

Український державний університет залізничного транспорту

Затверджено  
рішенням вченої ради факультету  
Управління процесами перевезень  
прот. № 1 від 28.08.2020 р

Рекомендовано  
на засіданні кафедри управління  
експлуатаційною роботою,  
прот. № 1 від 25.08.2020 р.

## СИЛАБУС З ДИСЦИПЛІНИ

# МЕТОДИ МАТЕМАТИЧНОГО ТА КОП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

II семестр – першого навчального року,  
I та II семестри – другого навчального року

Освітній рівень третій (доктор філософії)  
галузь знань 27 Транспорт

спеціальність 275.02 Транспортні технології (на залізничному транспорті)

Час та аудиторія проведення занять: згідно індивідуального розкладу  
<https://kart.edu.ua/unit/phd/zdobuvach>

### Команда викладачів:

Лектор: Прохорченко Андрій Володимирович (доктор технічних наук, доцент, професор кафедри управління експлуатаційною роботою) Контакти: +38(057) 730-10-88      E-mail: <a href="mailto:prokhorchenko@kart.edu.ua">prokhorchenko@kart.edu.ua</a>
Години прийому та консультацій: 13.00-14.00 вівторок – четвер Розміщення кафедри: місто Харків, майдан Фейербаха, 7, 1 корпус, 4 поверх, 401 аудиторія.
Веб-сторінки курсу: <a href="http://do.kart.edu.ua/">http://do.kart.edu.ua/</a> Додаткові інформаційні матеріали: <a href="http://metod.kart.edu.ua/last/process/">http://metod.kart.edu.ua/last/process/</a>

## Короткий опис

Одним з головних напрямків розвитку транспорту, зокрема залізничного є автоматизація та цифровізація транспортних процесів. Використання методів математичного та комп'ютерного моделювання інженерних і наукових задач в транспортній галузі дозволяє значно підвищити ефективність процесів створення нових інноваційних технологій та управління існуючими. Математичне та комп'ютерне моделювання стало головним засобом дослідження складних транспортних процесів і систем, на якому базуються сучасні підходи до проектування, оптимізації та управління в залізничній галузі. Отже, в умовах початку індустріальної революції - Промисловість 4.0 (англ., Industry 4.0), отримані знання при вивченні дисципліни “Методи математичного та комп'ютерного моделювання” є важливими фаховими навичками для науковців в галузі транспорту, зокрема залізничного.

## Мета та цілі курсу

Метою викладання навчальної дисципліни “Методи математичного та комп'ютерного моделювання” є отримання аспірантами знань і практичних навичок в галузі математичного і комп'ютерного моделювання для розвитку автоматизації та цифровізації транспортних систем та їх технологічних процесів, зокрема для створення інтелектуальних залізничних транспортних систем, що дозволить підвищити продуктивність та прибутковість транспортних компаній.

Вивчення дисципліни “Методи математичного та комп'ютерного моделювання” дозволить аспіранту дати прикладні глибокі знання в галузі математичного моделювання, що дозволить аспіранту самостійно досліджувати, аналізувати та прогнозувати поведінку транспортних систем, або окремих процесів в них.

У процесі вивчення дисципліни аспірант освоює теоретичні основи методів математичного та комп'ютерного моделювання і їх методологічну базу, інструментарій для застосування в транспортній галузі.

Курс має на меті сформулювати та розвинути наступні компетентності аспірантів:

- 1. Ціннісно-сміслову компетентність** (формування та розширення світогляду аспіранта в галузі математичного та комп'ютерного моделювання, здатність до розуміння важливості застосування методів математичного та комп'ютерного моделювання для підвищення ефективності транспортних систем; вміння не просто оволодіти різними техніками та методами математичного та комп'ютерного моделювання, а розуміти та формулювати ідеї розв'язання проблем в транспортних системах);
- 2. Загальнокультурну компетентність** (розуміння ролі наукових досліджень із застосуванням математичного та комп'ютерного моделювання у загальнонаціональному інноваційному розвитку транспортних систем);
- 3. Навчально-пізнавальну компетентність** (формування у аспіранта зацікавленості у застосуванні методів математичного та комп'ютерного моделювання для наукових досліджень проблем транспортних технологій; з метою розвитку креативної складової компетентності творчим та інноваційним способом адаптувати та розвивати методи математичного та комп'ютерного моделювання для удосконалення транспортних послуг; оволодіння знаннями основних етапів математичного та комп'ютерного моделювання для успішної формалізації технологічних процесів транспорту; набуття навичок критичного оцінювання транспортних проблем для адекватного застосування методів математичного і комп'ютерного моделювання)

