моделей систем з геометричними мережами у геоінформаційному просторі параметрів цих систем .....	20
1.3 Висновки до розділу 1 .....	23
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МЕТОДУ ОПТИМІЗАЦІЇ ТОПОЛОГІЧНОЇ СПОСТЕРЕЖУВАНOSTІ БАГАТОЗВ'ЯЗНИХ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ.....	25
2.1 Удосконалення поняття топологічної спостережуваності інформаційних моделей БГС .....	25
2.2 Розроблення методу аналізу та оптимізації топологічної спостережуваності моделей БГС .....	26
2.2.1 Вибір критерію оптимальності методу .....	26
2.2.2 Розроблення методу .....	27
2.2.3 Оптимізація топологічної спостережуваності багатозв'язних геоінформаційних систем .....	30
2.3 Приклад застосування методу аналізу та оптимізації топологічної спостережуваності моделей БГС .....	32
2.4 Метод аналізу та оптимізації топологічної спостережуваності когнітивних карт складних просторово-розподілених систем.....	35
2.5 Висновки до розділу 2 .....	42
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ АНАЛІЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ТОПОЛОГІЧНОЇ СПОСТЕРЕЖУВАНOSTІ БГС.....	44
3.1 Створення архітектури інформаційної технології аналізу та оптимізації топологічної спостережуваності БГС .....	44
3.2 Створення концептуальної інформаційної технології аналізу та оптимізації топологічної спостережуваності БГС .....	47
3.3 Удосконалення технології побудови БГС по математичних моделях процесів у ній .....	53
3.4 Методика реалізації інформаційної технології аналізу та оптимізації топологічної спостережуваності БГС .....	60

3.5 Порівняння з традиційними підходами запропонованої технології аналізу та оптимізації топологічної спостережуваності моделей БГС .....	70
3.6 Висновки до розділу 3 .....	73
<b>РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНА АПРОБАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ АНАЛІЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ТОПОЛОГІЧНОЇ СПОСТЕРЕЖУВАНOSTІ БАГАТОЗВ'ЯЗНИХ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ.....</b>	<b>75</b>
4.1 Аналіз та оптимізація топологічної спостережуваності річкової системи в задачі побудови водогосподарського балансу .....	75
4.2 Формалізація розподіленої моделі гідрологічних процесів «ТОРКАРІ-ІРММС» («опади-стік») для оптимізації топологічної спостережуваності відповідної БГС.....	83
4.3 Удосконалення топологічної спостережуваності автоматизованої системи керування дорожнім рухом міста .....	88
4.4 Висновки до розділу 4 .....	100
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>102</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>104</b>
<b>ДОДАТОК А Розрахунок водогосподарського балансу р. Південний Буг.....</b>	<b>118</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

БД – база даних

БГС – багатозв’язна(і) геоінформаційна(і) система(и)

ВНТУ – Вінницький національний технічний університет

ГІС – географічна інформаційна (геоінформаційна) система

ГІС-технологія – геоінформаційна технологія

ГІС з ГМ – геоінформаційна система з геометричними мережами

ГПП – геоінформаційний простір параметрів

ЕЕС – електроенергетична система

ІМ – інформаційна модель

НДЛ ЕДЕМ – науково-дослідна лабораторія екологічних досліджень та екологічного моніторингу ВНТУ

НДР – науково-дослідна робота

СУБД – система управління базами даних

## ВСТУП

Для функціонування систем контролю стану багатозв'язних просторово-розподілених систем необхідні достовірні вхідні дані. Проте, для більшості систем обсяг даних недостатній, а недостатність вхідних даних не дає ідентифікувати на практиці складні математичні моделі, які враховували б достатньо багато різних факторів, формалізованих певними змінними рівнянь. Достатність таких змінних визначається, в першу чергу, можливістю здійснювати об'єктивний і повний контроль стану системи. Для перевірки придатності системи для розв'язання таких задач існує поняття спостережуваності, а для багатозв'язних систем – ще й поняття топологічної спостережуваності.

Значним класом багатозв'язних просторово-розподілених систем є такий їх клас, для якого усі дані та зв'язки між ними можна формалізувати у вигляді геоінформаційних систем, тобто систем, усі основні елементи та об'єкти яких мають просторову прив'язку. Назвемо їх багатозв'язні геоінформаційні системи (БГС). До них відносяться усі інженерні мережі (транспортні мережі, електричні та електроенергетичні мережі, різні трубопроводи, шахти та інші підземні комунікації тощо), природні мережі (річкові системи, екомережі та ін.) та інші просторово-розподілені об'єкти, в яких параметри та стан одних ділянок та елементів впливає на параметри та стан інших ділянок та елементів. Їх поєднує те, що для надійного функціонування систем контролю та управління такими БГС необхідний достатній обсяг достовірних даних як про усі їх входи, так і про змінні стану. Достатність цих змінних визначається, в першу чергу, можливістю розробити для такої системи закон керування, який дозволив би перевести систему у потрібний стан. Для розв'язання таких задач існують поняття спостережуваності та керованості, а для багатозв'язних систем та інформаційних систем – ще й поняття топологічної спостережуваності, тобто визначення спостережуваності по моделі системи у вигляді графа.

Проблематика спостережуваності БГС розглядається в багатьох роботах вчених, але значно менше є робіт з дослідження топологічної спостережуваності спостережуваності за графовими моделями системи або спостережуваності інформаційних систем, зокрема це досліджувалось у роботах таких вчених: К. А. Клементс, А. З. Гамм, І. І. Голуб, В. А. Богданов, А. М. Конторович, Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, Вільям С. Левін, Е. Евангелісті, Дж. Фрагнелі, В. Мігнай, Алі Абур, А. Г. Експосіто, М. Дж. Корлесс, А. Фразко та ін. Однак, у цих роботах майже не приділялась увага питанням автоматизації процесів аналізу та оптимізації топологічної спостережуваності складних систем

за їх не тільки математичними, а й інформаційними моделями. Також не досліджувалось питання різних рівнів топологічної спостережуваності у часі та просторі та ранжування моделей процесів у БГС за ними.

Отже, необхідним є створення інформаційної технології аналізу та оптимізації топологічної спостережуваності багатозв'язних просторово-розподілених систем за їх математичними моделями та інформаційними складовими за рахунок більш ефективної формалізації й обробки вхідних даних і моделей та автоматизації їх оброблення. Результати дослідження опубліковано у роботах [1–14].

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає у наступному:

- розвинуто поняття топологічної спостережуваності математичних моделей процесів у БГС з урахуванням специфіки їх інформаційних моделей, що дозволяє врахувати особливості спостережуваності їх параметрів у просторі та в часі і визначити які саме ділянки БГС та в які періоди часу потребують оптимізації їх топологічної спостережуваності;

- запропоновано низку методик, які дозволяють підвищити рівень топологічної спостережуваності БГС згідно з запропонованою термінологією та продемонстровано приклад їх застосування для підвищення спостережуваності системи управління водними ресурсами басейну р. Південний Буг, які пройшли затвердження на Науково-технічній раді Держводагентства України та вже використані у басейні річки Дністер (на території Польщі, Молдови та України) та в українській частині басейнів Прип'яті та Сіверського Дінця;

- розроблено алгоритм аналізу та оптимізації топологічної спостережуваності багатозв'язної геоінформаційної системи;

- в пакеті для роботи з ГІС «ArcGIS» (США) створено типовий програмний інструментарій для ефективної формалізації математичних моделей процесів у БГС у форматі геоінформаційного простору параметрів системи з подальшим його перетворенням у біхроматичний граф та оптимізацією топологічної спостережуваності цієї системи – на це програмне забезпечення отримано свідоцтво про реєстрацію авторських прав на комп'ютерну програму;

- для задач керування дорожнім рухом міста та оптимізації параметрів транспортної мережі здійснено аналіз та оптимізацію відомих моделей процесів у цих мережах, у т. ч. поширення забруднень в атмосферному повітрі від викидів автотранспорту, обґрунтовано низку пропозицій щодо підвищення спостережуваності параметрів у таких задачах з використанням геоінформаційних технологій.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ОПТИМІЗАЦІЇ СПОСТЕРЕЖУВАНOSTІ БАГАТОЗВ'ЯЗНИХ СИСТЕМ

### 1.1 Методи визначення топологічної спостережуваності багатозв'язних систем

В теорії керування динамічна система є спостережуваною, якщо на кінцевому інтервалі часу  $t = [t_0, t_1]$  на виході системи в кінці цього інтервалу  $y(t_1)$  при відомих змінних керування (входу)  $u(t_0)$  можна визначити усі значення змінних стану  $x(t_0)$ . Таке визначення ґрунтується на можливості описання всіх динамічних процесів у системі за допомогою певної детермінованої математичної моделі, яка дозволяє за відомими вхідними змінними  $u(t_0)$  та початковими значеннями змінних стану  $x(t_0)$  визначити усі подальші значення змінних стану  $x(t)$  та змінні виходу  $y(t_1)$ . На цьому й оснований умова спостережуваності системи за рангом матриці спостережуваності. По суті, робиться підміна понять – система не стільки спостережувана, скільки вивчена (для неї ідентифіковано точну математичну модель) і спостережувана, однак, останнє твердження більше відноситься не до самої системи, а до її входів. Така підміна понять обумовлена традиційною термінологією теорії автоматичного управління. В ній модель спостерігача – це не модель інформаційно-вимірювальної системи, а модель самої системи, яка дозволяє у певному сенсі замінити об'єкт системою математичних рівнянь з відомою структурою і параметрами. За таких умов, дійсно, знаючи усе про виходи і входи, можна визначити початковий стан (та, відповідно, й усі наступні стани) системи. Саме це і вкладається у поняття «система, яка є повністю спостережуваною».

