Міністерство освіти і науки України

Сумський національний аграрний університет

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра технічного сервісу та галузевого машинобудування

Робоча програма (силабус) освітнього компонента

ОК 9 – Аналітичні та чисельні методи досліджень в механічній інженерії
(обов'язковий)

Реалізується в межах освітньої програми **Галузеве машинобудування**
(назва)

за спеціальністю G11 Машинобудування (за спеціалізаціями)
(шифр, назва)

третього (освітньо-наукового рівня) рівня вищої освіти

Суми – 2025

Розробник: ___________ *Євген КОНОПЛЯНЧЕНКО*, *к.т.н., доцент, доцент*
(підпис) (ПІБ) (вчений ступінь та звання, посада)

Розглянуто, схвалено та затверджено на засіданні кафедри *технічного сервісу та галузевого машинобудування* (назва кафедри)	протокол від *16.09.2025 р.* № *3* Завідувач кафедри _________ *Євген КОНОПЛЯНЧЕНКО*

Погоджено:

Гарант освітньої програми ___________ Михайло ШУЛЯК
(підпис) (ПІБ)

Декан факультету _________________ Владислав ЗУБКО
(підпис) (ПІБ)

Рецензія на робочу програму (додається) надана: _______ Владислав ЗУБКО
(підпис) (ПІБ)

_______ В'ячеслав ТАРЕЛЬНИК
(підпис) (ПІБ)

Методист відділу якості освіти,
ліцензування та акредитації ________________ Надія БАРАНІК
(підпис) (ПІБ)

Зареєстровано в електронній базі: дата: ____________________ 2025 р.

Інформація про перегляд робочої програми (силабусу):

<table>
<tr><td rowspan="2">Навчальний рік, в якому вносяться зміни</td><td rowspan="2">Номер додатку до робочої програми з описом змін</td><td colspan="3">Зміни розглянуто і схвалено</td></tr>
<tr><td>Дата та номер протоколу засідання кафедри</td><td>Завідувач кафедри</td><td>Гарант освітньої програми</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ОСВІТНІЙ КОМПОНЕНТ

<table>
<tr><td>1.</td><td>Назва ОК</td><td colspan="4">Аналітичні та чисельні методи досліджень в механічній інженерії</td></tr>
<tr><td>2.</td><td>Факультет/кафедра</td><td colspan="4">Інженерно-технологічний факультет/ кафедра технічного сервісу та галузевого машинобудування</td></tr>
<tr><td>3.</td><td>Статус ОК</td><td colspan="4">Обов’язковий</td></tr>
<tr><td>4.</td><td>Програма/Спеціальність (програми)</td><td colspan="4">Освітньо-наукова програма «Галузеве машинобудування»
за спеціальністю G11 Машинобудування (за спеціалізацією)</td></tr>
<tr><td>5.</td><td>ОК може бути запропонований для (заповнюється для вибіркових ОК)</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>6.</td><td>Рівень НРК</td><td colspan="4">8 рівень</td></tr>
<tr><td>7.</td><td>Семестр та тривалість вивчення</td><td colspan="4">Денна
2 семестр, 10 тижнів</td></tr>
<tr><td>8.</td><td>Кількість кредитів ЄКТС</td><td colspan="4">5</td></tr>
<tr><td rowspan="3">9.</td><td rowspan="3">Загальний обсяг годин та їх розподіл
90</td><td colspan="3">Контактна робота(заняття)</td><td>Самостійна робота</td></tr>
<tr><td>Лекційні</td><td>Практичні /семінарські</td><td>Лабораторні</td><td></td></tr>
<tr><td>20</td><td>20</td><td></td><td>50</td></tr>
<tr><td>10.</td><td>Мова навчання</td><td colspan="4">Українська</td></tr>
<tr><td>11.</td><td>Викладач/ Координатор освітнього компонента</td><td colspan="4">Коноплянченко Євген Владиславович, к.т.н., доцент.
Години консультацій – кожного понеділка з 12.00 до 14.00, кабінет 316м</td></tr>
<tr><td>11.1</td><td>Контактна інформація</td><td colspan="4">yevhen.konoplianchenko@snau.edu.ua</td></tr>
<tr><td>12.</td><td>Загальний опис освітнього компонента</td><td colspan="4">Дисципліна спрямована на формування у здобувачів теоретичних знань та практичних навичок створення та аналізу інженерних моделей, симуляцій та оптимізації технічних систем.
Підготовці майбутніх науковців до професійного застосування аналітичних та чисельних методів у дослідженні, проєктуванні та діагностиці механічних систем і машин.</td></tr>
<tr><td>13.</td><td>Мета освітнього компонента</td><td colspan="4">Підготовка висококваліфікованих фахівців, здатних формулювати та розв’язувати складні наукові та прикладні інженерні задачі галузевого машинобудування із застосуванням сучасних методів побудови математичних моделей технічних систем та технологічних процесів, методів оптимізації, чисельних алгоритмів, оцінювання похибок та програмних засобів інженерних розрахунків.</td></tr>
<tr><td>14.</td><td>Передумови вивчення ОК, зв'язок з іншими освітніми компонентами ОП</td><td colspan="4">Дисципліна базується на ОК 2 «Сучасні інформаційні технології у науковій діяльності» та ОК 8 «Методологія проведення наукових досліджень»</td></tr>
<tr><td>15.</td><td>Політика академічної доброчесності</td><td colspan="4">Система вимог, які ставляться перед здобувачем вищої освіти під час вивчення освітнього компоненту:
• проходження студентами етапів оцінювання у встановлені терміни;
• виконання і захист письмових та практичних робіт у встановлені</td></tr>
</table>