4. **Інформаційну компетентність** (розвиток вмінь аспіранта до самостійного пошуку, аналізу, структурування та відбору потрібної наукової інформації в області транспортних технологій за допомогою сучасних підходу або методу математичного моделювання, уміння працювати з основними науковими ресурсами)
5. **Комунікативну компетентність** (розвиток у аспіранта навичок роботи в команді шляхом реалізації групових проєктів в галузі наукових досліджень транспортних технологій та їх технологічних процесів на основі математичного моделювання, вести дискусію у досліджуваній галузі на експертному рівні, вміння презентувати власний проєкт та кваліфікаційну роботу);
6. **Технологічна компетентність** (розвиток у аспіранта навичок володіння сучасними математичними пакетами для побудови комп'ютерних моделей для формалізації транспортних процесів з метою їх евристичного, наближеного або точного розв'язання; перевірки на адекватність та точність.

## Чому ви маєте обрати цей курс?

Якщо вас цікавлять знання з математичного та комп'ютерного моделювання для успішного застосування в науково-дослідних роботах, у власному дисертаційному дослідженні, вміння не тільки вивчити методи математичного і комп'ютерного моделювання, а й навчитись творчим та інноваційним способом адаптувати їх для вирішення транспортних проблем - вам потрібний саме цей курс!

Від здобувачів очікується: базове розуміння філософії, математики, основ експлуатації залізниць, а також обізнаність в питаннях традиційних методів наукових досліджень в галузі транспорту; вміння використовуючи знання методів наукових досліджень у відповідності до об'єктів транспорту, розуміти структуру наукового дослідження.

Окрім базових знань з дисципліни частина курсу присвячена застосуванню методів математичного та комп'ютерного моделювання в галузі транспортних технологій, де будуть вивчені сучасні методи аналізу складних мереж, нейронні мережі, DNN – Deep Neural Network та методи глибокого навчання, методи мультиагентної оптимізації, методи еволюційного моделювання (генетичні алгоритми). Це дозволить отримати найсучасніші знання для успішного написання дисертації та отримання ступеня доктора філософії (PhD).

В межах курсу можливим є отримання додаткових консультацій щодо проблем і особливостей застосування методів математичного моделювання у власних дисертаційних дослідженнях. З найбільш складних аспектів курсу електронною поштою і особисто - у робочий час, можливо отримати будь-яку допомогу.

## Огляд курсу

Цей курс, який вивчається у II, III, IV семестрах, дає аспірантам глибоке розуміння методів математичного та комп'ютерного моделювання із застосуванням в транспортній галузі. Формат проведення лекцій та практичних занять F2F (face2face).

Курс складається з трьох змістовних модулів. Кожен модуль складається з однієї лекції та п'яти практичних занять. Курс супроводжується текстовим матеріалом, презентаціями та груповими завданнями. Аспіранти матимуть можливість застосовувати отримані знання та вирішувати практичні завдання протягом навчання в аудиторії із застосуванням програмних інструментів.

На вивчення навчальної дисципліни відводиться 120 годин/ 4,0 кредити ECTS.

## Методи математичного та комп'ютерного моделювання / схема курсу

<b>Поміркуй</b>	Лекції	<b>Виконай</b>
	Довідковий матеріал	
	Презентації	
	Обговорення в аудиторії	
	Групові завдання	
	Допомога у виконанні кваліфікаційної дисертаційної роботи	
	Індивідуальні консультації	
	Он-лайн обговорення (форум у соціальних мережах)	
	Залік	

Практичні заняття курсу передбачають виконання завдань з вивчення методів математичного та комп'ютерного моделювання (на прикладі залізничного транспорту та попередню підготовку до виконання кваліфікаційної роботи в кінці курсу. Проект фіналізується контрольними заходами (залік). Виконання завдань супроводжується посиланнями у суміжні дисципліни, що доповнюють теми, та формує у аспіранта інноваційну, інформаційну та комунікативну компетентності.

## Ресурси курсу

Інформація про курс розміщена на сайті Університету в розділі дистанційне навчання, включаючи необхідні методичні матеріали, презентації та правила оцінювання курсу.