Для визначення поняття спостережуваності моделі заданої динамічної системи варто скористатись формулюванням поняття спостережуваності в більш широкому сенсі, як це традиційно робиться для електроенергетичних систем (ЕЕС), що є частковим випадком динамічних систем [45, 49–60, 61–63]. Під спостережуваністю, в даному випадку, розуміється сукупність умов, які забезпечують отримання інформації про значення поточних параметрів режиму [63]. Спостережуваність можна розглядати як одну з інформаційних властивостей ЕЕС, що визначається як можливість системи надавати необхідну для управління інформацію про її поточний стан за вхідними параметрами [49–60, 63].



Проблема спостережуваності розглядається в загальній теорії керування, але там вона пов'язана з динамічними та стохастичними властивостями керованої системи, в той час як для ЕЕС суттєвим є топологічний аспект, а також деякі інші аспекти [63, 64].

Варто відмітити таких вчених, відомих за останні 20 років у галузі визначення спостережуваності систем, зокрема ЕЕС, як: А. З. Гамм, И. И. Голуб, К. А. Clements, G. R. Krumpholz та інші [18–39, 49–60, 63, 75–82, 89–91, 96, 97]. Як правило, ці вчені визначають спостережуваність просторово-розподілених систем, використовуючи біхроматичний граф (граф із двома типами вершин: вершини-змінні і вершини-залежності між цими змінними) та класичні методи його аналізу та оптимізації – шляхом пошуку максимального паросполучення між вершинами графа різного типу та оптимізації їх кількості.

У роботі [63] відзначено, що залежність рангу матриці спостережуваності від її структури, яка визначається топологічними властивостями ЕЕС та розстановкою вимірювальної апаратури, стала основою для введення поняття топологічної спостережуваності. Перевірка топологічної спостережуваності системи є задачею теорії графів і полягає у наступному: будується біхроматичний граф  $G$ , що містить вершини двох типів: вершини першого типу (множина  $W$ ) відповідають рівнянням системи, а вершини другого типу (множина  $Y$ ) – змінним. Якщо змінна  $y_i \in Y$  входить в рівняння  $w_j \in W$ , то цей зв'язок на графі  $G$  відображається ребром  $(y_i - w_j)$ , що з'єднує вершини  $y_i$  та  $w_j$  (будемо вершини графа позначати тими ж символами, що і відповідні рівняння та змінні). Задача визначення максимального паросполучення полягає в тому, щоб знайти множину, яка містить максимально можливу кількість ребер на графі  $G$ , що не мають попарно спільних вершин [9, 10, 63].

На рис. 1.1 представлено деякий граф  $G$  і його максимальне паросполучення (ребра, що входять в множину паросполучення, виділені). На цьому прикладі добре видно, що розв'язання задачі вибору максимального паросполучення є неоднозначним: так, замість ребра  $(y_3 - w_3)$  могло бути ребро  $(y_4 - w_3)$ . Якщо існує таке паросполучення, яке є максимальним, що кожна змінна, яка описує залежність, інцидентна сильному ребру (тобто такому, що входить в це паросполучення), то система, що описується системою таких залежностей (рівнянь), є топологічно спостережуваною [9, 10, 62, 63].

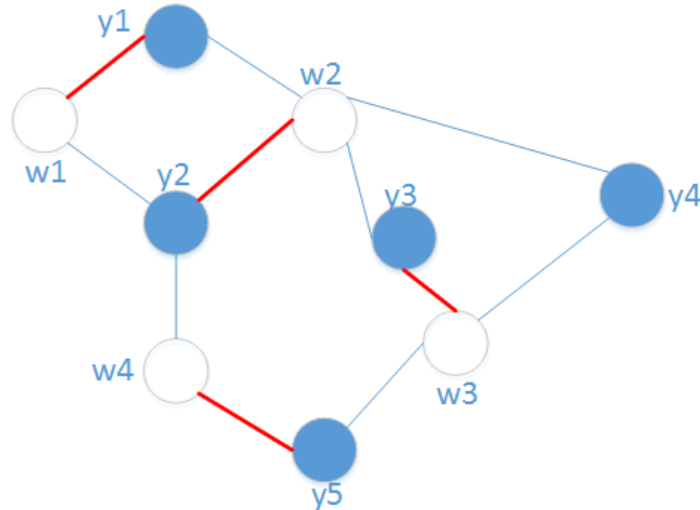


Рисунок 1.1 – Біхроматичний граф системи і його максимальне паросполучення (ребра цього паросполучення виділені товстими червоними лініями)

Якщо ж хоча б одній вершині з класу змінних у досліджуваному графі не відповідає ребро з максимального паросполучення, тоді має місце неповна спостережуваність у просторі або у часі, в залежності від специфіки моделі системи.

Отже, топологічна спостережуваність – це спостережуваність системи, що визначається за її інформаційною моделлю на основі біхроматичного графа.

У топологічно неспостережуваних системах окремі фрагменти графа (підсистеми) можуть виявитися спостережуваними і для них може бути проведено оцінювання стану. Можна поставити задачу виділення тих ділянок мережі, параметри яких не можуть бути визначені при заданій системі вимірювань. Такі ділянки називають «темними плямами». Ті ділянки (і моменти часу), де параметри визначаються, назвемо «світлими плямами». Задача виділення «темних плям» еквівалентна виділенню на біхроматичному графі  $G$  так званих дефіцитних підмножин, тобто підмножин, де існують вершини типу  $y_j$ , що не увійшли в паросполучення. На рис. 1.2 наведено приклад біхроматичного графа зі знайденим паросполученням, де вершини 1, 3, 5, 7 відповідають рівнянням, решта вершин – змінним. Вершини 1, 2, 3, 4 утворюють «світлу пляму»  $S_1$ , оскільки змінні 2 і 4 визначаються з рівнянь 1 і 3, незалежно від значень інших змінних. Множина  $S_2$ , утворена вершинами 5, 6, 7, 8 і 9, представляє собою дефіцитну мно-

жину – «темну пляму», оскільки змінні 6, 8 і 9, не можуть бути визначені достовірно з рівнянь 5 і 7. На цьому прикладі можна побачити, що «світла пляма» утворюється тоді, коли кількість змінних всередині «світлої плями» відповідає кількості рівнянь (залежностей) і вони утворюють повне паросполучення, а вершини, що відповідають рівнянням у «світлій плямі», не мають суміжних вершин, що належать «темним плямам».

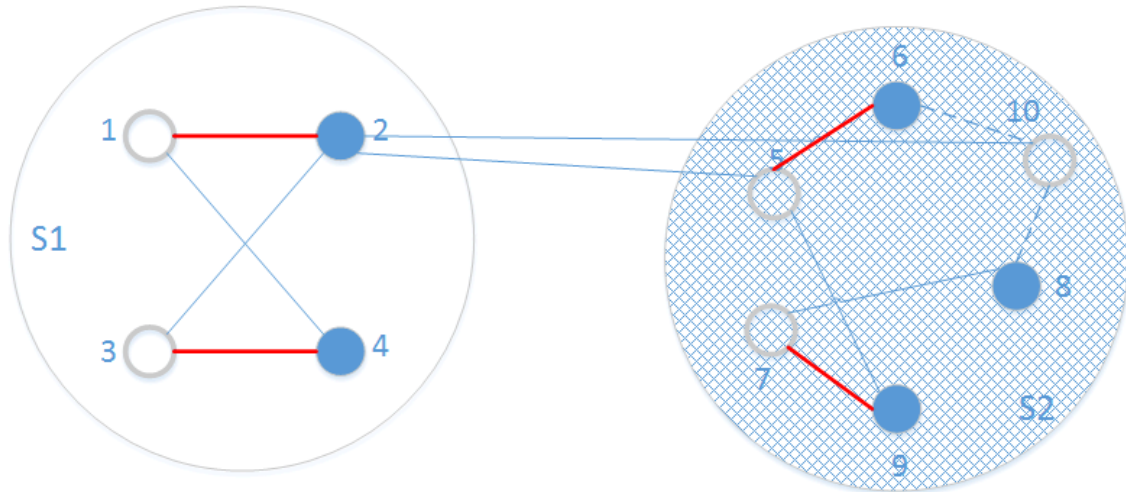


Рисунок 1.2 – «Світла» ( $S_1$ ) і «темна» ( $S_2$ ) «плями» на біхроматичному графі системи

Якщо є виділені «темні плями» в мережі, то нескладно показати кількість і розташування вершин, які необхідно додати для підвищення спостережуваності системи. Оскільки вершини – рівняння (залежності), що з'єднують відповідні змінні, то необхідно в дефіцитні підмножини додати такі рівняння-вимірювання, для яких вершина, що не увійшла в паросполучення, стала б допустимою. На рис. 1.2 штриховими лініями додано таке вимірювання до дефіцитної множини – вершина 10.

