Вінницький національний технічний університет
Інститут докторантури та аспірантури
Кафедра Технологій та автоматизації машинобудування

ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ МАШИН

Вибірковий освітній компонент

Рівень вищої освіти: **третій (освітньо-науковий)**
Спеціальність: **для всіх**

Викладач: **доцент Піонткевич О. В.**

Мова викладання: **Українська**

Семестр: **4**

Кредитів ЄКТС: **4**

Лекцій: **24 год.**

Практичні заняття: **16 год.**

Самостійна робота: **80 год.**

Вид контролю: **Диф. залік**

Передумови для вивчення дисципліни

Дисципліна «Чисельні методи аналізу та оптимізації конструкцій машин» ґрунтується на знаннях, засвоєних під час вивчення дисциплін професійного спрямування підготовки за третім освітньо-науковим рівнем вищої освіти. Доцільним є попереднє опанування освітніх компонентів, пов’язаних із математичним моделюванням у наукових дослідженнях та загальними принципами інженерних розрахунків. Спеціалізовані програмні засоби інженерного аналізу розглядаються як інструменти реалізації та перевірки чисельних методів.

Мета дисципліни

Мета викладання навчальної дисципліни «Чисельні методи аналізу та оптимізації конструкцій машин» полягає у формуванні в здобувачів системних знань і дослідницьких навичок щодо постановки та чисельного розв’язання інженерних задач, оцінювання достовірності результатів моделювання, обґрунтування критеріїв і обмежень оптимізації та пошуку раціональних конструктивних рішень для деталей, вузлів і машин з урахуванням вимог міцності, жорсткості, маси, експлуатаційної ефективності й технологічності.

Компетентності, якими повинен оволодіти здобувач в результаті вивчення дисципліни:

- Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.
- Вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми.
- Здатність приймати обґрунтовані рішення.
- Здатність генерувати нові ідеї (креативність).
- Застосування сучасних знань в галузі наукових досліджень і проектування конструкцій, машин та/або процесів в галузі машинобудування та на межі суміжних предметних галузей.
- Здатність критичного аналізу, оцінки і синтезу нових ідей в процесі розробки та реалізації механічних конструкцій, машин, матеріалів і виробничих процесів машинобудування на основі новітніх знань в галузі механіки та суміжних предметних галузей.
- Застосування інформаційних технологій в науковій діяльності.
- Здатність застосовувати відповідні математичні, наукові і технічні методи, інформаційні технології та прикладне комп'ютерне програмне забезпечення для вирішення інженерних і наукових завдань з прикладної механіки.

За результатами вивчення дисципліни здобувачі вищої освіти набувають результатів навчання:

Знати і розуміти принципи побудови, розрахунку, аналізу і моделювання конструкцій машин за допомогою сучасних систем автоматизації конструкторських робіт (CAD) та інженерних досліджень (CAE).

Тематика

Модуль 1.

Тема 1. Методологія чисельного аналізу та постановка задач оптимізації конструкцій машин.

Мета, завдання та предмет вивчення дисципліни. Роль чисельного аналізу в наукових дослідженнях і проєктуванні конструкцій машин. Етапи побудови обчислювальної моделі: геометрична ідеалізація, вибір фізичної моделі, визначення властивостей матеріалів, навантажень, граничних умов і розрахункових параметрів. Класифікація оптимізаційних задач. Поняття про змінні проєктування, цільові функції, функціональні та конструктивні обмеження. Критерії якості конструкцій: маса, жорсткість, міцність, довговічність, втрати тиску та технологічність. Місце перевірки достовірності розрахунків в оптимізаційному дослідженні.

Тема 2. Метод скінченних елементів у чисельному аналізі конструкцій машин.