		терміни; • дотримання при виконанні письмових робіт Положення про порядок перевірки академічних та наукових текстів на унікальність (https://surl.li/ksidbs); • дотримання здобувачми кодексу академічної доброчесності СНАУ (https://surl.li/yzxgnv). Підготовлені до оцінювання письмові роботи повинні бути оригінальними та виконані самостійно здобувачем вищої освіти. Письмові роботи, які виконані і здані із порушенням термінів без поважних причин, оцінюються на оцінку нижче від отриманого результату. Роботи, які виконані з низьким рівнем унікальності або є копією «чужої» роботи оцінюватимуться на «нуль» з послідуючим виконанням роботи згідно іншого оригінального індивідуального завдання. Перездача письмових робіт відбувається після повторного виконання або доопрацювання. Списування із різних джерел інформації (в т.ч. із використанням мобільних девайсів та гаджетів) під час екзаменів заборонено. При виявлені факту списування – робота студента анулюється і екзамен складається повторно. Перескладання екзамену відбувається із дозволу деканату в зазначені терміни після повторного засвоєння матеріалу з освітнього компоненту.
16.	Посилання на курс у системі Moodle	https://cdn.snau.edu.ua/moodle/course/view.php?id=6227
17.	Ключові слова	аналітичні методи, числові методи, математичне моделювання, інженерний аналіз, оптимізація, напружено-деформований стан, цифрові двійники

2. РЕЗУЛЬТАТИ НАВЧАННЯ ЗА ОСВІТНІМ КОМПОНЕНТОМ ТА ЇХ ЗВ'ЯЗОК З ПРОГРАМНИМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ НАВЧАННЯ

Результати навчання за ОК: Після вивчення освітнього компонента здобувач очікувано буде здатен…»	Програмні результати навчання, на досягнення яких спрямований ОК (зазначити номер згідно з нумерацією, наведеною в ОП)							Як оцінюється ДРН
	1	3	4	5	7	8	9	
ДРН 1. Розробляти та досліджувати моделі процесів і систем, використовуючи сучасні цифрові технології та спеціалізоване програмне забезпечення			x			x		Індивідуальне завдання
ДРН 2. Застосовувати методи розрахунку міцності, теплопередачі та динаміки.	x					x	x	Індивідуальне завдання
ДРН 3. Використовувати DEM/FEM-моделювання для інженерних задач.				x	x			Індивідуальне завдання
ДРН 4. Здійснювати FVM-аналіз в інженерних			x	x				Індивідуальне завдання

розрахунках.								
ДРН 5. Здійснювати оптимізацію структурних елементів системи та її технологічних параметрів з урахуванням обмежень по їх реалізації.						x		Індивідуальне завдання
ДРН 6. Проводити CFD/CAE/FEA симуляції.				x		x		Індивідуальне завдання
ДРН 7. Використовувати ML-підходи для контролю, прогнозування, діагностики та оптимізації, оцінювати похибки моделей та розрахунків.		x			x	x		Індивідуальне завдання

ПРН 1. Мати концептуальні та методологічні знання з механічної інженерії і на межі предметних галузей, а також дослідницькі навички, достатні для проведення наукових і прикладних досліджень на рівні останніх світових досягнень з відповідного напряму, отримання нових знань та/або здійснення інновацій.