Додатковий матеріал та посилання на електронні ресурси доступні на сайті Університету у розділі Дистанційне навчання <http://do.kart.edu.ua/course/view.php?id=1454> поряд із питаннями, над якими необхідно поміркувати під час підготовки для обговорення в аудиторії. Необхідна підготовка повинна бути завершена до початку наступної лекції, практичного заняття. Під час обговорення ми запропонуємо вам критично поміркувати над тим, як використовувати різні методи математичного та комп'ютерного моделювання для вирішення різних проблем транспортної галузі. Ви повинні бути готовими до дискусій та мозкових штурмів – ми хочемо знати, що ви думаєте!

Приклади питань для обговорення:

- 1) Поняття математичної моделі та моделювання.
- 2) Що розуміється під комп'ютерною моделлю?
- 3) Роз'яснити етапи математичного моделювання на прикладі вирішення однієї з транспортних проблем.
- 4) Адекватність математичної моделі. Метод Фішера.
- 5) Динамічні та статичні математичні моделі. Основні поняття і сфера застосування.

б) Інструментальні засоби моделювання. Недоліки та переваги моделювання з використанням різних математичних пакетів.

Аспіранти можуть задавати питання, а також обговорювати і аналізувати теми дисципліни поза лекціями. Аспіранти можуть задавати питання про матеріал курсу, індивідуальні завдання та проблеми застосування методів математичного і комп'ютерного моделювання в транспортній галузі в цілому і отримувати відповіді під час консультацій.

## Розподіл лекцій на змістовні модулі

Змістовний модуль 1 (2 сем. I року навчання).

### Основи математичного моделювання.

1. Мета, задача курсу. Поняття моделі та математичного моделювання. Властивості та класифікація моделей. Складність моделі.
2. Узагальнена методика математичного моделювання транспортних проблем.
3. Дослідження об'єкта моделювання і формулювання технічного завдання для розробки моделі.
4. Концептуальна та математична постановка задачі моделювання.
5. Вибір методу моделювання, їх недоліки та переваги при вирішенні транспортних проблем.
6. Перевірки точності та адекватності математичної моделі.

Змістовний модуль 2 (1 сем. II року навчання).

### Основи комп'ютерного моделювання

7. Особливості комп'ютерного моделювання. Обчислювальний експеримент.
8. Основні етапи комп'ютерного моделювання.
9. Розробка алгоритму реалізації комп'ютерної моделі.
10. Моделювання з використанням математичних пакетів. Вибір засобу програмної реалізації алгоритму на комп'ютері.
11. Програмні пакети для імітаційного моделювання (AnyLogic та інші).
12. Проведення комп'ютерного експерименту. Похибки та властивості обчислювальних алгоритмів.

Змістовний модуль 3 (2 сем. II року навчання).

### Застосування методів математичного та комп'ютерного моделювання в галузі транспортних технологій

13. Методи моделювання складних мереж транспортних систем.
14. Методи аналізу складних мереж. Самоорганізована критичність. Дослідження системи організації поїздопотоків на основі теорії перколяції.
15. Нейронні мережі. DNN – Deep Neural Network та методи глибокого навчання.
16. Кореляційний і фрактальний аналіз при дослідженні транспортних проблем.
17. Методи мультиагентної оптимізації.
18. Методи еволюційного моделювання. Особливості застосування генетичного алгоритму.

## Лекції та практичні заняття

Список основних лекцій та практичних занять курсу наведений нижче. Пильнуйте за змінами у розкладі.

II семестр (I курс II семестр) навчальний рік

### Змістовний модуль 1 . Основи математичного моделювання

Тиждень	Кількість годин	Тема лекції	Кількість годин	Тема лабораторних, практичних, семінарських занять
	2	Лекц. № 1 Мета, задача курсу. Поняття моделі та математичного моделювання. Властивості та класифікація моделей. Складність моделі.	2	ПР-1 Узагальнена методика математичного моделювання транспортних проблем.
			2	ПР-2 Концептуальна та математична постановка задачі моделювання.
			2	ПР-3 Концептуальна та математична постановка задачі моделювання.
			2	ПР-4 Вибір методу моделювання, їх недоліки та переваги при вирішенні транспортних проблем.
			2	ПР-5 Перевірки точності та адекватності математичної моделі.