Вершини, що відповідають вимірюванням, можуть мати ребра, інцидентні «світлим плямам». Додавання нових вершин не зменшує розмір «світлих плям». При цьому паросполучення у «світлій плямі» збережеться, а його вершини будуть суміжні лише тим вершинам «темної плями», що відповідають рівнянням. Проте варто зауважити, що визначення необхідних вершин є неоднозначним, оскільки неоднозначним є вибір паросполучення.

Виділення дефіцитних підмножин з мінімальною кількістю вершин відбувається за методом ланцюгів, що чергуються [63]. Наявність «темних плям» не заважає проводити оцінювання стану параметрів системи у «світлих плямах». При цьому кожна «світла пляма» розглядається як незалежна підсистема. Таким чином, вилучення «темних плям» дозволяє вирішувати задачу оцінювання стану системи навіть у тих випадках, коли умови спостережуваності в цілому для системи не дотримуються. Проте, головною метою є усунення цих підмножин. Досягти цього можна додаванням нових вершин, як із класу залежностей, так і з класу змінних, що зроблять систему повністю спостережуваною. Це дасть можливість проведення ефективного оцінювання стану динамічної системи за будь-яких умов.

В неспостережуваній ЕЕС є можливість виділення варіантів мінімальної кількості вимірювань, додавання яких до існуючих у системі вимірювань напруг, перетоків та ін'єкцій забезпечує спостережуваність.

Також, у роботі [63] проведено ґрунтовний аналіз стану вирішення питань визначення та підвищення рівня спостережуваності ЕЕС, який мав місце станом на 1990 р. Зокрема, зазначено та запропоновано [45, 49–60, 63, 65, 71–74]:

- метод вибору складу та розстановки вимірювань, які впливають на якість оцінок;
- визначення вимірювань, додавання яких в систему дозволяє покращити точність оцінок параметрів стану;
- перевірка тільки необхідних умов спостережуваності за топологією схеми мережі і розстановки на ній вимірювань шляхом введення поняття спостережуваних «островів» та розробка алгоритму перевірки топологічної спостережуваності;
- виділення спостережуваних і неспостережуваних параметрів стану;
- перевірка топологічної спостережуваності шляхом розв'язання задачі вибору базисного складу вимірювань (мінімальної кількості вимірювань, яка забезпечує спостережуваність) за рахунок вилучення із множини наявних в системі вимірювань надлишкових і додавання до неї відсутніх вимірювань;

– умови спостережуваності, враховуючи нелінійності моделей ЕЕС, та визначення складу вимірювань, який забезпечує спостережуваність у всій області вимірювання;

– тристадійний алгоритм перевірки топологічної спостережуваності шляхом аналізу структури матриці спостережуваності для активної та реактивної моделей ЕЕС;

– вирішення проблеми виділення в неспостережуваній мережі спостережуваних підсистем з використанням алгоритмів перевірки топологічної спостережуваності;

– алгоритм перевірки топологічної спостережуваності шляхом побудови зв'язного дерева змін, але не на графі мережі, а на графі вимірювань;

– метод перевірки топологічної спостережуваності, виділення спостережуваних і неспостережуваних підсистем, способи введення вимірювань і оцінювання стану за відсутності повної спостережуваності.

Охарактеризуємо ці методи та технології більш детально. Той факт, що для розв'язання задач спостережуваності саме для електроенергетичних систем (ЕЕС) математичний апарат є добре розвиненим, є зрозумілим, оскільки, по-перше, їх математичні моделі є добре вивченими, оскільки це – результат математичного моделювання та технічного проектування, по-друге, в них можна чітко вимірювати усі задані параметри, а по-третє, підвищення керованості та ефективності функціонування хоча б на 0,01 % дає значний економічний ефект.

Але однією з основних проблем застосування цього математичного апарату є задача автоматизації побудови відповідного біхроматичного графа як для ЕЕС, так і для інших систем, зокрема, систем, що відносяться до класу багатозв'язних геоінформаційних систем.

## **1.2 Аналіз підходів до формалізації моделей багатозв'язних геоінформаційних систем**

Останнім часом, у зв'язку з розвитком геоінформаційних технологій, у багатьох задачах велике поширення отримали так звані геоінформаційні системи з геометричними мережами (ГІС з ГМ). Геометрична мережа – це визначений набір класів векторних об'єктів, які утворюють частину нерозривної мережі, що складається з граничних

елементів, переходів і поворотів, яка використовується для представлення та моделювання поведінки загальної інфраструктури мережі у реальному світі [83].

До ГІС з ГМ відносяться такі системи:

- транспортні системи (вулично-дорожня мережа із транспортною інфраструктурою та технічними засобами регулювання дорожнього руху) [46–48, 66, 67, 70, 71];
- річкові системи (річки з усіма їх притоками і притоками приток різного порядку, гідротехнічними спорудами, що регулюють стік, водозаборами тощо) [46, 47, 48, 66, 67, 70, 71];
- екологічні мережі, якими є коридори для міграції представників флори і фауни між так званими екологічними ядрами (заповідники, парки тощо), часто ці коридори проходять у долинах річок; виділяють мережі міжнародні, регіональні, локальні [46–48, 66, 67, 70, 71];
- електроенергетичні системи [46–48, 66, 67, 70, 71];
- телекомунікаційні системи [46–48, 66, 67, 70, 71];
- трубопроводи [46–48, 66, 67, 70, 71] тощо.

Інформація про атрибутивні (числові, текстові та інші) характеристики цих систем зберігається, як правило, в реляційних базах даних (БД), а просторові характеристики формалізуються як шари геоінформаційних систем, в яких векторні об'єкти пов'язуються з атрибутивними характеристиками у БД [68, 69].

Традиційно ГІС з ГМ формалізується у вигляді геометричної та логічної мережі, що дозволяє використовувати як сучасний інструментарій ГІС для збереження, обробки, аналізу та візуалізації даних цих систем, так і сучасні засоби мережевого аналізу, що базуються на основі теорії графів [84, 86].

Однією з особливостей ГІС з ГМ є те, що їх можна розбити на окремі ділянки і представити у вигляді елементів моделі геометричної мережі та направленої графа, коли вихід однієї ділянки (чи ділянок) є входом(ами) іншої(их).

Для синтезу оптимального управління необхідною є побудова математичних моделей процесів у ГІС з ГМ, що розглядається у великій кількості робіт [43, 46, 47]. Однак, багатозв'язність об'єктів у таких системах, яка означає наявність великої кількості залежностей та зв'язків між параметрами різних складових цих об'єктів, суттєво

ускладнює процес моделювання, у т. ч. ускладнює процес перевірки систем на спостережуваність та керованість. Щоб підкреслити факт багатозв'язності складних геоінформаційних систем (у т. ч. з геометричними мережами) пропонуємо їх надалі називати багатозв'язними геоінформаційними системами (БГС).

Питання визначення та обробки параметрів БГС, наприклад, транспортних та річкових, розглядаються в роботах таких зарубіжних вчених: А. А. Гаврилов (РФ), С. Г. Корсей (РФ), Д. Уізем (США), М. Ч. Буренскене (РФ), В. В. Сильянов (РФ), Б. Д. Гріншелдс (США), Г. Грінберг (США), А. Мітчел (США), Г. Д. Пайн (США), Г. А. Бекей (США), Г. Янг (США), І. Бертольд (РФ), В. В. Семенов (РФ) та інші. В Україні дослідження з цієї тематики проводили – Б. С. Бусигін, О. В. Гавенко, Ю. О. Давідіч, В. М. Дубовой, В. К. Доля, П. Р. Левковець, Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, М. А. Нефьодов, Е. Г. Петров, В. П. Поліщук, Г. С. Прокудін, В. М. Рябенський, В. Г. Сторчак, О. М. Трофимчук, А. В. Усов, В. Є. Ходаков, В. І. Єресов та інші.