ПРН 3. Формулювати і перевіряти гіпотези; використовувати для обґрунтування висновків належні докази, зокрема, результати теоретичного аналізу, експериментальних досліджень і математичного та/або комп'ютерного моделювання, наявні літературні дані.

ПРН 4. 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 механічній інженерії та дотичних міждисциплінарних напрямах.

ПРН 5. Застосовувати сучасні інструменти і технології пошуку, оброблення та аналізу інформації, зокрема, статистичні методи аналізу даних великого обсягу та/або складної структури, спеціалізовані бази даних та інформаційні системи.

ПРН 7. Вміти планувати і виконувати експериментальні та/або теоретичні дослідження з галузевого машинобудування та дотичних міждисциплінарних напрямів з використанням сучасних інструментів та дотриманням норм професійної і академічної етики, критично аналізувати результати власних досліджень і результати інших дослідників у контексті усього комплексу сучасних знань щодо досліджуваної проблеми.

ПРН 8. Застосовувати загальні принципи та методи математики, природничих та технічних наук, а також сучасні методи та інструменти, цифрові технології та спеціалізоване програмне забезпечення для провадження досліджень у сфері механічної інженерії.

ПРН 9. Глибоко розуміти загальні принципи та методи механічної інженерії а також методологію наукових досліджень, застосувати їх у власних дослідженнях у сфері галузевого машинобудування та у викладацькій практиці.

3. ЗМІСТ ОСВІТНЬОГО КОМПОНЕНТА (ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ)

Тема. Перелік питань, що будуть розглянуті в межах теми	Розподіл в межах загального бюджету часу				Рекомендована література
	Аудиторна робота			Самостійна робота	
	Лк	П.з / семін. з	Лаб. з.		

Тема 1. Методи аналітичної механіки. Опис руху механічних систем. Спосіб виведення рівнянь руху механічної системи, заснований на принципі найменшої дії. Метод Лагранжа. Опис системи через координати та імпульси. Метод Гамільтона. Опис руху механічних систем через енергії та узагальнені координати Канонічні рівняння руху.	2	-		4	1-9
Тема 2. Практичне застосування теорії пружності та опору матеріалів. Аналітичні розв'язки рівнянь Ламе, Нав'є, Коші. Дослідження процесу згину балок (методи Ейлера–Бернуллі). Аналітичні методи розрахунку кручення валів. Аналіз напружень і деформацій через рівняння Гука.	2	-		4	10-21
Тема 3. Напружено-деформований стан технічної системи. Метод потенціалів напружень. Інтегральні методи для контактних задач. Метод Герца. Функції комплексної змінної (метод Колосова–Мусхелішвілі). Навантаження і напруження. Тензор напружень. Головні напруження і головні площадки. Переміщення і деформації. Основні рівняння теорії пружності. Статичні рівняння. Геометричні рівняння. Потенціальна енергія деформації. Загальна постановка задачі механіки деформованого твердого тіла.	2	4		6	11, 17,18, 22-24
Тема 4. Динаміка машин. Аналітичне визначення власних частот коливань. Моделі обертальних систем (рівняння Ейлера, Жуковського). Гармонічний аналіз коливань (методи Фур'є). Аналіз вібрацій, балансування, динаміки механізмів.	2	-		6	25-31
Тема 5. Аналітичні методи теплотехніки. Аналітичні розв'язки рівнянь теплопровідності. Рівняння теплового балансу. Рівняння стану газу, ідеальний цикл Карно, Отто, Дізеля. Практичне застосування методів для точного аналізу теплових процесів та ефективності двигунів.	2	-		4	32-37
Тема 6. Методи розв'язання ЧДР (PDE - Partial Differential Equations). Метод дискретних елементів (DEM) для моделювання поведінки систем з великою кількістю окремих частинок або тіл. Метод скінченних елементів (FEM) для аналізу напружень і деформацій, теплопровідності, динаміки конструкцій та контактних задач. Метод скінченних об'ємів (FVM) для моделювання течій рідин і газів, тепломасообміну та турбулентності. Метод граничних елементів (BEM) в задачах потенційного поля (тепло, електрика,	2	6		6	38-48