III семестр (II курс I семестр) навчальний рік

### Змістовий модуль 2. Основи комп'ютерного моделювання

Тиждень	Кількість годин	Тема лекції	Кількість годин	Тема лабораторних, практичних, семінарських занять
	2	Лекц. № 1 Основи комп'ютерного моделювання. Обчислювальний експеримент.	2	ПР-1 Основні етапи комп'ютерного моделювання.
			2	ПР-2 Розробка алгоритму реалізації комп'ютерної моделі.
			2	ПР-3 Моделювання з використанням математичних пакетів. Вибір засобу програмної реалізації алгоритму на комп'ютері.
			2	ПР-4 Програмні пакети для імітаційного моделювання (AnyLogic та інші).
			2	ПР-5 Проведення комп'ютерного експерименту. Похибки та властивості обчислювальних алгоритмів.

IV семестр (II курс II семестри) навчальний рік

### Змістовий модуль 3. Застосуванні методів математичного та комп'ютерного моделювання в галузі транспортних технологій

Тиждень	Кількість годин	Тема лекції	Кількість годин	Тема лабораторних, практичних, семінарських занять
	2	Лекц. № 1 Методи моделювання складних мереж транспортних систем.	2	ПР-1 Методи аналізу складних мереж. Самоорганізована критичність. Дослідження системи організації поїздопотоків на основі теорії перколяції.
			2	ПР-2 Нейронні мережі. DNN – Deep Neural Network та методи глибокого навчання.
			2	ПР-3 Кореляційний і фрактальний аналіз при дослідженні транспортних проблем.
			2	ПР-4 Методи мультиагентної оптимізації.
			2	ПР-5 Методи еволюційного моделювання. Особливості застосування генетичного алгоритму.

### Самостійна робота

№ з/п	Назва теми
1	Опрацювання лекційного матеріалу
2	Підготовка до практичних робіт
3	Підготовка індивідуальних завдань для практичних робіт
4	Підготовка та складання модулів, тестів, заліку з курсу
5	Виконання індивідуальних завдань
6	Опрацювання окремих розділів програми, які не викладаються на лекціях та практиках

### Заплановані результати навчання

Викладання дисципліни «Методи математичного та комп'ютерного моделювання» повинно вестись з використанням передових досягнень наукових шкіл світу, спираючись на практичний досвід роботодавців та відповідно до вимог МОН України.

**У результаті вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен:**

Цілями та завданнями навчальної дисципліни є формування та розвиток таких компетентностей:

Здатність розв'язувати комплексні проблеми в галузі професійної та/або дослідницько-інноваційної діяльності у сфері транспортних систем та технологій, що передбачає глибоке переосмислення наявних та створення нових цілісних знань та/або професійної практики.

PH02. Формулювати і перевіряти гіпотези, використовувати для обґрунтування висновків належні докази, зокрема, результати теоретичного аналізу, експериментальних



досліджень (опитувань, спостережень,...) і математичного та/або комп'ютерного моделювання, наявні літературні дані.

РН03. Розробляти та досліджувати концептуальні, математичні і комп'ютерні моделі процесів і систем, ефективно використовувати їх для отримання нових знань та /або створення інноваційних продуктів у сфері.

ЗК01. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.

ЗК02. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації наукового характеру з різних джерел.

ЗК03. Системний науковий світогляд та загальнокультурний кругозір.

ФК01. Здатність виконувати оригінальні дослідження, досягати наукових результатів, які створюють нові знання у сфері транспортних технологій та у дотичних до неї міждисциплінарних напрямках, результати яких можуть бути опубліковані у провідних наукових виданнях з транспортних технологій та суміжних галузей.

ФК03. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми дослідницького характеру в сфері транспортних технологій, оцінювати та забезпечувати якість виконуваних досліджень.

ФК04. Здатність розробляти науково-дослідні проекти у сфері транспортних систем та технологій та управляти ними. ФК05. Здатність застосовувати відповідні математичні методи, моделі, комп'ютерні технології, а також засади стандартизації та сертифікації для розв'язання складних завдань у галузі транспортних систем і технологій.

**Крім того, знати:** основні поняття, етапи, техніки та методи в галузі математичного та комп'ютерного моделювання для успішної формалізації технологічних процесів транспорту.

**вміти:** застосовувати методи математичного та комп'ютерного моделювання для підвищення ефективності транспортних систем; користуватись сучасними математичними пакетами для побудови комп'ютерних моделей; планувати і проводити комп'ютерні експерименти; перевіряти математичну модель на точність та адекватність.