Наприклад, у транспортних системах, як правило оптимізують інтенсивність руху (кількість транспортних засобів, що проїжджає через певну ділянку, чи переріз вулиці, чи одну смугу руху за одиницю часу) або середню швидкість руху. Визначення цих величин можна здійснювати як експертним шляхом, так і з використанням автоматичних засобів реєстрації (сучасні відеокамери дозволяють реєструвати кількість транспортних засобів на заданій смузі, які перетинають певну лінію). З урахуванням цього, на кожній ділянці вулиці чи її смузі руху вхідною змінною є значення однієї із згаданих вище величин на початку перегону – ділянці вулиці, розташованій між перехрестями (задається транспортними засобами (ТЗ) на виїзді з перехрестя, що рухаються на заданий перегін), змінною стану – значення величини на перегоні (задаються ТЗ, які вже є на перегоні на момент початку моделювання), а вихідною змінною – значення на виході перегону (задається ТЗ, що знаходяться на виїзді перегону і на в'їзді на перехрестя, що обмежує перегін у кінці). Як правило, усі розрахунки здійснюються для групи ТЗ, що перетинає вхідне чи вихідне перехрестя на один і той самий сигнал зеленого світла (вибирається менший із двох часових інтервалів). Моделювання процесів на кожному перегоні, в загальному випадку, залежить від великої кількості факторів: довжина

перегону, кількість смуг, рельєф, вплив дорожніх знаків чи розмітки (особливо складно враховувати вплив нерегульованого пішохідного переходу з динамікою появи на ньому людей), кількість виїздів із дворів чи паркувань, кількість центрів тяжіння (супермаркетів, шкіл, лікарень тощо), метеоумов (туман, ожеледь, злива тощо), стан і тип транспортних засобів (автомобіль, тролейбус, автобус, вантажівка, трактор тощо), суб'єктивні особливості водіїв (навіть, якщо вважати, що усі вони тверезі) та ін.

У річкових системах, як правило, оптимізують показники кількості (витрати чи рівні) або якості (показники якості, як-то: концентрацію у воді нітратів, фосфатів, нафтопродуктів тощо) води. Визначення цих величин може здійснюватись як у ручному режимі (спеціальна людина періодично вносить прилад у потік річки у певному спеціально обладнаному місці або дивиться показники приладу встановленого у цьому потоці, або робить відбір проб із подальшим її лабораторно-інструментальним аналізом), так і в автоматичному (в Україні у басейні р. Тиса є пости з автоматичними приладами, що фіксують і передають на супутник витрати води та низку показників якості води). На кожній ділянці річки, розташованій між притоками або скидами стічних чи зворотних вод, входною змінною є значення однієї із вище згаданих величин у початковому створі та у створі вхідного притоку чи скиду, змінною стану – значення величин у проміжних створах ділянки (збігається з постами екологічного моніторингу), а вихідною змінною – значення у вихідному створі ділянки річки. Як правило, усі розрахунки здійснюються для деякого об'єму води, що рухається усередненою на цій ділянці течією річки. Моделювання процесів на кожній ділянці, в загальному випадку, залежить від великої кількості факторів: швидкість та умови (гірські, рівнинні тощо) течії, ширина та звивистість русла, шорсткість дна русла (пісок, каміння, водна рослинність тощо), наявність берегового дифузного стоку, виходи підземних вод, острови, вплив водного транспорту, стан берегів та наявність на них дамб, метеоумови (зимові чи літні, дощ, сильний вітер тощо), обладнання промислових водовипусків (дифузне в руслі чи просторово-зосереджене з берега) тощо.

Ці два типи динамічних багатозв'язних геоінформаційних систем мають такі спільні характеристики:



- процеси у системах можуть описуватись як лінійними, так і нелінійними моделями, як чіткими, так і нечіткими моделями;
- модель процесів у системі може мати не тільки аналітичні чи функціональні (математичні моделі) складові, а й алгоритмічні (інформаційні моделі);
- мають велику кількість ділянок, які пов'язані між собою, і моделі процесів у яких можуть змінювати свою структуру, в залежності від певних умов;
- оскільки спостереження величин є рядами дискретних значень, то і системи є дискретними;
- більшість математичних моделей процесів, які вони враховують, описують зміни величин та факторів, що впливають на них, містять лише прості арифметичні операції або є диференціальними рівняннями лише першого порядку (параметри диференціальних рівнянь другого та вищих порядків на практиці важко ідентифікувати через традиційно недостатню кількість даних моніторингу природних і техногенних багатозв'язних геоінформаційних систем), що не дає можливості записати класичну матричну модель об'єкта керування у просторі змінних стану і застосувати математичний апарат аналізу на спостережуваність;
- на процеси, які відбуваються на ділянках системи, впливає величезна кількість факторів, які неможливо оперативно чи регулярно спостерігати;
- процеси зміни величин, що моделюються, є стохастичними і, в загальному випадку, нестационарними, хоча іноді моделюють лише тренди, вважаючи їх характер детермінованим;
- враховуючи багатозв'язність систем, деякі фактори можна, у першому наближенні, оцінити за іншими факторами (рельєф вулиці, знаки дорожнього руху, розмітка), у т. ч. статистичними, які спостерігати легше;
- по відомому виходу та входу кожної ділянки можна оцінити значення змінних стану тільки з певним наближенням, тобто системи не є повністю спостережуваними у вузькому сенсі класичного визначення;
- є дороговартісні станції, пости і засоби спостереження, але їх, як правило, розташовують у місцях великих значень величин, які відпо-

відають замикальним ділянкам БГС, а значення величин на попередніх ділянках оцінюють різними розрахунковими методами.

Враховуючи складності, у т. ч. організаційні та економічні, зі спостереженням величин у реальних багатозв'язних геоінформаційних системах, часто має місце спрощення задач моделювання та оптимізації:

- розглядається тільки невелика кількість ділянок, наприклад, ділянка річкової мережі в районі великого міста чи декілька вулиць і перехресть, на яких організовується так звана «зелена хвиля»;

- моделюються не миттєві, а узагальнені значення величин за тривалий час, наприклад, за добу, місяць чи рік, що, часто, дозволяє перейти до моделювання тренду процесів, який має детермінований характер;

- задається велика похибка, яка допускається для результатів моделювання і прогнозування, що можна вважати прийнятним.

Отже, необхідним є створення інформаційної технології аналізу та оптимізації топологічної спостережуваності багатозв'язних геоінформаційних систем шляхом оптимізації математичних моделей процесів у цих системах, за рахунок більш ефективної формалізації вхідних даних і моделей та автоматизації усіх процесів їх оброблення.

Для того, щоб перевірити БГС на спостережуваність, треба, перш за все, привести модель системи до такого вигляду, за яким можна побудувати біхроматичний граф, тобто визначити множину рівнянь  $y_i$  та змінних, які вони пов'язують –  $w_j$ .

Проведемо аналіз відомих технологій формалізації математичних моделей процесів у багатозв'язних геоінформаційних системах, які дозволили б побудувати такі множини.

Найбільш поширеним підходом формалізації математичних моделей процесів у БГС є використання універсальних математичних пакетів програм Matlab, Mathcad, Scilab, Excel, STATISTICA тощо [111–119]. Крім того, існуюче програмне забезпечення дозволяє інтегрувати модулі програм Matlab, Mathcad, Scilab, Excel в інші програми, тобто здійснювати зовнішнє управління розрахунками у цих пакетах, хоча і з деякими обмеженнями. Головними перевагами такого підходу є можливість одразу проводити у цих пакетах обробку даних цих моделей, універсальність і широкі аналітичні можливості.

### 1.2.1 Технології інтегрування математичних моделей з ГІС

Існує не так багато інформаційних технологій інтегрування математичних моделей з ГІС. Як правило, таке інтегрування (чи інтеграція) здійснюється або з боку пакетів програм для роботи з ГІС, які дозволяють користувачам підключати свої обчислювальні модулі, або з боку обчислювальних пакетів, які дозволяють зберігати дані у форматах, які можуть імпортувати пакети програм для роботи з ГІС. Серед універсальних же технологій можна виділити інформаційну технологію на основі об'єктно-орієнтованої мови інтеграції математичних моделей процесів та ГІС LIANA. Мова LIANA розроблена у 1998 р. фахівцями Інституту проблем математичних машин і систем Національної академії наук України М. Й. Железняком і Д. С. Гофманом [97]. Інтеграція математичних моделей базується на описі ієрархії даних у системах підтримки прийняття рішень (СППР) за допомогою класів мови програмування LIANA, де моделі є засобами побудови наборів даних, що відповідають сталим об'єктам. На жаль, мова LIANA використовує дещо застарілі ІТ-підходи та формати даних, є досить складною для використання і тому не отримала значного поширення.

Іншою досить універсальною є інформаційна технологія інтегрування математичних та геоінформаційних моделей (або математичних моделей та ГІС) Є. М. Крижановського [69]. Систематизацію та формалізацію основних складових, величин та змінних математичних моделей процесів, геоінформаційних моделей (ГІС-моделей) систем та реляційних моделей баз даних Є. М. Крижановським пропонує проводити описаним нижче чином [69].

Пропонується така класифікація величин та змінних типової математичної моделі з точки зору їх призначення:

- вхідні змінні  $U$  – змінні, що задаються для проведення обчислень;
- вихідні змінні  $Y$  – змінні, що є результатом обчислення;
- змінні стану  $X$  – змінні, що є результатом обчислення на проміжній стадії розрахунку;
- числові параметри  $K$  – параметри, що задаються або обчислюються під час ідентифікації параметрів моделі.