гравітація), розрахунку вібрацій, акустиці.					
Тема 7. Інженерні методи та програмні технології. Комп'ютерні симуляції. CAE/FEA/CFD моделювання. Моделювання конструкцій, потоків, теплопередачі. стійкість та верифікація. CFD симуляція - чисельна аерогідродинаміка.	2	4		4	49-55
Тема 8. Оптимізація структурних елементів систем. Необхідні умови використання методів оптимізації, вибір критерію оптимізації та вимоги щодо критерію оптимізації. Види оптимізаційних задач. Постановка задачі багатокритеріальної оптимізації. Принцип оптимальності. Методи багатокритеріальної оптимізації. Метод динамічного програмування. Топологічна оптимізація конструкції.	2	6		6	56-58
Тема 9. Мультифізичне моделювання та цифрові двійники. Планування експерименту, вимірювання, сенсори, інтеграція симуляції з даними; цифрові двійники (digital twin). Побудова цифрового двійника для інженерного об'єкта. Модель прогнозування деградації матеріалу або зносу вузла. Тепломеханічні процеси, вібрації + тертя, потокові та теплові поля, реальні дані + модель, системи моніторингу стану.	2	-		6	59-63
Тема 10. Data Science & AI в інженерії. Регресія, класифікація, прогнозування виходу системи, діагностика несправностей, surrogate-models (meta-models), автоML. Експериментальна механіка, методи обробки сигналів, ML для оцінки ресурсу елементів, розпізнавання дефектів.	2	-		4	64-72
Всього	**20**	**20**		**50**	

4. МЕТОДИ ВИКЛАДАННЯ ТА НАВЧАННЯ

ДРН	**Методи викладання** (робота, що буде проведена викладачем під час аудиторних занять, консультацій)	**Кількість годин**	**Методи навчання** (які види навчальної діяльності має виконати студент самостійно)	Кількість годин
ДРН 1. Розробляти та досліджувати моделі процесів і систем, використовуючи сучасні цифрові технології та спеціалізоване програмне забезпечення	Проблемна лекція, тематична дискусія, «круглий стіл», обговорення актуальних питань.	4	Самостійна робота з літературу, опрацювання теоретичного матеріалу.	7
ДРН 2. Застосовувати методи розрахунку міцності,	Мультимедійна лекція, консультації викладача,	6	Самостійна робота з підручником,	7

теплопередачі та динаміки.	обговорення актуальних питань.		виконання індивідуальних завдань.	
ДРН 3. Використовувати DEM/FEM-моделювання для інженерних задач.	Мультимедійна лекція, консультації викладача, обговорення актуальних питань.	6	Самостійна робота з підручником, виконання індивідуальних завдань.	7
ДРН 4. Здійснювати FVM-аналіз в інженерних розрахунках.	Мультимедійна лекція, консультації викладача, обговорення актуальних питань.	6	Самостійна робота з підручником, виконання індивідуальних завдань.	7
ДРН 5. Здійснювати оптимізацію структурних елементів системи та її технологічних параметрів з урахуванням обмежень по їх реалізації.	Мультимедійна лекція, консультації викладача, обговорення актуальних питань.	6	Самостійна робота з підручником, навчання через дослідження.	7
ДРН 6. Проводити CFD/CAE/FEA симуляції.	Мультимедійна лекція, консультації викладача, обговорення актуальних питань.	6	Самостійна робота з підручником, виконання індивідуальних завдань.	7
ДРН 7. Використовувати ML-підходи для контролю, прогнозування, діагностики та оптимізації, оцінювати похибки моделей та розрахунків.	Мультимедійна лекція, консультації викладача, обговорення актуальних питань.	6	Самостійна робота з підручником, виконання індивідуальних завдань.	8
Всього годин		40		50

5. ОЦІНЮВАННЯ ЗА ОСВІТНІМ КОМПОНЕНТОМ

5.1. Діагностичне оцінювання (зазначається за потреби)

5.2. Сумативне оцінювання:

