МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ, АНАЛІЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ МАШИН І ОБЛАДНАННЯ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ



МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК → АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ → ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ → ЕФЕКТИВНІ РІШЕННЯ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ, АНАЛІЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ МАШИН І ОБЛАДНАННЯ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ: МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

Миколаїв
2026

УДК 631.3:004.9:621.01(072)
В43

Рекомендовано до друку рішенням науково-методичної комісії інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 20.10.26, протокол № 2.

Укладач:

Н. А. Доценко – д-р. пед. наук, канд. техн. наук, професор, професор кафедри загальнотехнічних дисциплін, Миколаївський національний аграрний університет

Рецензенти:

В. М. Зубко – д-р техн.наук, професор, професор кафедри механічної та електричної інженерії, Полтавський державний аграрний університет

О. А. Горбенко – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії, Миколаївський національний аграрний університет

© Миколаївський національний аграрний університет, 2026
© Доценко Н. А., 2026

ЗМІСТ

ВСТУП 9

1. ПЕДАГОГІЧНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ЦИФРОВОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ ВИКЛАДАЧІВ ІНЖЕНЕРНИХ ДИСЦИПЛІН 12

1.1. Цифрова компетентність під час викладання інженерних дисциплін: сутність і структура..... 12

1.2. Професійна діяльність викладача інженерних дисциплін та роль цифрових інструментів..... 13

1.3. Методологічні підходи та дидактичні принципи 15

1.4. Цілі й очікувані результати навчання: таксономія Блума 16

1.5. Критерії, показники й рівні сформованості готовності 18

2. МЕТОДИЧНА СИСТЕМА НАВЧАННЯ МАЙБУТНІХ ІНЖЕНЕРІВ ЗАСТОСУВАННЮ ЦИФРОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ 21

2.1. Модель методичної системи 21

2.2. Зміст і модульна структура навчання**Ошибка! Закладка не определена.**

2.3. Етапи формування готовності 22

2.4. Методи, форми й технології навчання 24

2.5. Цифрове освітнє середовище викладача й здобувача..... 26

2.6. Проєктування практичного заняття з цифровим інструментом 28

2.7. Оцінювання результатів навчання 28

3. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЦИФРОВОГО ПРОЄКТУВАННЯ МАШИН І ОБЛАДНАННЯ 30

3.1. Основні етапи проєктування та конструювання машин..... 30

3.2. Поняття конструктивних і технологічних параметрів машин та обладнання 31

3.3. Роль цифрових технологій у сучасному інженерному проєктуванні 33

3.4. Основні підходи до оцінювання ефективності конструктивних рішень 34

3.5. Методика вивчення теми «Цифрове проєктування машин і обладнання». 37
4. ЦИФРОВІ ІНСТРУМЕНТИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ 40
4.1. Використання електронних таблиць Microsoft Excel та Google Sheets для інженерних розрахунків 40
4.2. Застосування математичних пакетів для розрахунку параметрів машин і механізмів 42
4.3. Використання цифрових калькуляторів для розрахунку передач, валів, підшипників та інших деталей машин 44
4.4. Автоматизація інженерних розрахунків за допомогою інструментів штучного інтелекту. 47
4.5. Методика вивчення теми «Цифрові інструменти розрахунку». 55
5. ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ 58
5.1. Використання CAD-систем для створення тривимірних моделей машин і обладнання 58
5.2. Основи параметричного моделювання деталей та складальних одиниць 60
5.3. Аналіз міцності та деформацій конструктивних елементів 61
5.4. Використання CAE-систем для інженерного аналізу конструкцій 64
5.5. Візуалізація та інтерпретація результатів цифрового моделювання 66
5.6. Методика вивчення теми «Цифрове моделювання та аналіз конструкцій». 67
6. МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ МАШИН І ОБЛАДНАННЯ 69
6.1. Основні критерії оптимізації конструктивних параметрів 69
6.2. Оптимізація масогабаритних характеристик деталей і вузлів .. 70
6.3. Оптимізація енергетичних та експлуатаційних показників обладнання 73