Наведені вище види величин та змінних типової математичної моделі взаємодіють із даними ГІС та СУБД таким чином [40, 92]:

1) множина вхідних параметрів (змінних)  $U$  утворюється із множини вхідних параметрів, що зберігаються у таблицях БД  $D_U$ , та множини параметрів у картах ГІС  $G$ :

$$U \leftarrow D_U \cup G; \quad (1.1)$$

2) множина вихідних параметрів (змінних)  $Y$  – виводиться на карті ГІС або на екрані (позначимо множину параметрів, які виводяться на екрані комп'ютера як  $E$ ) –

$$Y \rightarrow G \cup E; \quad (1.2)$$

3) множина параметрів (змінних) стану  $X$  – їх значення тимчасово зберігаються в параметрах БД  $D_X$  без виведення на карті ГІС або на екрані –

$$X \leftrightarrow D_X; \quad (1.3)$$

4) множина числових параметрів  $K$  – можуть змінюватись під час роботи з моделлю і зберігаються у спеціальних параметрах  $D_K$  у таблицях у базі даних –

$$K \leftrightarrow D_K. \quad (1.4)$$

Загалом, модель взаємодії множин параметрів (даних, змінних) ГІС, БД та складових математичної моделі можна записати у вигляді:

$$U \leftarrow D_U \cup G; X \leftrightarrow D_X; K \leftrightarrow D_K; Y \rightarrow G \cup E, D_U \cup D_X \cup D_K = D, \quad (1.5)$$

де  $D$  – множина усіх параметрів (даних, змінних, полів), які зберігаються у БД БГС.

Під моделлю бази даних розуміють способи відображення зв'язків між її даними на логічному рівні [69]. Розрізняють такі види моделей [70]: реляційну, ієрархічну, мережну і концептуальну. Найпоширенішою є модель реляційної бази даних [92].

### **1.2.2 Технологія формалізації математичних моделей систем з геометричними мережами у геоінформаційному просторі параметрів цих систем**

Для формалізації математичних моделей систем у ГІС О. В. Гавенком запропоновано інформаційну технологію, яка здійснює таку формалізацію у геоінформаційному просторі параметрів цих систем (ГПП), яким є геометричний образ, представлений множиною усіх можливих параметрів, наділених природним поняттям близькості, усіх можливих просторових об'єктів усіх можливих шарів, з яких складається геоінформаційна система БГС [84–86]. Множина всіх 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 пропо-

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мокін В. Б. Інформаційна технологія побудови топологічно спостережуваної багатозв'язної аналітичної геоінформаційної системи зі змінною структурою / В. Б. Мокін, І. В. Варчук, Є. М. Крижановський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 5. – С. 24–31.
2. Варчук І. В. Технологія синтезу геоінформаційної моделі розподіленої системи за математичними моделями процесів у ній / Ілона В'ячеславівна Варчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2. – С. 20–25.
3. Mokin V. B. Method For Determining And Optimization Of Observability Of Multivariable Spatially Distributed Systems Using Geoinformation Parameter Space / V. B. Mokin, I. V. Varchuk // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2015. – Issue 5. – Pages 105–111.
4. Біліченко В. В. Вибір оптимальної математичної моделі для моделювання перенесення забруднення автомобільного транспорту в атмосфері / В. В. Біліченко, В. В. Варчук, І. В. Варчук // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2013. – № 12 (194). – Ч. 2 – С. 48–52.
5. Мокін В. Б. Моделювання поширення забруднювальних речовин у повітрі міста з використанням геоінформаційних технологій / В. Б. Мокін, І. В. Варчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 5. – С. 13–18.
6. Створення та впровадження обласних геоінформаційних систем для моніторингу стану та управління водними ресурсами з використанням басейнового принципу / В. Б. Мокін, Є. М. Крижановський, Л. М. Скорина, І. В. Варчук // Водне господарство України. – 2015. – № 3 (117). – С. 39–44.
7. Геоінформаційна технологія оптимізації топологічної спостережуваності багатозв'язних просторово-розподілених систем / В. Мокін, І. Варчук // Summer InfoCom Advanced Solutions 2016 : матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції, 1–3 червня 2016 року, м. Київ. – С. 37–39.
8. Варчук І. В. Технологія ідентифікації та оптимізації топологічної спостережуваності багатозв'язних просторово-розподілених систем за їх математичними та геоінформаційними моделями [Електрон-

ний ресурс] / І. В. Варчук, В. Б. Мокін // XLV науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області, електронне наукове видання : матеріалів конференції, м. Вінниця, 23–24 березня 2016. – Режим доступу: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/10598/858.pdf>.

9. Варчук І. В. Метод визначення топологічної спостережуваності моделей екологічних систем з використанням геоінформаційного простору параметрів / І. В. Варчук // V-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю. – Вінниця, 2015. – С. 91.

10. Мокін В. Б. Формалізація розподіленої моделі гідрологічних процесів «ТОРКАРІ-IPMMS» («опади-стік») у геоінформаційному просторі її параметрів / В. Б. Мокін, І. В. Варчук // Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях : матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції (5–9 жовтня 2015 р.). – К., 2015. – С. 116–120.

11. Варчук І. В. Новий підхід до визначення топологічної спостережуваності багатозв'язних просторово-розподілених систем на основі їх моделей у геоінформаційному просторі параметрів / І. В. Варчук, В. Б. Мокін // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2014) : збірник праць XII міжнародної конференції (14–16 жовтня 2014 р.). – Вінниця : ВНТУ, 2014. – С. 16.

12. Варчук І. В. Визначення топологічної спостережуваності транспортної мережі міста на основі її моделі у геоінформаційному просторі параметрів / І. В. Варчук, В. Б. Мокін // Інтернет-Освіта-Наука-2014 (ІОН-2014) ; збірник праць IX міжнародної конференції (14–16 жовтня 2014 р.). – Вінниця : ВНТУ, 2014. – С. 278–279.

13. Мокін В. Б. Розробка підсистеми комп'ютеризованої системи екологічного моніторингу викидів автомобільного транспорту міста / В. Б. Мокін, І. В. Варчук // IV-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю. – Вінниця, 2013. – С. 228–230.

14. Мокін В. Б. Комп'ютерна програма «Моделювання та оптимізація параметрів багатозв'язної просторово-розподіленої системи на основі її геоінформаційної системи» / В. Б. Мокін, Є. М. Крижановський, І. В. Варчук // Свідectво про реєстрацію авторського права на

твір № 68451. – К. : Державний департамент інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації : 18.07.2016 р.

15. Варчук В. В. Оцінка викидів забруднюючих речовин автотранспортом на прикладі ТОВ «Поділля-Трансбудсервіс» / В. В. Варчук, І. В. Варчук // Наукові нотатки Луцького національного технічного університету. – 2012. – № 37. – С. 54–57.

16. Варчук В. В. Екологічний вплив транспорту на навколишнє природне середовище Вінницького регіону / В. В. Варчук, І. В. Варчук, М. О. Бишко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2012. – № 9 (180). – Ч. 1 – С. 107–113.

17. Варчук В. В. Вплив маси автомобіля на показники токсичності відпрацьованих газів / В. В. Варчук, І. В. Варчук // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2013. – № 5 (194). – Ч. 2. – С. 53–56.

18. Ідентифікація та оптимізація інформаційних моделей динамічних багатозв'язних просторово-розподілених систем для задач моніторингу, збереження даних та автоматизованого управління : звіт про НДР: № 28-Д-350 / Вінницький національний технічний університет ; кер. В. Б. Мокін ; виконав : Є. М. Крижановський [та ін.]. – Київ, 2015. – 273 с. – № ДР 0113U003135. – Інв. № 0215U006147.

19. William S. Levine. Control System Fundamentals / William S. Levine. – CRC Press, 1999. – 480 p.

20. Mutambara A. Design and Analysis of Control Systems / Arthur G.O Mutambara. – USA : CRC Press, 1999. – 832 p.

21. Karny M. Dealing with Complexity : A Neural Networks Approach / M. Karny, K. Warwick, V. Kurkova. – Springer Science & Business Media, 2012. – 308 p.

22. Cameron I. Process Modelling and Model Analysis / I. Cameron, K. Hangos. – Academic Press, 2001. – 543 p.

23. E. Evangelisti. Controllability and Observability : Lectures given at a Summer School of the Centro Internazionale Matematico Estivo (C.I.M.E.) held in Pontecchio (Bologna), Italy, July 1–9, 1968 / E. Evangelisti. – Springer Science & Business Media, 2011. – 289 p.

24. Fragnelli G. Carleman Estimates, Observability Inequalities and Null Controllability for Interior Degenerate Nonsmooth Parabolic Equations / G. Fragnelli, D. Mugnai. – American Mathematical Soc, 2016. – 83 p.