5.2.1. Для оцінювання очікуваних результатів навчання передбачено

№	Методи сумативного оцінювання	Бали / Вага у загальній оцінці	Дата складання
1.	Виконання індивідуального завдання	*20 балів / 20%*	*На 4 тижні*
2.	Виконання індивідуального завдання	*20 балів / 20%*	*На 6 тижні*
3.	Виконання індивідуального завдання, аналітичний огляд з презентацією	*30 балів / 30%*	*На 10 тижні*
4.	Іспит	*30 балів / 30%*	*На 12 тижні*

5.2.2. Критерії оцінювання

Компонент	**Незадовільно**	**Задовільно**	**Добре**	**Відмінно**
	<12 балів	*12-14 балів*	*15-17 балів*	*18-20 балів*
Виконання індивідуального завдання	Незначна обізнаність щодо проблеми, наведено короткий опис. Не демонструє самостійного мислення щодо обраної теми.	Наведено більшою мірою опис проблеми (без аналізу), недостатнє обґрунтування основних моментів, не достатньо послідовна аргументація, презентація відсутня або подана поверхнево. Опрацьована лише література, що рекомендована викладачем.	Продемонстровано розуміння, глибину та/або деталізацію проблеми; основні проблемні аспекти обґрунтовані, аргументи є послідовними; вивчаються різні точки зору, презентація є змістовною, послідовною. Опрацьована література лише рекомендована викладачем.	Досить глибоко та / або детально розкрита проблема, проаналізовані різні погляди на проблему; всі основні моменти викладені, аргументи послідовні та вагомі; аналізуються різні точки зору, наводяться власні пропозиції.
Аналітичний огляд з презентацією	*<18 балів*	*18-22 балів*	*23-26 балів*	*27-30 балів*
	Вимоги щодо завдання не виконано	Більшість вимог виконано, але окремі складові відсутні або недостатньо розкрити, відсутній аналіз інших підходів до питання	Виконано усі вимоги завдання	Виконані усі вимоги завдання, продемонстровано, креативність, вдумливість, запропоновано власне вирішення проблеми
Іспит	*<18 балів*	*18-22 балів*	*23-26 балів*	*27-30 балів*
	Здобувач недостатньо орієнтується в теоретичному матеріалі, завдання не розв'язані	Здобувач недостатньо орієнтується в теоретичному матеріалі, завдання розв'язані не повністю	Здобувач достатньо орієнтується в теоретичному матеріалі, завдання розв'язані з невеликими помилками	Здобувач добре орієнтується в теоретичному матеріалі, завдання розв'язані вірно, наводяться власні пропозиції

5.3. Формативне оцінювання:

6. Для оцінювання поточного прогресу у навчанні та розуміння напрямів подальшого удосконалення передбачено

№	**Елементи формативного оцінювання**	**Дата**
1	Комп'ютерна симуляція з елементами проблемних завдань	Під час занять
2	Усний зворотний зв'язок від викладача та студентів під час виконання індивідуального завдання	Під час занять

6. НАВЧАЛЬНІ РЕСУРСИ (ЛІТЕРАТУРА)

6.1. Основні джерела:

1. Moretti, Valter. Analytical Mechanics: Classical, Lagrangian and Hamiltonian Mechanics, Stability Theory, Special Relativity. 2nd ed., Springer, 2023.
2. Mohallem, José Rachid. Lagrangian and Hamiltonian Mechanics: A Modern Approach with Core Principles and Underlying Topics. Springer, 2024.