**мати уявлення:** про поняття моделі та математичного моделювання, властивості та класифікацію моделей, складність моделі; про основи формалізації технологічних процесів транспорту для їх дослідження та удосконалення; про основні етапи побудови комп'ютерної моделі, перевірку на адекватність та точність результатів експериментів.

**знаходити** та аналізувати потрібну наукову інформацію в галузі математичного та комп'ютерного моделювання з метою удосконалення транспортних технологій та запобігання плагіату.

**вміти вести дискусію** на експертному рівні у власній досліджуваній галузі із використанням положень математичного та комп'ютерного моделювання на наукових конференціях та симпозиумах, представляти власні проекти, або кваліфікаційну роботу.

**набути** вміння до системного креативного мислення щодо генерації можливих ідей або підходів до формалізації технологічних процесів транспорту, зокрема залізничного.

## Політика оцінювання

При заповненні заліково-екзаменаційної відомості та залікової книжки (індивідуального навчального плану) аспіранта, оцінка, виставлена за 100-бальною шкалою, повинна бути переведена до національної шкали (5, 4, 3,) та шкали ECTS (A, B, C, D, E)

Визначення назви за державною шкалою(оцінка)	Визначення назви за шкалою ECTS	За 100 бальною шкалою	ECTS оцінка
ВІДМІННО – 5	<b>Відмінно</b> – відмінне виконання лише з незначною кількістю помилок	90-100	A



ДОБРЕ – 4	<b>Дуже добре</b> – вище середнього рівня з кількома помилками	82-89	B
	<b>Добре</b> – в загальному правильна робота з певною кількістю грубих помилок	75-81	C
ЗАДОВІЛЬНО - 3	<b>Задовільно</b> - непогано, але зі значною кількістю недоліків	69-74	D
	<b>Достатньо</b> – виконання задовольняє мінімальні критерії	60-68	E
НЕЗАДОВІЛЬНО - 2	<b>Незадовільно</b> – потрібно попрацювати перед тим як отримати залік (без повторного вивчення модуля)	35-59	FX
	<b>Незадовільно</b> - необхідна серйозна подальша робота (повторне вивчення модуля)	<35	F

#### Відвідування лекцій:

Бали за цю складову не нараховуються взагалі, якщо аспірант не відвідував сумарно більш 50% лекційних і практичних занять у модулі без поважних причин. **Максимальна сума становить 10 балів.**

#### Практичні заняття:

Оцінюються за відвідуваннями та стислою презентацією виконаного завдання. **Максимальна сума становить 25 балів.**

#### Ступінь залученості:

Мета участі в курсі – залучити вас до дискусії, розширити можливості навчання для себе та дати вам ще один спосіб перевірити свої погляди на питання щодо методів математичного та комп'ютерного моделювання, застосування сучасних програмних пакетів в галузі транспортних технологій. Участь буде оцінюватися на основі кількості та вірності ваших відповідей. Питання, хоча й заохочуються, однак не оцінюються в цьому блоці. Ми намагаємося надати всім аспірантам рівні та справедливі можливості для підвищення власної залученості. **Максимальна сума становить 10 балів.**

#### Завдання на самостійну роботу:

Здобувачам (аспірантам) відповідно до обраної теми кваліфікаційної роботи пропонується визначити ступінь використання тематики дисципліни «Методи математичного та комп'ютерного моделювання». За вчасне та вірне виконання цього завдання нараховується до **15 балів** до поточного контролю.

#### Залік:

- Аспірант отримує оцінку за залік на підставі поточного контролю шляхом накопичення балів. Максимальна кількість балів, яку може отримати аспірант становить 100 (до 60 балів поточного контролю та до 40 балів під час заліку). Якщо аспірант не погоджується із запропонованими балами, він може підвищити їх на заліку, відповівши на питання викладача (<http://do.kart.edu.ua/course/view.php?id=1454>)

## **Викладач курсу:**



**Прохорченко Андрій Володимирович**  
(<http://kart.edu.ua/pro-kafedry-yer-ua/kolectuv-kafedru-yer-ua/prohorchenko-av-ua>) – лектор, професор кафедри управління експлуатаційною роботою. Отримав науковий ступінь доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.01 - транспортні системи у 2016 році.  
З 2018 р. дійсний член Транспортної академії України.

Напрямок наукової діяльності: формування методів управління пропускнуною спроможністю залізничної інфраструктури в умовах недискримінаційного доступу; дослідження живучості системи організації поїздопотоків на основі теорії перколяції; макроаналіз організації транспортних систем, зокрема залізничних на основі методів аналізу складних мереж; дослідження проблем реформування залізничного транспорту загального користування.