Математичні основи методу скінченних елементів. Дискретизація конструкцій, типи скінченних елементів, апроксимаційні функції, матриця жорсткості та система рівнянь рівноваги. Побудова скінченно-елементної моделі деталей і складальних одиниць. Визначення напружень, деформацій, переміщень і коефіцієнтів запасу. Вплив моделювання з'єднань, контактів, закріплень і навантажень на достовірність результатів. Аналіз збіжності розв'язку за уточнення розрахункової сітки. Обмеження застосування лінійної моделі.

Тема 3. Чисельні методи дослідження нелінійних і динамічних характеристик конструкцій.

Основи геометричної, фізичної та контактної нелінійності. Вплив нелінійних ефектів на результати інженерних досліджень. Чисельне моделювання власних частот і форм коливань, вимушених коливань та перехідних процесів. Врахування статичних, змінних і циклічних навантажень під час оцінювання конструктивних рішень. Критерії вибору адекватної розрахункової моделі. Застосування результатів динамічного аналізу як обмежень у задачах оптимізації.

Тема 4. Чисельне моделювання течії робочих середовищ і оптимізація проточних частин.

Основні рівняння механіки рідин і газів. Метод скінченних об'ємів, побудова розрахункової області та сітки. Задання граничних умов, властивостей робочого середовища та режимів течії. Загальні принципи моделювання турбулентності. Визначення полів тиску й швидкості, гідравлічних втрат і силової дії потоку на конструктивні елементи. Вплив геометрії каналів, отворів та місцевих опорів на результати чисельного дослідження. Постановка задач оптимізації проточних частин гідравлічних пристроїв.

Тема 5. Верифікація чисельних моделей та аналіз чутливості конструктивних параметрів.

Джерела чисельних, модельних та експериментальних похибок. Поняття верифікації й валідації обчислювальних моделей. Перевірка сіткової збіжності, балансів і фізичної узгодженості результатів. Порівняння розрахунків з аналітичними розв'язками та експериментальними даними. Аналіз чутливості механічних і гідродинамічних характеристик до зміни конструктивних параметрів. Локальна та глобальна чутливість. Використання чисельних експериментів для обґрунтування оптимізаційних змінних.

Тема 6. Параметрична, геометрична та топологічна оптимізація конструкцій машин.

Постановка параметричних задач оптимізації на основі чисельної моделі. Вибір геометричних параметрів, цільових функцій та обмежень за міцністю,

жорсткістю, масою і технологічністю. Методи планування чисельного експерименту. Градієнтні та безградієнтні алгоритми пошуку оптимуму. Оптимізація геометрії деталей і вузлів машин. Поняття топологічної оптимізації; розрахункова область, збережені зони, обмеження виготовлення та перерозподіл матеріалу. Мінімізація маси й податливості за заданих обмежень. Підготовка оптимізованої геометрії до подальшої конструктивної перевірки та виготовлення.

Тема 7. Багатокритеріальна оптимізація та обґрунтування оптимальних конструктивних рішень.

Постановка багатокритеріальних задач у машинобудуванні. Конкурувальні критерії: маса, міцність, жорсткість, енергетичні втрати та вартість виготовлення. Методи нормування критеріїв, зважених оцінок і побудови множини Парето. Оцінювання компромісних рішень за умов обмеженості інформації та невизначеності параметрів. Повторний чисельний аналіз оптимізованої конструкції. Порівняння початкового й оптимізованого варіантів. Формування висновків щодо достовірності, практичної доцільності та відтворюваності результатів наукового дослідження.

Теми семінарських занять - не передбачені

Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми	К-ть годин
	Семестр 4	
1	Підготовка геометричної та скінченно-елементної моделей конструкції	4
2	Чисельне моделювання течії робочої рідини в елементах гідравлічних систем	3
3	Аналіз чутливості та параметрична оптимізація конструкцій машин	3
4	Топологічна оптимізація конструкцій машин	3
5	Багатокритеріальна оптимізація конструкцій машин	3
	Всього за 4 семестр:	16