3. Pletser, Vladimir. Lagrangian and Hamiltonian Analytical Mechanics: Forty Exercises Resolved and Explained. Springer, 2018.
4. Bertschinger, Edmund. Lagrangian and Hamiltonian Dynamics. MIT OpenCourseWare, updated 2022. https://ocw.mit.edu/courses/8-09-classical-mechanics-iii-fall-2014/.
5. Fowles, Grant R., and George L. Cassiday. *Analytical Mechanics. 8th ed., Cengage Learning, 2020.
6. Jose, Jorge V., and Eugene J. Saletan. Classical Dynamics: A Contemporary Approach.* Cambridge UP, 2nd printing, 2021.
7. Scheck, Florian. Mechanics: From Newton’s Laws to Deterministic Chaos. 6th ed., Springer, 2020.
8. Kobayashi, Shigeru, et al. Classical Mechanics: Analytical Dynamics. Springer, 2020.
9. Schwichtenberg, Jakob. No-Nonsense Classical Mechanics. No-Nonsense Books, 2019.
10. Aref, Hassan. Elementary Elasticity: Theory, Applications, and Numerics. Springer, 2017.
11. Bower, Allan F. Applied Mechanics of Solids. 2nd ed., CRC Press, 2024, https://solidmechanics.org
12. Budynas, Richard G., and J. Keith Nisbett. Shigley’s Mechanical Engineering Design. 11th ed., McGraw-Hill, 2020.
13. Chandrupatla, Tirupathi R., and Ashok D. Belegundu. Introduction to Finite Elements in Engineering. 5th ed., Pearson, 2019.
14. Huang, Yuan-Cheng, et al. Theory of Elasticity for Engineers and Scientists. 2nd ed., Elsevier, 2021.
15. Megson, T. H. G. Structural and Stress Analysis. 4th ed., Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2019.
16. Mase, George E., Ronald E. Smelser, and George T. Mase. Continuum Mechanics for Engineers. 5th ed., CRC Press, 2020.
17. Reddy, J. N. Mechanics of Solids and Structures. Springer, 2022.
18. Timoshenko, Stephen P., and James M. Gere. Theory of Elastic Stability. Dover Publications, updated ed., 2019.
19. Timoshenko, Stephen P., and James M. Gere. Mechanics of Materials. 7th SI ed., Cengage Learning, 2020.
20. Ugural, Ansel C., and Saul K. Fenster. Advanced Strength and Applied Elasticity. 6th ed., Pearson, 2018.
21. Zienkiewicz, Olek C., et al. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. 8th ed., Elsevier, 2020.
22. Kachanov, Mark. Contact Mechanics. Cambridge University Press, 2023.
23. Muskhelishvili, N. I. Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity. Dover Publications, reissued 2020.
24. Sadd, Martin H. Elasticity: Theory, Applications, and Numerics. 4th ed., Academic Press (Elsevier), 2020.
25. Blevins, Robert D. Formulas for Dynamics, Acoustics, and Vibration. 2nd ed., Wiley, 2024.

26. Genta, Giancarlo, and Lorenzo Genta. Vibration Dynamics and Control. Springer, 2021.
27. Karnopp, Dean, Donald L. Margolis, and Ronald C. Rosenberg. System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems. 6th ed., Wiley, 2021.
28. Meirovitch, Leonard. Analytical Methods in Vibrations. Dover, reissued 2020.
29. Rao, Singiresu S. Mechanical Vibrations. 7th ed., Pearson, 2020.
30. Tiwari, Rajiv. Rotor Systems: Analysis and Identification. Springer, 2017.
31. Thompson, William T. Theory of Vibration with Applications. 6th ed., Pearson, 2021.
32. Bejan, Adrian, and Allan D. Kraus. Heat Transfer Handbook. 2nd ed., Wiley, 2023.
33. Çengel, Yunus A., and Michael A. Boles. Thermodynamics: An Engineering Approach. 9th ed., McGraw-Hill, 2021.
34. Holman, J. P. Heat Transfer. 11th ed., McGraw-Hill, 2019.
35. Kreith, Frank, et al. Principles of Heat Transfer. 8th ed., Cengage Learning, 2020.
36. Moran, Michael J., et al. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 9th ed., Wiley, 2022.
37. Turns, Stephen R. Thermodynamics: Concepts and Applications. 2nd ed., Cambridge University Press, 2020.
38. Kawamoto, Ryo, et al. Introduction to Discrete Element Methods: Fundamentals of Particle Simulation. Springer, 2022.
39. Zienkiewicz, Olek C., et al. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. 8th ed., Elsevier, 2020.
40. Moukalled, Fethi, Luca Mangani, and Marwan Darwish. The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics. 2nd ed., Springer, 2024.
41. Wrobel, Luis C. The Boundary Element Method: Applications in Thermo-Fluids and Acoustics. Springer, 2022.
42. Bonnet, Marc. Boundary Integral Equation Methods for Solids and Fluids. Cambridge UP, 2021.
43. Gaul, Lothar, Martin Kögl, and Marcus Wagner. Boundary Element Methods for Engineers and Scientists. 2nd ed., Springer, 2020.
44. Finite Volume Method: Engineering Design: https://web.fe.up.pt/~fpinho/pdfs/Finite_Volume_Method_-_Powerful_Means_of_Engineering_Design.pdf
45. Continuum Modelling using the Discrete Element Method. Theory and implementation in an object-oriented software platform: https://www.scipedia.com/wd/images/2/28/Draft_Samper_693037321_1115_PI381.pdf
46. The Finite Volume Method in CFD: https://www.academia.edu/20236865/THE_FINITE_VOLUME_METHOD_IN_CFD_by_F_Moukalled_L_Mangani_M_Darwish
47. An open-source finite volume toolbox for solid mechanics and fluid-solid interaction simulations — Preprint on arXiv: https://arxiv.org/abs/1808.10736
48. A discrete element framework for the numerical analysis of particle bed-based additive manufacturing processes — Open access article: https://link.springer.com/article/10.1007/s00366-021-01590-6
49. Bathe, Klaus-Jürgen. Finite Element Procedures. 2nd ed., Bathe Publications, 2021.