25. Abur A. Power System State Estimation : Theory and Implementation / A. Abur, A. Expósito. – CRC Press, 2004. – 327 p.
26. Corless M. Linear Systems and Control : An Operator Perspective / M. Corless, A. Frazho. – CRC Press, 2003. – 368 p.
27. Budajova K. M 2-edge coloring and maximum matching of graphs / K. Budajova, J. Czap. // International journal of pure and applied mathematics. – 2013. – № 2. – P. 161–167.
28. Czap J. M i-edge colorings of graphs / Julius Czap. // Appl. Math. Sci, Ruse. – 2011. – № 5. – P. 2437–2442.
29. Shahraeini M. A survey on topological observability of power systems / M. Shahraeini, M. Javidi // Power Engineering and Automation Conference (PEAM), 2011 IEEE. – 2011. – P. 373–376.
30. Duan R. Linear-time approximation for maximum weight matching / R. Duan, S. Oettie // Journal of the ACM. – 2014. – № 61.
31. Drake D. A Linear Time Approximation Algorithm for Weighted Matchings in Graphs? / D. Drake, S. Hougardy // ACM Transactions on Algorithms. – 2005. – № 1. – P. 107–122.
32. Erdos P. Counting bichromatic evolutionary trees / P. Erdos, L. Szekely // Discrete Applied Mathematics. – 1993. – № 47. – P. 1–8.
33. Michael J. Dinneen. A computational attack on graffiti's matching and chromatic number conjectures / Michael J. Dinneen., 1993. – 17 p. – (Discrete Applied Mathematics).
34. John E Lenz. Extremal graph theory : ramsey-turan numbers, chromatic thresholds and minors / John E Lenz. – Illinois : Urbana, 2011. – 83 p.
35. Евстигнеев В. А. Словарь по графам в информатике / В. А. Евстигнеев, В. Н. Касьянов. – Новосибирск, 2009. – 300 с.
36. Manu B. Acyclic edge coloring of graphs : дис. докт. філос. наук : Bangalore – 560 / Manu Basavaraju. – Department of computer science and automation Indian 2010. – 112 p.
37. Hiroyuki Mori. A fast method for topological observability analysis using minimum spanning tree technique / Hiroyuki Mori // IEEE Transactions on Power Systems. – 1991. – № 6. – P. 491 – 500.
38. A. S. Costa. Power System Topological Observability Analysis including Switching Branches / A. S. Costa, K. A. Clements, Elizete Lourenço // IEEE Power Engineering Review. – 2002. – № 22. – P. 58–59.
39. Optimal PMU placement method for complete topological observability of power system under various contingencies / E. Abiri,



F. Rashidi, T. Niknam, M. Reza Salehi // IEEE Transactions on Power Systems. – 2014. – P. 585–593.

40. Forgy C. Rete : A fast algorithm for the many pattern/many object pattern match problem / Charles L. Forgy // Artificial Intelligence. – 1982. – № 19. – P. 17–37.

41. Haraguchi K. A maximum matching based heuristic algorithm for partial latin square extension problem / K. Haraguchi, M. Ishigaki, A. Maruoka // Proceedings of the 2013 Federated Conference on COmputer Science and Information Systems. – 2013. – P. 347–354.

42. Сучасні тенденції застосування мов програмування у геоінформаційних системах / Б. С. Бусигін, Г. М. Коротенко, Л. М. Коротенко // Геоінформатика. – 2003. – № 3. – С. 24–29.

43. Прикладна інформатика. Підручник / Б. С. Бусигін, Г. М. Коротенко, Л. М. Коротенко. – Затверджено Міністерством освіти і науки України, як підручник для студентів вищих навчальних закладів (Лист МОН № 14/18-2-1733 від 16.07.04). – Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2004 – 565 с.

44. Моделирование геотехнических систем : монографія / Г. Г. Півняк, О. М. Шашенко, О. О. Сдвижкова, Б. С. Бусигін та ін. ; за заг. ред. Г. Г. Півняка. – Д. : Національний гірничий університет, 2009. – 252 с.

45. Pivnyak G. Geographic information technology monitoring and mapping of coal fires in Ukraine, according to the space survey / G. Pivnyak, B. Busygin, I. Garkusha // 12th International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production SWEMP 2010. Prague. – P. 416–422.

46. Богданов В. А. Метод расчетных траекторий для определения качества измерений и точности оценок установившегося режима электрической системы // Статическая обработка оперативной информации в электроэнергетических системах. – Иркутск : СЭИ СО АН СССР, 1979. – С. 26–40.

47. Баранов Г. Л. Структурное моделирование сложных динамических систем / Г. Л. Баранов, А. В. Макаров. – К. : Наукова думка, 1986. – 272 с.

48. Дубовой В. М. Моделі прийняття рішень в управлінні розподіленими динамічними системами : монографія / В. М. Дубовой, О. О. Ковалюк. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 185 с.

49. Мокін Б. І. Комп'ютерне моделювання процесів оптимізації центрування електричних мереж : монографія / Б. І. Мокін, А. В. Камінський. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 122 с.

50. Гамм А. З. Методологические вопросы оценивания состояния и идентификации в энергетических системах / А. З. Гамм // Вопросы оценивания и идентификации в энергетических системах. – Иркутск : СЭИ СО АН СССР, 1974. – С. 29–51.

51. Гамм А. З. Нелинейная наблюдаемость электроэнергетических систем / А. З. Гамм // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1980. – № 2. – С. 3–14.

52. Гамм А. З. О синтезе систем сбора данных для оценивания электроэнергетических систем / А. З. Гамм // Электронное моделирование. – 1981. – № 2. – С. 65–70.

53. Гамм А. З. Об эквивалентировании моделей установившегося режима электроэнергетических систем по критериям наблюдаемости / А. З. Гамм // Численные методы анализа и их приложение. – Иркутск : СЭИ СО АН СССР, 1983. – С. 165–171.

54. Гамм А. З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем / А. З. Гамм. – М. : Наука, 1976. – 220 с.

55. Гамм А. З. Учет нелинейных свойств ЭЭС при анализе наблюдаемости / А. З. Гамм // Статистическая обработка оперативной информации в электроэнергетических системах. – Иркутск : СЭИ СО АН СССР, 1979. – С. 39–48.

56. Оценивание состояния в электроэнергетике / А. З. Гамм, Л. Н. Герасимов, И. И. Голуб и др. – М. : Наука, 1983. – 320 с.

57. Гамм А. З. Наблюдаемость электроэнергетических систем / А. З. Гамм, И. И. Голуб, Д. Я. Кесельман // Электричество. – 1975. – № 9. – С. 1–7.

58. Гамм А. З. Некоторые задачи анализа режима электроэнергетических систем по данным измерений / А. З. Гамм, И. И. Голуб, Г. Н. Ополева // Электричество. – 1984. – № 6. – С. 1–6.

59. Гамм А. З., Теоретические основы системных исследований в энергетике / А. З. Гамм, А. А. Макаров, Б. Г. Санаев и др. – Новосибирск : Наука, 1971. – 334 с.

60. Гамм А. З. Нелинейная наблюдаемость электроэнергетических систем / А. З. Гамм // Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт. – 1980. – № 2. – С. 3–14.

61. Гамм А. З. Сенсоры и слабые места в электроэнергетических системах / А. З. Гамм, И. И. Голуб. – Иркутск : СЭИ СО РАН, 1996. – 99 с.

62. Лисеев М. С. Автоматическое формирование математических моделей электроэнергетических систем по данным телеметрии /

М. С. Лисеев, С. В. Почечуев // Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт. – 1983. – № 6. – С. 27–33.

63. Мокин Б. И. Методические указания по изучению курса «Специальные вопросы энергосистем». Для студентов специальности 0302 всех форм обучения. – Винница : ВПИ, 1982. – 60 с.

64. Гамм А. З. Наблюдаемость электроэнергетических систем / А. З. Гамм, И. И. Голуб. – М. : Наука, 1990. – 200 с.

65. Аоки М. Оптимизация стохастических систем / М. Аоки. – М. : Наука, 1971. – 424 с.

66. Лисеев М. С. Автоматическое формирование математических моделей электроэнергетических систем по данным телеметрии / М. С. Лисеев, С. В. Почечуев // Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт. – 1983. – № 6. – С. 27–33.

67. Мокін В. Б. Інформаційна технологія автоматизації обробки параметрів геоінформаційних систем з геометричними мережами / В. Б. Мокін, В. Г. Сторчак // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 5. – С. 79–83.

68. Мокін В. Б. Новий підхід до формалізації та автоматизації обробки схем відбору проб води у підсистемі «Вода та скиди» АСУ «ЕкоІнспектор» Держекоінспекції Мінприроди України / В. Б. Мокін, М. П. Боцула, А. Р. Яцолт // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. Електронне видання. – 2008. – № 2. – Режим доступу до журн : <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-2/2008-2.htm>.

69. Комп'ютеризовані регіональні системи державного моніторингу поверхневих вод : моделі, алгоритми, програми : монографія / В. Б. Мокін, М. П. Боцула, Г. В. Горячев, А. Р. Яцолт ; під ред. В. Б. Мокіна. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 315 с.

70. Мокін В. Б. Інформаційна технологія інтегрування математичних моделей у геоінформаційні системи моніторингу поверхневих вод : монографія / В. Б. Мокін, Є. М. Крижановський, М. П. Боцула. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 152 с.