6.4. Використання цифрових інструментів для порівняння альтернативних конструктивних рішень 74
6.5. Багатокритеріальна оптимізація інженерних систем 76
6.6. Методика вивчення теми «Оптимізація конструктивних параметрів». 78
7. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ У ПРОЄКТУВАННІ АГРОІНЖЕНЕРНОГО ОБЛАДНАННЯ 80
7.1. Розрахунок конструктивних параметрів робочих органів сільськогосподарських машин 80
7.2. Цифрове моделювання елементів механізмів і приводів 81
7.3. Розрахунок та оптимізація параметрів обладнання для переробки сільськогосподарської продукції 82
7.4. Аналіз конструктивних параметрів обладнання для тваринницьких підприємств 84
7.5. Практичний приклад комплексного вдосконалення конструкції машини із застосуванням цифрових інструментів 85
7.6. Методика вивчення теми «Цифрові інструменти в проєктуванні агроінженерного обладнання». 86
8. ОРГАНІЗАЦІЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ 89
8.1. Послідовність виконання індивідуального інженерного завдання 89
8.2. Використання цифрових ресурсів для пошуку технічної інформації 90
8.3. Вимоги до оформлення результатів розрахунків і цифрового моделювання 92
8.4. Критерії оцінювання 93
8.5. Портфоліо та рефлексія як засоби самостійної роботи майбутнього інженера. 94
9. ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ 96
9.1. Розрахунок параметрів механічної передачі в Microsoft Excel. 96
9.2. Визначення геометричних параметрів вала та перевірка його міцності. 97

9.3. Створення 3D-моделі деталі сільськогосподарської машини... 99
9.4. Аналіз напружено-деформованого стану конструктивного елемента. 99
9.5. Порівняння двох конструктивних варіантів робочого органу. 100
9.6. Оптимізація параметрів обладнання за критерієм енергоефективності. 101
10. ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ ТА ДИДАКТИЧНІ МАТЕРІАЛИ. 103
10.1. Розроблення технологічної карти практичного заняття. 103
10.2. Створення цифрового навчального кейсу з інженерним розрахунком. 104
10.3. Розроблення тесту з автоматичною перевіркою та аналіз його якості. 104
10.4. Розроблення рубрики оцінювання практичної роботи. 106
10.5. Мікровикладання: проведення фрагмента заняття (15 хв) із взаємооцінюванням. 107
10.6. Проєкт «Цифровий навчальний ресурс» (відеоінструкція, інтерактивний аркуш, віртуальна лабораторна) і портфоліо. 108
ВИСНОВКИ..... 110
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ... **Ошибка! Закладка не определена.**
ДОДАТКИ..... **Ошибка! Закладка не определена.**
ДОДАТОК А. Приклади розрахункових таблиць 112
А.1. Розрахунок вала під зубчастим колесом 112
А.2. Перевірка підшипника кочення 112
ДОДАТОК Б. Алгоритми виконання інженерних розрахунків 113
Б.1. Розрахунок і добір діаметра вала 113
Б.2. Ітераційний добір параметрів з обмеженням 113
Б.3. Псевдокод добору діаметра 113
ДОДАТОК В. Приклади цифрових 3D-моделей 114
В.1. Ступінчастий вал 114
В.2. Шків (заготовка зубчастого колеса) 114

В.3. Кронштейн 115
В.4. Формати файлів і правила іменування..... 115
ДОДАТОК Г. Зразки оформлення результатів оптимізації 116
Г.1. Таблиця результатів 116
Г.2. Компромісні варіанти..... 116
Г.3. Зразок висновку 116
ДОДАТОК Д. Приклади запитів до інструментів ШІ для інженерних завдань..... 117
Д.1. Правила складання запитів 117
ДОДАТОК Е. Рекомендований перелік цифрових інструментів .. 119
ДОДАТОК Ж. Зразок технологічної карти практичного заняття . 120
ДОДАТОК И. Діагностичний інструментарій..... 121
ДОДАТОК К. Приклади запитів до ШІ для викладача та майбутнього інженера 123
Список використаних джерел:..... 125

ВСТУП

Сучасна агроінженерія, переживає перехід до моделі, яку прийнято пов’язувати з концепцією «Індустрія 4.0». Її ознаками є наскрізна цифровізація життєвого циклу виробу, об’єднання програмних і фізичних систем, використання датчиків та аналітики даних. Для інженера це означає, що креслярська дошка остаточно поступилася місцем комплексу взаємопов’язаних цифрових інструментів, у якому геометричну модель, розрахунок на міцність, аналіз потоків середовища, підготовку виробництва й супровід експлуатації виконують у єдиному інформаційному просторі.

Ключовим елементом цього підходу є цифровий двійник – комп’ютерна модель машини або її вузла, що відтворює поведінку реального об’єкта та може уточнюватися за даними його роботи. Наявність такої моделі дає змогу випробовувати сотні варіантів конструкції на комп’ютері, а не в металі, виявляти перевантажені перерізи, надмірну металоємність і резонансні режими ще до виготовлення прототипу. Внаслідок цього скорочується цикл розроблення, зменшується кількість дорогих фізичних дослідних зразків, а рішення ухвалюються на підставі кількісних розрахунків, а не лише досвіду та аналогів.