50. Blazek, Jiri. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications. 4th ed., Elsevier, 2023.
51. Reddy, J. N. An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis. 2nd ed., Oxford UP, 2019.
52. Roth, John. Practical CFD Modeling and Simulation. AIAA, 2022.
53. Versteeg, H. K., and Weeratunge Malalasekera. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. 3rd ed., Pearson, 2022.
54. ANSYS Learning Hub. Free Student Resources. 2024, https://www.ansys.com/academic/students
55. SimScale GmbH. SimScale Open CAE Platform — Learning Hub. 2024, https://www.simscale.com
56. Kale, I. R., et al., editors. Optimization Methods for Structural Engineering. Springer, 2025. https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-99-2378-6?utm_source=chatgpt.com
57. Tang, T., et al. "Topology Optimization: A Review for Structural Designs." Materials (Basel), 2024. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11643539/?utm_source=chatgpt.com
58. Miler, D. "Simultaneous Multi-Objective and Topology Optimization." Mathematics, vol. 13, no. 7, 2025. https://www.mdpi.com/2079-3197/13/7/168?utm_source=chatgpt.com
59. Grieves, Michael W., and John Vickers. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. Springer, 2022.
60. Reddy, J. N., et al., editors. Multiphysics Modeling: Numerical Methods and Engineering Applications. Springer, 2024.
61. Tao, Fei, and Qinglin Qi. Digital Twin Driven Smart Manufacturing. Academic Press (Elsevier), 2022.
62. Zhang, Kun, et al. "A Digital Twin–Driven Method for Predictive Maintenance of Industrial Equipment." Journal of Manufacturing Systems, vol. 65, 2022, pp. 738–753.
63. Gueye, Papa, et al. "A Multiphysics Digital Twin for Fatigue and Wear Prediction in Mechanical Components." Engineering Fracture Mechanics, vol. 285, 2023.
64. Bishop, Christopher M., and Hugh Bishop. Deep Learning: Foundations and Concepts. Springer, 2024.
65. Rao, S. S., and Sandipan Saha. Applied Artificial Intelligence for Engineering. Elsevier, 2023.
66. Wang, Kewen, et al. "Machine Learning for Structural Health Monitoring: A Review." Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 200, 2023, 110408.
67. Worden, Keith, and Elizabeth J. Cross. Machine Learning for Engineering Systems Health Management. Cambridge UP, 2022.
68. Zhong, Ray Y., et al. "AI-Driven Surrogate Modeling for Engineering Design Optimization." Advanced Engineering Informatics, vol. 54, 2022, 101829.
69. Fleming, Patrick, and Stefan Haberland. Data Science for Engineers. Springer, 2021.
70. Zhang, Jiong, et al. "Automated Machine Learning (AutoML) in Engineering Applications." Engineering Applications of AI, vol. 123, 2023, 106447.