71. Van Cutsem Th. A simple algorithm for power system observability analysis and related functions / Cutsem Th. Van, P. J. Gailly // IFAC Symp. 39-83. Florence, 1983. – P. 101–105.

72. Кігель А. Г. Особливості застосування інформаційних технологій в електричних мережах / Кігель А. Г. // Науковий вісник Націона-

льного гірничого університету. – Дніпропетровськ, 2011. – № 6. – С. 121–126.

73. Голуб И. И. Комплекс «Расстановка ТМ» для выбора состава измерений в ЭЭС / И. И. Голуб // Статическая обработка оперативной информации в электроэнергетических системах. – Иркутск : СЭИ СО АН СССР, 1979. – С. 244–253.

74. Голуб И. И. Методика выбора избыточного состава измерений / И. И. Голуб // Алгоритмы обработки данных в электроэнергетике. – Иркутск : СЭИ СО АН СССР, 1982. – С. 38–47.

75. Голуб И. И. Учет надежности при синтезе систем сбора данных в ЭЭС / И. И. Голуб // Информационное обеспечение диспетчерского управления в электроэнергетике. – Новосибирск : Наука, 1985. – С. 169–175.

76. Савина Н. В. Системный анализ потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях в условиях неопределенности : дис. доктора техн. наук : 05.14.02 / Савина Наталья Викторовна. – Благовещенск, 2010. – 564 с.

77. Bongers C. Observability for real-time state estimations / C. Bongers, E. Ricke, E. Handehin // Study Committee XXXII Meet., Dortmund. Rio de Janeiro, 1981. – P. 81 SC 08.

78. Borkowska B. The state estimation of not fully observable power system / B. Borkowska, A. Klos // Study Committee XXXII Meet., Dortmund. – Rio de Janeiro, 1977. – P. 32–77.

79. Clements K. A Wollenberg B. F. Observability in power system state estimation // IEEE, PES Summer Meet. San Francisco (Cal.), 1975. – P. A 75447-3.

80. Clements K. A. Power system state estimation residual analysis : an algorithm using network topology / K. A. Clements, G. R. Krumpholtz, P. W. Davis // Fbid. – 1984. – № 4. – P. 1779–1787.

81. Clements K. A. State estimation measurement system reliability evaluation. An efficient algorithm based on topological observability theory / K. A. Clements, G. R. Krumpholtz, P. W. Davis // IEEE Trans. PAS. – 1982. – № 4. – P. 997–1003.

82. Clements K. A. State estimation with measurement deficiency : an algorithm that determines the maximal observable subnetwork / K. A. Clements, G. R. Krumpholtz, P. W. Davis // Ibid. – № 9. – P. 3044–3052.

83. Cutsem Th. Von. Power system observability and related functions: deviation of appropriate strategies and algorithms / Th. Von. Cutsem // Intern. J. Elec. : Power Energy Syst. – 1985. – № 3. – P. 175–187.

84. Zeiler Michael. Modeling our World. / Michael Zeiler. – Redlands, USA : ESRI, 1999. – 202 p.

85. Гавенко О. В. Інформаційна технологія для побудови аналітичних геоінформаційних систем багатозв'язних просторово-розподілених об'єктів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.13.06 «Інформаційні технології» / Гавенко Олег Віталійович : ВНТУ. – Вінниця, 2013. – 23 с.

86. Гавенко О. В. Технологія автоматизованої побудови інформаційної моделі для моделювання процесів у багатозв'язних просторово-розподілених системах / О. В. Гавенко, В. Б. Мокін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця. – 2013. – № 2. – С. 73–80.

87. Інформаційні технології автоматизації обробки параметрів геоінформаційних систем з геометричними мережами : монографія / В. Б. Мокін, В. Г. Сторчак, Є. М. Крижановський та ін. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 196 с.

88. Буренскене М. Ч. Моделирование транспортной инфраструктуры с использованием информационных систем / М. Ч. Буренскене, Р. Р. Ушпалите. – Екатеринбург : Комвакс АМБ, 2003. – С. 120–124.

89. Введение в математическое моделирование транспортных потоков : учеб. пособие / А. В. Гасников, С. Л. Кленов, Е. А. Нурминский [и др.]. – М. : МФТИ, 2010. – 362 с.

90. Levin A.U. Control of nonlinear dynamical systems using neural networks / A.U. Levin, K.S. Narendra // IEEE Transactions on Neural Networks. – 1996. – Volume: 7. – P. 30–42.

91. Marchal F. Modeling location choice of secondary activities with a social network of cooperative agents / F. Marchal and K. Nagel // Transportation Research Record. – 2005. – № 1935. – P. 141–146.

92. An agent-based microsimulation model of Swiss travel / B. Raney, N. Çetin, A. Völlmy, M. Vrtic, K. W. Axhausen and K. Nagel // First results Networks and Spatial Economics. – 2003. – № 3. – P. 23–42.

93. Мокін В. Б. Новий метод синтезу геоінформаційних моделей природних систем за математичними моделями процесів у них / В. Б. Мокін, Є. М. Крижановський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 4. – С. 40–47.

94. Кацев С. Ш. Математичні моделі детермінізації процесів в системах електропостачання : монографія / С. Ш. Кацев, Б. І. Мокін. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 114 с.

95. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень. Частина 1 : навчальний посібник / Р. Н. Кветний, І. В. Богач, О. Р. Бойко [та ін.]. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 191 с.

96. Метод ідентифікації параметрів моделі інтенсивності руху автомобілів біля супермаркета як центра тяжіння автотранспорту міста / О. В. Гавенко, В. Б. Мокін, В. Г. Сторчак, І. О. Медведєв // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 1. – С. 124–128.

97. Steven L. Jones Traffic simulation software comparison study / Steven L. Jones, Andrew J. Sullivan, P. E. Naveen Cheekoti // University Transportation Center for Alabama Report 02217. – 2004. – Р. 1–58.

98. Гофман Д. С. Інструментальні програмні засоби інтеграції математичних моделей у системи підтримки прийняття рішень з екологічної безпеки : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 01.05.03 / Гофман Д. С. – Київ, 1999. – 17 с.

99. Екологія та автомобільний транспорт / [Гутаревич Ю. Ф., Меркалов Д. В., Говорун А. Г. та ін.]. – К. : Арістей, 2006. – 292 с.

100. The wind field model. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.indic-airviro>.

101. Общесоюзный нормативный документ Госкомгидромета СССР (ОНД-86). Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л. : Гидрометеиздат, 1987. – 93 с.

102. Методи, моделі та інформаційні технології оцінювання станів складних об'єктів : монографія / [Є. І. Кучеренко, В. Є. Кучеренко, І. С. Глушенкова, І. С. Творошенко]. – Х. : ХНАМГ, ХНУРЕ, 2012. – 276 с.

103. Основи математичного моделювання в екології : навч. посібник з грифом МОН України / [А. В. Гладкий, І. В. Сергієнко, В. В. Скопельський, Ю. А. Гладка]. – К. : Політехніка. – 2009. – 240 с.

104. Автотранспортные потоки и окружающая среда : учеб. пособие для вузов / В. Н. Луканин, А. П. Буслаев, Ю. В. Трофименко, М. В. Яшина. – М. : ИНФРА-М, 1998. – 408 с.

105. Екологія та автомобільний транспорт : навч. посібник / Ю. Ф. Гутаревич, Д. В. Зеркалов, А. Г. Говорун та ін. – К. : Арістей, 2006. – 292 с.

106. Гутаревич Ю. Ф. Екологія та автомобільний транспорт : Навчальний посібник 2-ге вид., перероблене та доповнене / Ю. Ф. Гутаревич. – К. : Арістей, 2008. – 296 с.

107. Зотов Л. Л. Экологическая безопасность производства и автомобильного транспорта : учеб. пособие / Л. Л. Зотов. – СПб. : СЗТУ, 2003. – 90 с.

108. Павлова Е. И. Экология транспорта : учебник для вузов / Е. И. Павлова. – М. : Транспорт, 2000. – 248 с.

109. Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин у повітря автотранспортом, який використовується суб'єктами господарської діяльності та іншими юридичними особами всіх форм власності. Затверджено наказом Держкомстату України від 6 вересня 2000 р. № 293 із змінами і доповненнями, внесеними наказом Державного комітету статистики України від 13 січня 2004 р. № 15. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0293202-00>

110. Транспорт Вінницької області за 2010 рік : стат. збірник / Державний комітет статистики України. Головне управління статистики у Вінницькій області ; за ред. С. В. Рибалко, відп. за випуск А. І. Лесік. – Вінниця : Головне управління статистики у Вінницькій області, 2011. – 85 с.

111. Мокін Б. І. Ідентифікація закономірностей нечіткими базами знань : монографія / Б. І. Мокін, Ю. І. Мітюшкін, О. П. Ротштейн. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. – 145 с.

112. Берк К. Анализ данных с помощью Microsoft Excel / К. Берк, П. Кэйри. – М. : Вильямс, 2005. – 560 с.