Для аграрного сектору України ці питання мають і практичний, і стратегічний вимір. Парк сільськогосподарської техніки є різнорідним, значна його частина потребує відновлення та модернізації, а постачання окремих вузлів і запасних частин ускладнене. За цих умов зростає потреба в місцевому проєктуванні й виготовленні змінних деталей, робочих органів, пристроїв для переробки продукції, у реверсивному інжинірингу зношених елементів та адаптації імпортних машин до вітчизняних умов експлуатації. Виконувати такі завдання швидко й з належною якістю можна лише за умови володіння сучасними засобами розрахунку, моделювання та оптимізації.

Метою методичних рекомендацій є формування практичних умінь застосовувати цифрові інструменти для розрахунку, аналізу та

оптимізації конструктивних параметрів машин і обладнання. Для досягнення мети передбачено виконання таких завдань:

- засвоїти теоретичні основи цифрового проєктування, поняття параметрів, критеріїв та обмежень;
- навчитися будувати розрахункові моделі та виконувати інженерні розрахунки засобами електронних таблиць і мов програмування;
- опанувати принципи параметричного тривимірного моделювання та інженерного аналізу методом скінченних елементів;
- засвоїти постановку та розв’язання задач оптимізації конструктивних параметрів;
- оволодіти методикою використання засобів штучного інтелекту як допоміжного інструмента інженера з обов’язковою перевіркою результатів;
- набути навичок оформлення результатів розрахунків і обґрунтування прийнятих конструктивних рішень.

Цифрові інструменти впливають на всі стадії створення й удосконалення машин. На етапі формування задуму вони дозволяють швидко порівняти альтернативні схеми за масою, енергоємністю та вартістю. Під час конструювання параметричні моделі забезпечують автоматичне оновлення креслень і специфікацій при зміні розмірів, що виключає розбіжності в документації. Інженерні розрахунки та чисельне моделювання виявляють слабкі місця конструкції без руйнівних випробувань, а методи оптимізації допомагають знаходити раціональне поєднання розмірів, режимів роботи й матеріалів.

Не менш важливо, що цифрові засоби підвищують відтворюваність інженерної роботи: розрахунок, оформлений у вигляді таблиці або програми з чітко визначеними вихідними даними, можна перевірити, повторити та передати колезі. Разом із тим слід пам’ятати, що результат комп’ютерного розрахунку не є самоціллю й залежить від адекватності моделі та якості вихідних даних. Тому в рекомендаціях послідовно підкреслюється

необхідність перевірки результатів – порівнянням з аналітичними оцінками, довідковими значеннями або експериментом.

Рекомендації складаються з вступу, п’яти розділів, висновків, переліку літератури та додатків. У першому розділі викладено теоретичні основи цифрового проєктування й підходи до оцінювання конструктивних рішень. Наступні розділи присвячено конкретним групам інструментів: розрахункам у табличних процесорах і засобами програмування, тривимірному моделюванню та інженерному аналізу, оптимізації та використанню штучного інтелекту. У кожному розділі наведено теоретичні відомості, алгоритми дій, приклади з повним розв’язком і запитання для самоконтролю.

Працювати з матеріалом рекомендовано послідовно: спочатку вивчити теоретичну частину, потім самостійно відтворити наведені приклади, змінюючи вихідні дані, і лише після цього виконувати індивідуальні завдання. Результати кожного розрахунку доцільно супроводжувати короткими висновками щодо придатності прийнятих параметрів.

Методичні рекомендації адресовано здобувачам вищої освіти спеціальностей агроінженерного профілю під час вивчення дисциплін з проєктування, розрахунку та удосконалення машин і обладнання, а також виконання курсових і кваліфікаційних робіт. Вони можуть бути корисні викладачам, аспірантам та інженерам-практикам, які розпочинають застосування цифрових методів у конструкторській і технологічній діяльності.

1. ПЕДАГОГІЧНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ЦИФРОВОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ ВИКЛАДАЧІВ ІНЖЕНЕРНИХ ДИСЦИПЛІН

1.1. Цифрова компетентність під час викладання інженерних дисциплін: сутність і структура

Цифрова компетентність викладача інженерних дисциплін – це інтегрована здатність упевнено, критично та відповідально використовувати сучасні цифрові технології для розв'язання професійних інженерних завдань, пов'язаних із проєктуванням, розрахунком, моделюванням, аналізом та оптимізацією конструктивних параметрів сільськогосподарських машин і обладнання. Вона передбачає володіння цифровими інструментами для опрацювання технічної інформації, виконання інженерних розрахунків, дослідження робочих процесів, оцінювання експлуатаційних характеристик та обґрунтування раціональних конструктивно-технологічних рішень.