Теми лабораторних занять - не передбачені

Самостійна робота

№ з/п	Вид роботи	К-ть годин
1	Самостійне опрацювання тем теоретичного матеріалу	
1.1	Оцінювання точності чисельних результатів і дослідження сіткової збіжності	6
1.2	Граничні умови, моделі турбулентності та похибки під час дослідження течій	6
1.3	Планування чисельних експериментів, методи аналізу чутливості та оптимізаційні алгоритми	6
1.4	Критерії топологічної оптимізації та технологічні обмеження виготовлення конструкцій	6
2	Опрацювання лекційного матеріалу	33
3	Підготовка до практичних занять	15
4	Підготовка до модульного контролю	5
5	Підготовка до складання диф. заліку	3
	Всього	80

Методи навчання

При вивченні дисципліни використовуються:

1. Дидактичні методи - лекції з використанням мультимедійних презентацій.
2. Практичні методи: практичні роботи з використанням прикладного програмного забезпечення.
3. Метод самостійного навчання.
4. Активні методи: експрес опитування, тестування.
5. Словесні методи навчання: лекції, консультації.

Індивідуальні завдання

Індивідуальні завдання - не передбачені

Форми та методи контролю

Протягом вивчення дисципліни передбачається поточний та підсумковий форми контролів знань здобувачів.

Поточний контроль проводиться шляхом фронтального, індивідуального чи комбінованого опитування студентів в результаті написання колоквіумів. Колоквіуми можуть проводитись за допомогою таких методів:

- письмової контрольної роботи;
- складання тестів у електронній системі університету.

Методи написання та максимально дозволений час колоквіуму оголошується здобувачам на першому тижні навчального семестру.

Підсумковий контроль знань здобувачів проводиться шляхом складання диференційованого заліку за темами, що охоплюють весь курс дисципліни.

Метод та максимально дозволений час складання підсумкового контролю оголошується здобувачам на першому тижні навчального семестру.

Розподіл балів, які отримують здобувачі вищої освіти

Розподіл балів з навчальних видів робіт з дисципліни.

Вид роботи	**М1**	**Разом**
Виконання практичних завдань	60	60
Колоквіуми	40	40
Усього за модуль	100	100
Диф. залік	-	0
Всього	-	100

Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності	**Оцінка ECTS**
90-100	A
82-89	B
75-81	C
64-74	D
60-63	E
35-59	FX (з можливістю повторного перескладання)
0-34	F (з обов’язковим повторним вивченням дисципліни)

Критерії оцінювання знань, умінь та навичок здобувачів вищої освіти

Рівень компе-тентно-сті	**За баль-ною шкалою**	**За шкалою ECTS**	**Критерії оцінювання**
IV Високий (творчий)	90 - 100	A	Програмні результати досягнуті повністю. Теоретичний зміст курсу освоєний цілком, без прогалин; виявлено глибокі знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності, сформовано необхідні практичні навички вирішувати професійні завдання усі передбачені програмою навчання навчальні завдання виконані, якість їхнього виконання оцінено числом балів, близьким до максимального.