113. Джон Уокенбах. Формулы в Microsoft Excel 2010 / Джон Уокенбах ; пер. с англ. А. Сысонок. – М. : Диалектика, 2011. – 704 с.

114. Каганов В. И. Компьютерные вычисления в средах Excel и Mathcad / В. И. Каганов. – М. : Горячая Линия–Телеком, 2011. – 328 с.

115. Мокін В. Б. Автоматизація обробки екологічних даних з ГІС з використанням ППП Mathcad / В. Б. Мокін, Є. М. Крижановський, А. В. Камінський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця. – 2011. – № 2. – С. 42–45.

116. Черняк А. А. Высшая математика на базе Mathcad. Общий курс : учеб. пособие / А. А. Черняк, Ж. А. Черняк, Ю. А. Доманова. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 608 с.

117. Смоленцев Н. К. MATLAB. Программирование на Visual C#, Borland JBuilder, VBA / Н. К. Смоленцев. – М. : ДМК Пресс, 2011. – 456 с.

118. Алексеев Е. Р. MATLAB 7 / Е. Р. Алексеев, О. В. Чеснокова. – М. : ИТ Пресс, 2006. – 464 с.

119. Верлань А. Ф. Пакет прикладных программ для решения интегральных уравнений в среде MATLAB / А. Ф. Верлань, И. О. Горошко, Д. Э. Контрерас // Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB : сб. тезисов докладов Всероссийской научной конференции. – М. : ИПУ РАН, 2002. – 207 с.

120. Швачич Г. Г. Лінійна алгебра в розрахунках середовища Mathcad : підручник для студ. екон. спец. / Г. Г. Швачич ; Національна металургійна академія України ; Дніпропетровська академія управління, бізнесу та права ; Кафедра інформатики та математичних методів в економіці. – Дніпропетровськ, 2000. – 236 с.

121. Наукові засади раціонального використання водних ресурсів України за басейновим принципом : монографія / За редакцією В. А. Сташука ; В. А. Сташук, В. Б. Мокін, В. В. Гребінь, О. В. Чунарьов. – Херсон : Грінь Д. С., 2014. – 320 с.

122. Методики гідрографічного та водогосподарського районування території України відповідно до вимог Водної Рамкової Директиви Європейського Союзу / В. В. Гребінь, В. Б. Мокін, В. А. Сташук, Є. М. Крижановський [та ін.]. – К. : Інтерпрес ЛТД, 2013. – 55 с.

123. Крижановський Є. М. Метод розрахунку водогосподарського балансу для ділянок басейну з урахуванням детальних даних спецводокористування / Є. М. Крижановський, Т. В. Полудненко // IV Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю (Екологія/Ecology-2013), 25–27 вересня, 2013. – Вінниця : ДІЛО, 2013. – С. 239–241.

124. Мокін В. Б. Методологія розрахунку водогосподарського балансу річки Південний Буг / В. Б. Мокін, Т. В. Полудненко // XLII регіональна науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області. [Електронне наукове видання матеріалів конференції]. – Вінниця, 2013. – Режим доступу : <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2013/ineek/txt/poludnenko.pdf>

125. Мокін В. Б., Крижановський Є. М., Гавенко О. В. Комп'ютерна програма «Автоматизована система розрахунку водогосподарського балансу району річкового басейну Південного Бугу» // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 56206. – К. : Державна служба інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації : 27.08.2014.



126. Розробка моделі водогосподарського балансу району річкового басейну Сіверського Дінця / В. Б. Мокін, О. В. Чунарьов, В. В. Гребінь [та ін.] // Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції «Досягнення та перспективи розвитку водогосподарської галузі : до 100-річчя від дня народження М. А. Гаркуші – першого міністра меліорації і водного господарства України». – 11–12 вересня 2014 року. Режим доступу: <http://dsr.univ.kiev.ua/pub/publish/120456/>

127. Розробка моделі водогосподарського балансу району річкового басейну Південного Бугу : Звіт про НДР / В. Б. Мокін, Є. М. Крижановський, О. В. Гавенко [та ін.] – Вінниця : Вінницький нац. техн. ун-т, 2013. – 2845 (№ ДР 0113U005101). – 88 с.

128. Автоматизована система розрахунку та прогнозування водогосподарського балансу річкових басейнів України / О. В. Чунарьов, В. Б. Мокін, Є. М. Крижановський, В. В. Гребінь // Тези доповідей науково-технічної конференції «Вода та довкілля» на XI Міжнародному водному форумі «AQUA UKRAINE-2013», Київ, 5–8 листопада 2013 р. – [Електронний ресурс на DVD].

129. Мокін В. Б. Новий метод оптимізації програм моніторингу управліннь водних ресурсів України з урахуванням вимог моніторингу стану вод та водокористування / В. Б. Мокін, Є. М. Крижановський, А. Р. Яцолт // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2013. – № 1. – С. 3–8.

130. Лапшин А. А. Математическое моделирование процессов нормализации микроклимата в глубоких рудных шахтах / А. А. Лапшин // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2014. – № 3. – С. 137–144.

131. Автоматизація ідентифікації та оптимізації характеристик просторово-розподілених систем за інформаційними моделями їх елементів : звіт про НДР 28-Д-338 (№ ДР 0111U001116). Інв. № 0213U002284 / В. Б. Мокін, М. П. Боцула, О. В. Гавенко [та ін.] ; Вінниц. нац. техн. ун-т. – К., 2013. – 219 с.

132. Родзиллер И. Д. Прогноз качества воды водоемов-приемников сточных вод / И. Д. Родзиллер. – М. : Стройиздат, 1984. – 263 с.

133. Фролов В. А. Определение степени смешения сточных вод с водой водотока / В. А. Фролов // Производственные сточные воды. – М. : Медгиз, 1950. – Вып. 2. – С. 134–141.

134. Світличний О. О. Основи геоінформатики : навч. посібник / О. О. Світличний, С. В. Плотницький ; за заг. ред. О. О. Світличного. – Суми : Університетська книга, 2006. – 295 с.
135. ArcGIS 9. Geodatabase Workbook. – Redlands, USA : ESRI, 2004. – 258 p.
136. ArcGIS 9. Managing ArcSDE Application Serves. – Redlands, USA : ESRI, 2004. – 147 p.
137. Vienneau A. Using ArcCatalog. – Redlands, USA : ESRI, 2001. – 286 p.
138. Бойко О. В. Оцінка ефективності протипаводкових заходів на малих річкових водозборах Закарпаття на основі розрахунків розподіленої моделі «опади-стік» / О. В. Бойко, М. Й. Железняк // Математичні машини і системи. – 2011. – С. 149–160.
139. Кюнж Ж. А. Численные методы в задачах речной гидравлики / Ж. А. Кюнж, Ф. М. Холли, А. Вервей. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 252 с.
140. Інформаційні технології автоматизації обробки параметрів геоінформаційних систем з геометричними мережами : монографія / В. Б. Мокін, В. Г. Сторчак, Є. М. Крижановський [та ін.]. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 196 с.
141. Мокін В. Б. Аналіз впливу капітального ремонту доріг на стан атмосферного повітря з використанням геоінформаційних технологій на прикладі м. Вінниці / В. Б. Мокін, Ю. С. Семчук, О. П. Сорочан, О. В. Риженко // Екологічна безпека та природокористування : зб. наук. праць. – К., 2011. – Вип. 7. – С. 5–15.
142. Zgurowsky M. Z. Principles and Methods of Impulse Processes Control in Cognitive Maps of Complex Systems / M. Z. Zgurowsky, V. D. Romanenko, Y. L. Milyavskiy // Journal of Automation and Information Sciences. – 2016. – V. 48, Issue 3. – P. 36–45.
143. Jieun Kim Futuristic data-driven scenario building : Incorporating text mining and fuzzy association rule mining into fuzzy cognitive map / Jieun Kim, Mintak Han, Youngjo Lee, Yongtae Park // Expert Systems with Applications. – 2016. – V. 57. – P. 311–323.

*Наукове електронне видання комбінованого використання.  
Можна використовувати в локальному та мережному режимах*

Мокін Віталій Борисович  
Варчук Ілона Вячеславівна  
Крижановський Євгеній Миколайович

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АНАЛІЗУ  
ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ТОПОЛОГІЧНОЇ СПОСТЕРЕЖУВАНOSTI  
БАГАТОЗВ'ЯЗНИХ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

Монографія

Редактор С. Малішевська  
Оригінал-макет підготовлено І. Варчук

Системні вимоги:  
процесор Pentium; 512 Mb RAM;  
Windows XP,7,8,10; Acrobat Reader 6.0+.  
Один електронний оптичний диск (CD-ROM); Обсяг даних 4,0 Мб.  
Наклад 100 (1-й запуск 1–30) прим. Зам. № E2019-05  
Видавець та виготовлювач – Вінницький національний технічний університет,  
Інформаційний редакційно-видавничий центр.  
Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ, ГНК, к. 114,  
м. Вінниця, 21021, тел.: (0432) 59-85-32, 59-81-59.  
**press.vntu.edu.ua**; *email*: kivc.vntu@gmail.com.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

---

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/522>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>