Загальноєвропейським орієнтиром розвитку цифрових компетентностей є Європейська рамка цифрової компетентності громадян DigComp 2.2, яка визначає п'ять основних сфер: 1) інформаційна та дата-грамотність; 2) комунікація та співпраця; 3) створення цифрового контенту; 4) безпека; 5) розв'язання проблем. Рамка передбачає вісім рівнів володіння цифровими компетентностями – від базового до високоспеціалізованого. В українському контексті відповідні підходи відображено в Концепції розвитку цифрових компетентностей (2021), яка визначає стратегічні напрями формування цифрових навичок та їх застосування у професійній діяльності.

Водночас загальні рамки цифрової компетентності не повною мірою враховують специфіку інженерної діяльності в аграрному секторі. Тому в цих методичних рекомендаціях запропоновано чотирикомпонентну структуру цифрової компетентності фахівця агроінженерного профілю (рис. 1.1), доповнену інженерно-цифровою складовою. Вона охоплює здатність застосовувати

електронні таблиці, математичні пакети, системи автоматизованого проєктування (CAD), системи інженерного аналізу (CAE), засоби комп'ютерного моделювання, методи багатокритеріальної оптимізації та технології штучного інтелекту (ШІ) для розрахунку, аналізу й обґрунтування конструктивних параметрів машин і обладнання в агроінженерії.



Рис. 1.1. Структура цифрової компетентності викладача інженерних дисциплін

Примітка. *Складено автором на основі аналізу рамок DigCompEdu і DigComp.*

1.2. Професійна діяльність викладача інженерних дисциплін та роль цифрових інструментів

Викладання інженерних дисциплін у закладах вищої освіти поєднує кілька функцій: навчальну, конструкторсько-технологічну, організаційну, діагностичну, виховну та самоосвітню. Для кожної існують цифрові засоби, які підвищують результативність і економлять час (табл. 1.1). Принциповим є те, що цифрові

інструменти використовуються не заради технологій, а як засіб розв’язання конкретної професійної задачі.

Таблиця 1.1 – Функції та приклади цифрових інструментів

Функція	**Типові завдання**	**Приклади цифрових інструментів**
Навчальна	Пояснення розрахункових методик, демонстрація моделей	Електронні таблиці, CAD-моделі, презентації, інтерактивні дошки
Конструкторсько-технологічна	Добір і розрахунок параметрів, підготовка наочних вузлів і розрахункових задач	Математичні пакети, параметричне моделювання, CAE-аналіз
Організаційна	Планування занять, ведення курсу, спільна робота	LMS Moodle, Google Classroom, Microsoft Teams, Miro, Padlet
Діагностична	Контроль знань, аналіз успішності	Google Forms, Microsoft Forms, Kahoot!, Quizizz, електронні журнали
Виховна	Формування культури праці, безпеки, відповідальності	Віртуальні лабораторні та симулятори, відеоматеріали, спільні проєкти
Самоосвітня	Підвищення кваліфікації, ведення портфоліо	Онлайн-курси, GitHub, хмарні сховища, ШІ-асистенти (з перевіркою)

До типових цифрових завдань належать:

– підготовка розрахункових задач і кейсів з варіативними вихідними даними;
– моделювання вузла для демонстрації принципу дії та впливу параметрів;
– організація віртуальної лабораторної роботи, якщо реальне обладнання недоступне або небезпечне;
– оцінювання робіт за рубриками та аналіз типових помилок;
– підготовка студентів до цифрової праці в сучасному агровиробництві (бази даних, моніторинг, цифрові документи).

1.3. Методологічні підходи та дидактичні принципи

Методологічною основою підготовки є сукупність взаємодоповнювальних підходів. **Компетентнісний** підхід орієнтує на результат – здатність діяти в реальних ситуаціях. **Діяльнісний** передбачає, що знання формуються в процесі виконання дій. **Практико-орієнтований** вимагає, щоб завдання були близькими до виробничих. **Студентоцентрований** відводить здобувачу роль активного суб'єкта, а викладачу – організатора й консультанта. **Контекстний** підхід моделює предметний і соціальний зміст майбутньої професії у формах навчальної діяльності – від навчального до квазіпрофесійного і навчально-професійного рівнів. **Системний** підхід розглядає компетентність як цілісність складників, взаємопов'язаних цілями, змістом, методами і контролем.

Організацію навчальної діяльності доцільно будувати за циклом Колба: конкретний досвід (виконання розрахунку), рефлексивне спостереження (аналіз результату), абстрактна концептуалізація (узагальнення алгоритму), активне експериментування (зміна вихідних даних, нова задача). Поступовий перехід відповідальності від викладача до здобувача реалізують за схемою «я роблю – ми робимо – ти робиш».