III Достатній (конструктивний)	82 - 89	B	Програмні результати досягнуті повністю. Теоретичний зміст курсу освоєний цілком, без прогалин. Необхідні практичні навички роботи з освоєним матеріалом в основному сформовані, усі передбачені програмою навчання навчальні завдання виконані, якість виконання більшості з них оцінено числом балів, близьким до максимального.
	75 - 81	C	Програмні результати досягнуті повністю. Теоретичний зміст курсу освоєний цілком, без прогалин. Вміння викладати базові ідеї, а також практичні навички роботи з освоєним матеріалом сформовані недостатньо; усі передбачені програмою навчання завдання виконані, якість виконання жодного з них не оцінено мінімальним числом балів, деякі види завдань виконані з помилками.
II Середній (репродуктивний)	64 - 74	D	Програмні результати досягнуті. Теоретичний зміст курсу освоєний частково, але прогалини не носять істотного характеру, виявлено знання та розуміння основних положень; необхідні практичні навички роботи з освоєним матеріалом в основному сформовані, більшість передбачених програмою навчання навчальних завдань виконано, деякі з виконаних завдань містять помилки.
	60 - 63	E	Програмні результати досягнуті. Теоретичний зміст курсу освоєний частково, деякі практичні навички роботи не сформовані, частина передбачених програмою навчання завдань не виконано або якість виконання оцінено числом балів, близьким до мінімального.
I Низький	35 - 59	FX	Програмні результати не досягнуті. Теоретичний зміст курсу освоєний частково, необхідні практичні навички роботи не сформовані, більшість передбачених програм навчання навчальних завдань не виконане, або якість їхнього виконання оцінено числом балів, близьким до мінімального; при додатковій самостійній роботі над матеріалом курсу можливе підвищення якості виконання навчальних завдань (з можливістю повторного складання)
	0 - 34	F	Програмні результати не досягнуті. Теоретичний зміст курсу не освоєно, необхідні практичні навички роботи не сформовані, усі виконані навчальні завдання містять грубі помилки, додаткова самостійна робота над матеріалом курсу не приведе до якого-небудь значущого підвищення якості виконання навчальних завдань (з обов'язковим повторним курсом)

Рівень компетентності	**За шкалою ECTS**	**Критерії оцінювання**	
		Практичне завдання	**Колоквіум**

IV Високий (творчий)	A	**10.8-12 б.:** Виставляється при правильному та безпомилковому виконанні завдання	**36-40 б.:** 100% правильних відповідей
III Достатній (конструктивний)	B	**9.84-10.79 б.:** Виставляється при правильному виконанні завдання, але у відповідях допущені деякі несуттєві помилки, відсутні обґрунтування окремих положень.	**32.8-35.99 б.:** 82-89% правильних відповідей
	C	**9-9.83 б.:** Виставляється при правильному виконанні завдання, але з деякими незначними помилками, у відповідях допущені неправильні обґрунтування окремих положень.	**30-32.79 б.:** 75-81% правильних відповідей
II Середній (репродуктивний)	D	**7.68-8.99 б.:** Виставляється, якщо при виконанні завдання допущені помилки, які свідчать про недостатнє знання теорії	**25.6-29.99 б.:** 64-74% правильних відповідей
	E	**7.2-7.67 б.:** Виставляється, якщо при виконанні допущені помилки, які свідчать про недостатнє знання теорії, пояснення відсутні або фрагментарні.	**24-25.59 б.:** 60-63% правильних відповідей
I Низький	FX, F	**0-7.19 б.:** Виставляється у випадку, якщо завдання не виконане	**0-23.99 б.:** 0-59% правильних відповідей

Академічні права та обов'язки здобувачів вищої освіти

Здобувачі вищої освіти, які навчаються у ВНТУ, мають дотримуватися норм забезпечення честі, гідності, взаємної поваги і довіри, рівноправності та толерантності усіх учасників освітнього процесу шляхом дотримання принципів академічної доброчесності, викладених у «Положенні про академічну доброчесність у ВНТУ». З метою запобігання та виявлення плагіату у навчальних роботах, розвитку навичок коректної роботи із джерелами інформації та

впровадження практики належного цитування, дотримання вимог наукової етики та поваги до інтелектуальних надбань та активізація самостійності й індивідуальності при створенні авторського твору і відповідальності за порушення загальноприйнятих правил цитування слід дотримуватись норм «Положення про запобігання академічному плагіату та порядок його виявлення