## Політика академічної доброчесності

Порушення Кодексу академічної доброчесності Українського державного університету залізничного транспорту є серйозним порушенням, навіть якщо воно є ненавмисним. Кодекс доступний за посиланням: <http://kart.edu.ua/documentu-zvo-ua>

Зокрема, дотримання Кодексу академічної доброчесності УкрДУЗТ означає, що вся робота на іспитах та заліках має виконуватися індивідуально. Під час виконання самостійної роботи аспіранти можуть консультуватися з викладачами та з іншими аспірантами, але повинні самостійно розв'язувати завдання, керуючись власними знаннями, вміннями та навичками. Посилання на всі ресурси та джерела (наприклад, у звітах, самостійних роботах чи презентаціях) повинні бути чітко визначені та оформлені належним чином. У разі спільної роботи з іншими аспірантами над виконанням індивідуальних завдань, ви повинні зазначити ступінь їх залученості до роботи.

## Політика інтеграції аспірантів із обмеженими можливостями

Вища освіта є провідним чинником підвищення соціального статусу, досягнення духовної, матеріальної незалежності і соціалізації молоді з обмеженими функціональними можливостями й відображає стан розвитку демократичних процесів і гуманізації суспільства.

Доступ до матеріалів дистанційного навчання з цього курсу можна знайти за посиланням: <http://do.kart.edu.ua/>

Для інтеграції аспірантів із обмеженими можливостями в освітній процес Українського державного університету залізничного транспорту створена система дистанційного навчання на основі сучасних педагогічних, інформаційних, телекомунікаційних технологій.

## Література для вивчення дисципліни

1. Juan R.Torregrosa, LucasJódar, Juan C.Cortés, ReginoCriado. Mathematical modeling and computational methods. Journal of Computational and Applied Mathematics, Elsevier Science Publishers BV Amsterdam, The Netherlands, 2016. Vol. 291. Issue C. P. 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2015.04.023>

2. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень. Частина 1: навчальний посібник / Кветний Р. Н., Богач І. В., Бойко О. Р., Софіна О.Ю., Шушура О.М.; за заг. ред. Р.Н. Кветного. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 193 с.
3. Witelski Thomas, Bowen Mark. Methods of Mathematical Modelling. Springer International Publishing, 2015. 305 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23042-9>
4. Прокудін Г. С. Моделі і методи оптимізації перевезень у транспортних системах. — К: НТУ, 2006.—224 с.
5. Панченко Н.Г., Резуненко М.Є. Елементи дослідження операцій в управлінні процесами перевезень: Підручник. Харків: «Діса плюс», 2015. – Ч. 1. - 280 с.
6. Albert, R. Statistical mechanics of complex networks / Reka Albert, Albert-Laszlo Barabási // Reviews Of Modern Physics. – 2002. – Vol. 74. – P. 47-97.
7. Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление: пер.с англ. / А. Пегат. – М.: БИНОМ Лаборатория знаний, 2009. – 798 с.
8. Снарский А.А., Ландэ Д.В. Моделирование сложных сетей. Учебное пособие. К.: НТУУ «КПИ», Киев, 2015. 212 с.
9. Prokhorchenko A. Investigation of scale-invariant property of organization system of train traffic volume based on the percolation theory / Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2014. – Vol. 5(53). – P. 56-64.
10. Linge S., Langtangen H. P. Programming for Computations Python: A Gentle Introduction to Numerical Simulations with Python 3.6. 2nd ed. 2020. - 355 p.
11. McHaney R. Understanding Computer Simulation. URL: <https://library.ku.ac.ke/wp-content/downloads/2011/08/Bookboon/IT,Programming%20and%20Web/understanding.pdf>

## Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. <http://metod.kart.edu.ua/>
2. <http://www.railwayhub.in.ua/>
3. [http://www.uz.gov.ua/about/general\\_information/entertainments/pktbit/](http://www.uz.gov.ua/about/general_information/entertainments/pktbit/)
4. [http://strategic.mit.edu/downloads.php?page=matlab\\_networks](http://strategic.mit.edu/downloads.php?page=matlab_networks)
5. <https://www.mathworks.com/>
6. <https://www.anylogic.com/>
7. <http://mrvar.fdv.uni-lj.si/pajek/>
8. <https://www.python.org/>