На цих засадах сформульовано дидактичні принципи, наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Дидактичні принципи та їх реалізація під час вивчення інженерних дисциплін

Принцип	Як реалізується
Професійної спрямованості	Усі задачі пов'язані з машинами та обладнанням агропідприємств; кожне заняття завершується методичним завданням (як цьому навчити учня)
Наскрізності	Цифрові засоби використовуються в усіх модулях; результати попередніх тем стають вихідними даними наступних
Поступового ускладнення	Репродуктивні – частково-пошукові – творчі завдання; від готового шаблону до власної моделі

«Перевір результат»	Кожен результат перевіряється іншим способом: ручна оцінка порядку величини, інший засіб, граничний випадок
Академічної доброчесності	Фіксація використаних джерел і запитів до ШІ; пояснення результату своїми словами; захист роботи
Варіативності	Індивідуальні вихідні дані, вибір засобу з кількох рівнозначних, різні рівні складності завдань

1.4. Цілі й очікувані результати навчання: таксономія Блума

Для чіткого формулювання цілей та результатів використовують переглянуту таксономію Блума. Вона виокремлює шість когнітивних рівнів: запам’ятовувати, розуміти, застосовувати, аналізувати, оцінювати, створювати. Кожен наступний рівень охоплює попередні. Приклади завдань кожного рівня подано в табл. 1.3.

Таблиця 1.4 – Рівні таксономії Блума та приклади завдань

Рівень	**Інженерно-цифрове завдання**	**Педагогічне завдання**
Запам’ятовувати	Назвати основні команди й типи перерізів у CAD; перелічити вихідні дані розрахунку вала	Навести дидактичні принципи; перелічити функції
Розуміти	Пояснити алгоритм розрахунку й сенс коефіцієнта запасу міцності	Пояснити, чому завдання належить до певного рівня складності
Застосовувати	Виконати розрахунок вала в електронній таблиці за заданими даними	Провести фрагмент заняття за готовою технологічною картою
Аналізувати	Дослідити чутливість напруження до діаметра; знайти помилку в чужому розрахунку	Проаналізувати типові помилки у роботі та їх причини
Оцінювати	Обрати оптимальний варіант конструкції за критеріями; оцінити достовірність відповіді ШІ	Оцінити роботу учня за рубрикою; оцінити якість тестового завдання
Створювати	Побудувати параметричну 3D-модель вала	Розробити кейс і технологічну карту заняття

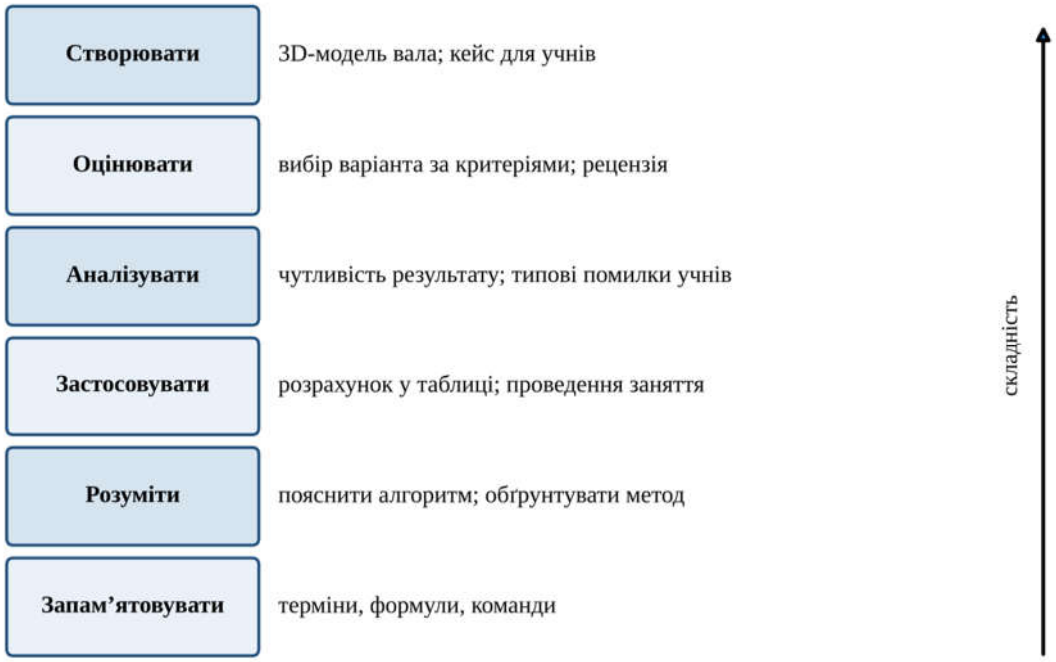


Рис. 1.2. Рівні таксономії Блума: від запам'ятовування до створення (з прикладами завдань)