71. Brunton, Steven L., and J. Nathan Kutz. Data-Driven Science and Engineering: Machine Learning, Dynamical Systems, and Control. 2nd ed., Cambridge UP, 2022.
72. Liu, D., Konoplianchenko, I., Tarelnyk, V., Li, Y., Li, J. Architecture of discrete manufacturing system based on CPS (2022) Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 12303, art. no. 1230319, https://doi.org/10.1117/12.2642667

6.2. Додаткові джерела:

73. Singh, P., T.W. Liao, Multi-criteria group decision-making using ambiguous sets, Weibull distribution, and aggregation operators: A case study in optimal vendor selection for office supplies, Systems and Soft Computing, Vol.,200283 (2025). https://doi.org/10.1016/j.sasc.2025.200283
74. Belegundu, A. D., & Chandrupatla, T. R. (2019). Optimization Concepts and Applications in Engineering (3rd ed.). Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781108347976
75. Calafiore, G., & El Ghaoui, L. (2014). Optimization Models. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781107279667
76. Baldick, R. (2006). Applied Optimization: Formulation and Algorithms for Engineering Systems. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511610868
77. Levi, A. F. J., & Haas, S. (Eds.). (2009). Optimal Device Design. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511691881
78. Guenin, B., Könemann, J., & Tunçel, L. (2014). A Gentle Introduction to Optimization. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781107282094
79. Ponstein, J. P. (1980). Approaches to the Theory of Optimization. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511526527
80. Messac, A. (2015). Optimization in Practice with MATLAB®: For Engineering Students and Professionals. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781316271391
81. Sundaram, R. K. (1996). A First Course in Optimization Theory. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511804526
82. Lau, L. C., Ravi, R., & Singh, M. (2011). Iterative Methods in Combinatorial Optimization. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511977152
83. Jurdjevic, V. (2016). Optimal Control and Geometry: Integrable Systems. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781316286852
84. Y. Ju, I. Konoplianchenko, J. Pu, Z. Zhang, Q. Dong, M. Dumanchuk, Optimization of structure and properties of WC-reinforced FeCoNiCr high-entropy alloy composite coating by laser melting, Results in Engineering, 21, 101985, (2024). https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101985
85. Ju, Yao, Konoplianchenko, Ievgen, Pu, Jiafei, Dong, Qi and Zhang, Zhengchuan. "Structural characteristics and high-temperature friction properties of a solid metal surface with a laser-melted coating of high-entropy alloy" Main Group Metal

Chemistry, vol. 47, no. 1, 2024, pp. 20240004. https://doi.org/10.1515/mgmc-2024-0004
86. Diu, Liu, et al. "Innovative Methods in the Construction of Digital Twin Factory." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 238, no. 8, 2024, pp. 1-12, https://doi.org/10.1177/09544089241267144

6.3 Допоміжні інтернет-джерела

Онлайн органайзеры

Docollab – Helps to manage scientific research, collaborate with colleagues and publish findings.
Elabftw – Electromic lab notebook made by researchers, for researchers, with usability in mind.
ELabJournal – GLP-compliant Electronic Lab Notebook and lab management tool.
Evernote – A place to collect inspirational ideas, write meaningful words, move important projects forward.
Findings App – Lab notebook app that allows to organize experiments, keep track of results, manage protocols.
Hivebench – Hosted numeric laboratory notebook tool to manage protocols, experiments, share with team.
Journal Lab – A community of scientists who share open summaries and peer review of articles.
LabArchives – Web-based product to enable researchers to store, organize, and publish their research data.
Labfolder – Simple way to document research and to organize protocols and data (blog post).
LabGuru – Supports day to day activities of a research group (vision, execution, knowledge, logistics).
Laboratory Logbook – Document projects running in a lab, manage experimentally obtained data, metadata.
sciNote – Open source lab notebook with workflows and modular functionalities (blog post).
Sumatra – Automated electronic lab notebook for computational projects.

Інструменти для спільного проведення експериментів

Emerald Cloud Lab – A web-based life sciences lab, developed by scientists for scientists.
ScienceExchange – Marketplace for shared lab instrumentations.
TetraScience – Allows you to monitor & manage experiments from anywhere.
Transcriptic – A remote, on-demand robotic life science research lab with no hardware to buy or software to install.
Addgene – Plasmid sharing platform.
Antibody Registery – Gives researchers a way to universally identify antibodies

used in the course of research.
Biospecimens – Platform for biospecimen-based research.
Duke human heart – Repository for cardiovascular research scientists, including tissues samples.
ELabInventory – Web laboratory inventory management system designed for life science research labs.
Nanosupply – Platform facilitating sourcing and sharing of advanced materials for research and education.
Sample of Science – Peer-Sharing Platform for Scientific Samples.

Електронні лабораторії

BioBright – For better understanding of experimental conditions by connecting sensors to instruments.