

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**



Механіко-машинобудівний факультет

Т.В. Москальова

**ІНЖЕНЕРНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ  
ОБ'ЄКТІВ МАШИНОБУДУВАННЯ**

---

Конспект лекцій

для студентів спеціальності 133 Галузеве  
машинобудування

Дніпро  
НТУ «ДП»  
2021

Москальова Т.В. Інженерний аналіз об'єктів машинобудування: конспект лекцій для студентів спеціальності 133 Галузеве машинобудування / Т.В. Москальова; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: НТУ «ДП», 2020. – 139 с.

Автор:

Москальова Т.В., канд. техн. наук, доц.

Затверджено рішенням науково-методичної комісії спеціальності 133 Галузеве машинобудування (протокол №1 від 31.08.2021) за поданням кафедри інжинірингу та дизайну в машинобудування (протокол №1 від 30.08.2021).

Конспект лекцій з дисципліни «Інженерний аналіз технічних об'єктів машинобудування» знайомить критеріями якості проекту, методами розрахунку конструкцій. Розрахунки методом скінчених елементів наведено в програмі SolidWorks Simulation.

© Т.В. Москальова, 2021

© НТУ «ДП», 2021

## Зміст

Вступ .....	7
1. Показники якості та вартості виробу машинобудування .....	9
1.1. Структура технічного об'єкту машинобудування .....	9
1.2. Показники якості виробу машинобудування .....	10
1.3. Фактори, що визначають економічність машини .....	12
1.4. Надійність і довговічність машин.....	13
1.5. Маса та металомісткість машин.....	16
1.5.1. Вплив машинобудівних матеріалів.....	16
1.5.2. Крихкі й пластичні матеріали .....	17
1.6. Фактори, що впливають на термін експлуатації виробу .....	19
1.7. Стандартизація та уніфікація виробів .....	20
1.8. Технологічність конструкції.....	21
1.9. Патентно-правові показники якості.....	22
1.10. Ергономіка та технічна естетика.....	24
1.11. Конкурентоспроможність та методи оцінювання.....	25
1.12. Контрольні питання.....	28
2. Математичні моделі технічних об'єктів машинобудування .....	29
2.1. Класифікація математичних моделей.....	29
2.2. Математичне моделювання .....	31
2.3. Комп'ютерне моделювання та обчислювальний експеримент.....	34
2.4. Особливості побудови математичних моделей.....	36
2.5. Комп'ютерне моделювання при обробці даних експериментів.....	38
2.5.1. Інтерполяція та екстраполяція даних .....	38
2.5.2 Апроксимація даних .....	40
2.6. Теорія розмірностей та подібності.....	41
2.7. Моделі механіки деформованого твердого тіла .....	42
2.8. Контрольні питання.....	43
3. Методи інженерного аналізу технічних об'єктів машинобудування.....	44
3.1. Методи дослідження працездатності технічних об'єктів .....	44
3.2. Комп'ютерні програми для інженерних розрахунків .....	46
3.2.1. Електронні таблиці та програми для аналізу даних.....	46
3.2.2. Математичні пакети для інженерних розрахунків .....	47
3.2.3. Системи автоматизованого проектування .....	47
3.3. Розрахункові методи, використовувані в інженерних пакетах .....	49
3.4. Автоматизація інженерних розрахунків. Скрипти та API.....	50
3.5. Контрольні питання.....	50