Результат навчання слід формулювати за схемою: **дієслово дії + об'єкт + умови + критерій**. Дієслово має відповідати рівню таксономії й бути спостережуваним; слова «знати», «ознайомитися» як результати не підходять, бо їх неможливо перевірити. Приклади результатів дисципліни:

1) виконати розрахунок вала в електронній таблиці за індивідуальними даними з відхиленням від контрольного значення не більше 2 %;
2) побудувати параметричну 3D-модель вала, яка перебудовується при зміні діаметра без помилок;
3) проаналізувати чутливість результату до зміни вихідних параметрів і сформулювати висновок;
4) оцінити відповідь ШІ на інженерну задачу, виконавши незалежну перевірку, і задокументувати результат;
5) розробити розрахунковий кейс для студентів із трьома рівнями складності та рубрикою оцінювання.

1.5. Критерії, показники й рівні сформованості готовності

Готовність здобувача вищої освіти до застосування цифрових інструментів оцінюють за чотирма критеріями, що відповідають складникам компетентності. Кожен критерій розкривається показниками, а їх вираженість визначає рівень (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Критерії, показники та характеристика рівнів готовності

Критерій	Показники	Початковий	Достатній	Високий
Мотиваційно-ціннісний	Інтерес, усвідомлення цінності, ініціатива	Ситуативний інтерес	Стійкий інтерес, виконання завдань	Ініціатива, власні проєкти
Когнітивний	Повнота й глибина знань про засоби та методи	Фрагментарні знання	Системні знання з поодинокими неточностями	Глибоке розуміння, вміння обґрунтувати вибір
Діяльнісний	Правильність розрахунків і моделей, якість навчальних матеріалів	Дії за зразком із допомогою	Самостійне виконання типових задач	Розв’язання нестандартних задач, авторські матеріали
Рефлексивно-етичний	Самооцінка, перевірка результатів, доброчесність	Рідкісна самооцінка	Регулярна перевірка результатів	Аналіз власної практики, план розвитку

Для кількісної оцінки визначають інтегральний показник готовності:

$$K = \sum_{i=1}^{4} w_i \cdot k_i \qquad (1.1)$$

де K – інтегральний показник готовності, $0 \le K \le 1$;

k_i – показник за i-м критерієм, одержаний за результатами діагностики, $0 \le k_i \le 1$;

w_i – вага критерію, $\sum w_i = 1$.

Показник за критерієм одержують нормуванням первинного балу методу діагностики:

$$k_i = \frac{B_i}{B_{\max,i}} \qquad (1.2)$$

де B_i – набрана кількість балів за i-м критерієм;

$B_{max,i}$ – максимально можлива кількість балів.

Рекомендовані ваги: мотиваційно-ціннісний $w_1 = 0{,}20$; когнітивний $w_2 = 0{,}25$; діяльнісний $w_3 = 0{,}35$; рефлексивно-етичний $w_4 = 0{,}20$. Найбільшу вагу має діяльнісний критерій, оскільки саме вміння діяти є кінцевою метою. Рівні визначають за порогами: початковий – $K < 0{,}55$; достатній – $0{,}55 \le K < 0{,}80$; високий – $K \ge 0{,}80$.

Для діагностики поєднують тестування (когнітивний критерій), анкету самооцінки (мотиваційний і рефлексивний), спостереження, аналіз портфоліо й експертне оцінювання матеріалів за рубрикою (діяльнісний); показники нормують за формулою (1.2).

Приклад обчислення (ілюстративний)

Нехай результати здобувача за критеріями становлять: $k_1 = 0{,}80$; $k_2 = 0{,}70$; $k_3 = 0{,}60$; $k_4 = 0{,}75$. Тоді за формулою (1.1): $K = 0{,}20 \cdot 0{,}80 + 0{,}25 \cdot 0{,}70 + 0{,}35 \cdot 0{,}60 + 0{,}20 \cdot 0{,}75 = 0{,}160 + 0{,}175 + 0{,}210 + 0{,}150 = 0{,}695$. Отже, $K = 0{,}695$ – достатній рівень. Найнижчим є діяльнісний показник, тому здобувачу доцільно запропонувати додаткові завдання практичного характеру.

Для групи результати подають як розподіл здобувачів за рівнями на початку та наприкінці вивчення дисципліни. На рис. 1.3 наведено умовний приклад такого розподілу; реальні дані слід збирати та обробляти для конкретної групи.