у навчальних, наукових, кваліфікаційних та науково-методичних роботах у ВНТУ». З метою визнання результатів навчання здобутих під час неформальної та/або інформальної освіти, тобто такої, що здобувалася за освітніми програмами та не передбачала присудження визнаних державою освітніх кваліфікацій за рівнями освіти, але могла завершуватися присвоєнням професійних та/або присудженням часткових освітніх кваліфікацій при навчанні на території України чи за її межами, а також освіти, яка здійснювалася у порядку самоосвіти, здобувачі вищої освіти можуть скористатися відповідними процедурами, наведеними у «Положення про порядок визнання результатів навчання, здобутих шляхом неформальної та/або інформальної освіти у ВНТУ». Здобувачі вищої освіти мають право оскаржити результати проміжних та підсумкових контрольних заходів, але на лише на підставі аргументованих пояснень, відповідно до «Порядку організації та проведення заліків, диференційованих заліків, екзаменів у ВНТУ», а також безпосередньо звернувшись до освітнього омбудсмена, згідно «Положення про освітнього омбудсмена з прав студентів ВНТУ». З метою вирішення конфліктних ситуацій, що можуть виникнути у здобувачів освіти із іншими учасниками освітнього процесу та/або недопущення виникнення конфліктних ситуацій слід бути обізнаним у нормах «Кодексу етики спільноти ВНТУ». Здобувачі вищої освіти ВНТУ мають керуватися принципом «нульової толерантності» до будь-яких проявів корупції і повинні вживати всіх передбачених законодавством заходів щодо запобігання, виявлення та протидії корупції і пов’язаним з нею діям (практикам), відповідно до «Антикорупційної програми ВНТУ». Наведені документи оприлюднені на сайті ВНТУ: https://vntu.edu.ua/uk/public-info/zag.html.

Рекомендована література

Основна

1. Kochmann D. M. Introduction to Finite Element Analysis : lecture notes. Zurich : ETH Zurich, 2025. 241 p. URL: https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/mechanical-systems/mm-dam/documents/Notes/IntroToFEA_red.pdf

2. Martins J. R. R. A., Ning A. Engineering Design Optimization. Cambridge University Press, 2021. 642 p. URL: https://flowlab.groups.et.byu.net/mdobook.pdf

3. Marti D., Cocquet P. H., Ramalingom D., Bastide A. Topology optimization of fluid flow using local thermal objective function based on field synergy principle. 2023. 31 p. URL: https://hal.science/hal-04099802v1.

4. Nocedal J., Wright S. J. Numerical Optimization. 2nd ed. Springer, 2006. DOI: 10.1007/978-0-387-40065-5.

5. Основи конструювання машин [Текст] : навч. посіб. / Ю.С. Рудь. 2-е вид., переробл. Кривий Ріг: Видавець ФО-П Чернявський Д.О., 2015. 492 с.

6. Петров О. В., Піонткевич О. В., Буда А. Г., Коломієць В. С. Застосування CAD/CAE-системи Solidworks у задачах аналізу міцності деталей верстатних пристосувань. Вісник машинобудування та транспорту. Вінниця : ВНТУ, 2024. Вип. 19. № 1. С. 95–102.

7. Піонткевич О. В., Березюк О. В., Лозінський Д. О., Кавецький О. І. Застосування CAD/CAE-системи Autodesk Inventor для удосконалення фрезерно-гравірувального верстата з ЧПК. Наукові праці Вінницького національного технічного університету. Вінниця : ВНТУ, 2025. Вип. 1. С. 178-186. https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-1-178-186

Додаткова

1. Динаміка й оптимізація машин / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич, Р.А. Кульпін. К.: ЦП «Компринт», 2018. 310 с.

2. Norton R. L. Machine Design: An Integrated Approach. 6th ed. Boston: Pearson, 2020. 1040 p URL: https://mechfamily-ju.com/storage/images/files/file_17314351121Fr90.pdf

3. Лозінський Д. О., Козлов Л. Г., Піонткевич О. В., Кавецький О. І. Оптимізація електрогідравлічного розподільника з незалежним керуванням потоків. Вісник машинобудування та транспорту. Вінинця: ВНТУ, 2023. № 1. С. 87–91. https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-17-1-87-91

4. Polishchuk L., Piontkevych O., Svietlov A., Adler O., Lozinsky D. Development and optimization of the control device for the hydraulic drive of the belt conveyor. Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska, 15(2), 2025. P. 124–129. https://doi.org/10.35784/iapgos.7051