4.	Основи розрахунку технічних об'єктів машинобудування.....	51
4.1.	Проектні та перевірочні розрахунки .....	51
4.2.	Розрахунок на міцність .....	51
4.3.	Розрахунок на втомну міцність.....	52
4.4.	Розрахунок жорсткості.....	53
4.5.	Втрата стійкості. ....	56
4.6.	Частотні дослідження.....	58
4.6.1.	Види коливань.....	58
4.6.2.	Резонанс та добротність коливальної системи .....	59
4.7.	Сполучення елементів технічних об'єктів машинобудування .....	60
4.8.	Розрахунок конструкцій на динамічні впливи .....	61
4.9.	Методи оптимізації в інженерних дослідженнях .....	63
4.9.1.	Стандартна математична постановка завдання оптимізації .....	64
4.10.	Контрольні питання.....	64
5.	Система аналізу конструкцій SolidWorks Simulation .....	65
5.1.	Метод скінчених елементів (МСЕ).....	66
5.1.1.	Поняття скінченого елемента.....	67
5.1.2.	Апроксимуюча функція .....	68
5.1.3.	Граничні умови .....	69
5.1.4.	Матриця жорсткості .....	69
5.2.	Типи досліджень в SolidWorks Simulation .....	70
5.3.	Види матеріалів в SolidWorks Simulation.....	70
5.3.1.	Ізотропні матеріали .....	70
5.3.2.	Анізотропні матеріали .....	70
5.4.	Об'єкти дослідження в SolidWorks Simulation.....	71
5.4.1.	Твердотільні елементи .....	71
5.4.2.	Елементи оболонки .....	71
5.4.3.	Елементи балки та стрижні.....	71
5.5.	Навантаження й обмеження (кріплення).....	72
5.5.1.	Типи кріплень .....	73
5.5.2.	Навантаження.....	73
5.6.	Програми-вирішувачі в SolidWorks Simulation .....	75
5.6.1.	Рекомендації до вибору вирішальної програми .....	76
5.7.	Контрольні питання.....	77
6.	Розрахунок технічних об'єктів в SolidWorks Simulation.....	78
6.1.	Лінійний статичний аналіз.....	78
6.2.	Критерії міцності .....	79

6.2.1. Критерій Мізеса .....	79
6.2.2. Критерій плинності Тріску .....	79
6.2.3. Критерій напруги Мора - Кулона .....	80
6.2.4. Критерій максимальної нормальної напруги. ....	80
6.3. Завдання розрахунку власних частот .....	81
6.4. Дослідження втрати стійкості .....	83
6.4.1. Обмеження розрахунку .....	84
6.4.2. Запас міцності на втрату стійкості.....	84
6.4.3. Обчислення навантажень втрати стійкості .....	85
6.4.4. Потік і термічні впливи в дослідженнях втрати стійкості .....	85
6.4.5. Включення ефектів тиску рідини в аналіз втрати стійкості .....	86
6.4.6. Результати лінеаризованого аналізу втрати стійкості .....	86
6.5. Аналіз втоми .....	87
6.5.1. Параметри втоми .....	87
6.5.2. Крива <i>S-N</i> .....	88
6.5.3. Прив'язка кривих <i>S-N</i> до матеріалу .....	89
6.5.4. Інтерполяції між кривими <i>S-N</i> .....	90
6.5.5. Корекція середньої напруги .....	91
6.5.6. Методи корекції .....	92
6.5.7. Виконання аналізу втоми.....	93
6.5.8. Події втоми матеріалів .....	94
6.5.9. Теорія накопиченого ушкодження .....	95
6.5.10 Реалізація декількох подій втоми матеріалів .....	95
6.5.11. Приклад оцінки знакозмінної напруги для подій втоми постійної амплітуди з випадковим взаємозв'язком .....	97
6.5.12. Метод підрахунку числа циклів Rainflow .....	98
6.5.13. Епюри «Термін служби», «Ушкодження», «Запас міцності»....	99
6.5.14. Коригуючі коефіцієнти .....	100
6.6. Лінійний динамічний аналіз .....	101
6.6.1. Рівняння руху .....	101
6.6.2. Лінійний динамічний аналіз у порівнянні з лінійним статичним .....	102
6.6.3. Лінійний динамічний аналіз у порівнянні з нелінійним динамічним .....	104
6.6.4. Демпфіруючі ефекти .....	105
6.6.5. Модальне демпфірування .....	106
6.6.6. Демпфірування за Релеєм .....	106

6.6.7. Порівняння коефіцієнтів Релея й модального демпфірування ..	107
6.6.8. Складене модальне демпфірування .....	107
6.6.9. Модальний аналіз тимчасової діаграми .....	108
6.6.10. Гармонійний аналіз .....	108
6.6.11. Аналіз випадкового коливання .....	110
6.7. Нелінійний статичний аналіз.....	111
6.7.1. Конструкційні нелінійності .....	112
6.7.2. Процедури рішення нелінійних завдань .....	112
6.7.3. Поняття кривої часу .....	113
6.7.4. Чисельні методи для рішення нелінійних завдань.....	113
6.7.5. Виконання нелінійного аналізу.....	116
6.8. Оптимізація конструкції в SolidWorks .....	118
6.9. Рекомендації щодо виконання інженерного дослідження .....	120
6.10. Контрольні питання.....	121
7. Перспективи розвитку машинобудування .....	124
Використані джерела.....	139