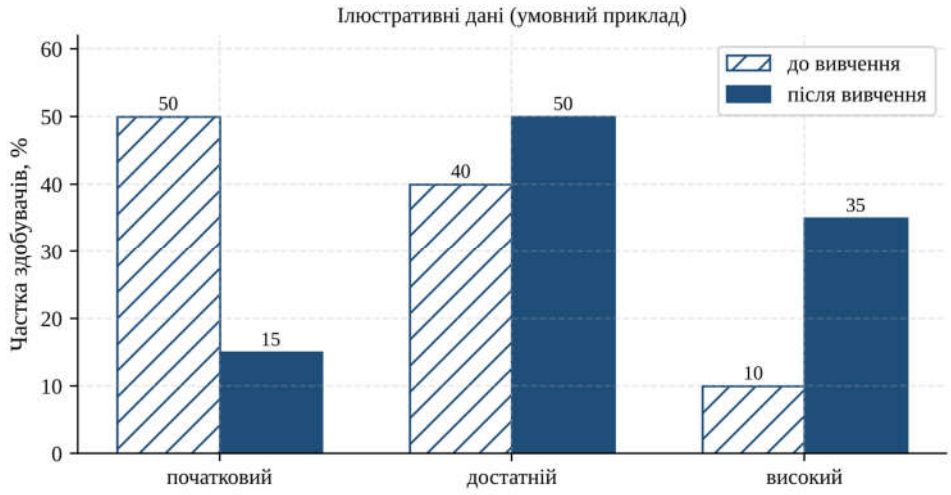


Рис. 1.3. Розподіл здобувачів за рівнями готовності до та після вивчення дисципліни (ілюстративні дані (умовний приклад))

Динаміку готовності групи характеризує нормалізований приріст:

$$g = \frac{K_2 - K_1}{1 - K_1} \quad (1.3)$$

де K_1, K_2 – середні значення інтегрального показника групи до і після вивчення дисципліни;

g – нормалізований приріст (частка досяжного приросту, яку реалізовано).

Наприклад, якщо за умовним прикладом $K_1 = 0{,}52$, а $K_2 = 0{,}71$, то $g = (0{,}71 - 0{,}52)/(1 - 0{,}52) = 0{,}40$. Тобто реалізовано близько 40 % можливого приросту.

Питання для самоконтролю

1) Які складники входять до структури цифрової компетентності здобувача вищої освіти і чим вона відрізняється від загальної цифрової грамотності?
2) Як сфери DigCompEdu можна використати для планування власного професійного розвитку?
3) Які дидактичні принципи найважливіші під час вивчення розрахунково-модельних тем і як вони реалізуються на практиці?
4) Сформулюйте результат навчання за схемою «дієслово + об’єкт + умови + критерій» для рівнів «аналізувати» та «створювати».
5) Як визначити рівень готовності здобувача за інтегральним показником і які методи діагностики доцільно поєднати?

2. МЕТОДИЧНА СИСТЕМА НАВЧАННЯ МАЙБУТНІХ ІНЖЕНЕРІВ ЗАСТОСУВАННЮ ЦИФРОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ

2.1. Модель методичної системи

Методична система навчання – це цілісна сукупність взаємопов'язаних компонентів (цілей, змісту, методів, форм і засобів навчання, діагностики результатів), що забезпечує досягнення запланованих освітніх результатів. Для підготовки майбутніх інженерів застосуванню цифрових інструментів запропоновано модель із чотирьох компонентів (рис. 2.1), яка реалізується за певних педагогічних умов.

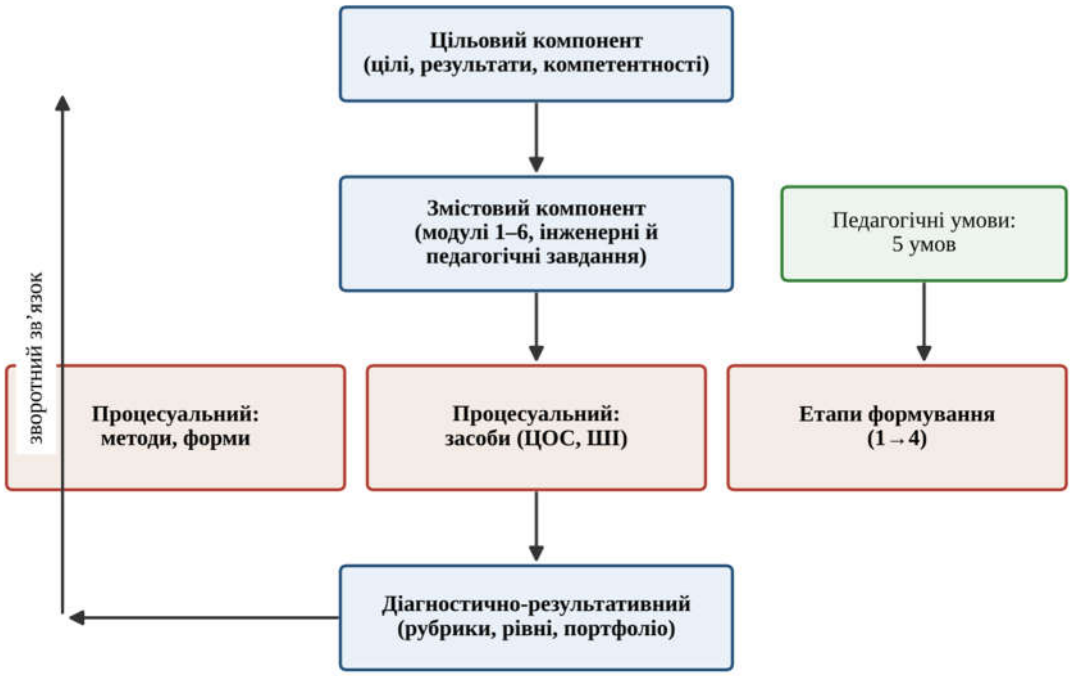


Рис. 2.1. Модель методичної системи навчання майбутніх інженерів застосуванню цифрових інструментів

Цільовий компонент визначає мету, завдання та очікувані результати формування цифрової компетентності майбутніх інженерів за чотирма її складниками. Результати передбачають здатність застосовувати цифрові технології для розв'язання професійних завдань, зокрема створювати 3D-моделі деталей, виконувати інженерні розрахунки й оцінювати результати моделювання.

Змістовий компонент охоплює знання та вміння щодо використання CAD/CAE-систем, математичних пакетів, електронних таблиць, засобів 3D-моделювання, оптимізації та штучного інтелекту для проєктування, аналізу й удосконалення технічних систем.

Процесуальний компонент передбачає використання проблемного, проєктного та дослідницького методів навчання, лекційних, практичних і лабораторних занять, самостійної роботи із застосуванням цифрового освітнього середовища та інженерного програмного забезпечення.

Діагностично-результативний компонент забезпечує оцінювання рівня сформованості цифрової компетентності за визначеними критеріями й показниками шляхом вхідної діагностики, поточного контролю та підсумкового оцінювання результатів інженерної діяльності.

Педагогічні умови реалізації моделі

1. Професійно орієнтований характер завдань – моделювання реальних інженерних ситуацій: виконання розрахунків, проєктування вузлів і механізмів, створення 3D-моделей, аналіз та оптимізація технічних систем.

2. Поетапне ускладнення завдань – перехід від виконання розрахунків і побудови моделей за зразком до самостійного розроблення та вдосконалення інженерних рішень.

3. Інтеграція міждисциплінарних знань – поєднання математичних, технічних, технологічних і цифрових знань під час розв’язання комплексних інженерних задач.

4. Використання цифрових технологій та ШІ – застосування CAD/CAE-систем, математичних пакетів і ШІ-інструментів із обов’язковою перевіркою результатів незалежними розрахунками, експериментальними даними або довідковими джерелами.

5. Рефлексія та самооцінювання – аналіз отриманих результатів, виявлення помилок, обґрунтування прийнятих

технічних рішень і визначення напрямів їх удосконалення (на основі циклу Колба).

2.2. Етапи формування готовності

Готовність формується в чотири етапи, що відповідають зростанню самостійності здобувача й зменшенню педагогічної підтримки (scaffolding). До завдань попереднього рівня здобувач повертається спіраллю, але на вищому рівні складності (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Етапи формування готовності та зміна ступеня самостійності

Таблиця 2.2 – Характеристика етапів формування готовності

Етап	Дидактичні завдання	Типові види діяльності	Цифрові засоби	Підтримка (scaffolding)	Результат
1. Ознайомчо-орієнтувальний	Сформувати мотивацію, уявлення про можливості інструментів, мову предметної галузі	Огляд інструментів; демонстрація викладача	Moodle, Mentimeter, Forms	Повна: готові зразки, покрокові інструкції, шаблони	Початковий рівень

2. Репродуктивно-діяльнісний	Закріпити алгоритми дій, сформувати навички роботи	Виконання за зразком: розрахунок передачі, вала в Excel; побудова 3D-моделі за кроками	Excel/Sheets, CAD	Часткова: чек-лист, приклад із розв'язком, консультація	Достатній рівень умінь
3. Продуктивно-творчий	Навчити адаптувати методи до нових умов, оптимізувати, створювати	Проєкт: параметризація, оптимізація; розроблення завдань і тестів	CAD/CAE, Solver, Colab, ШІ	Мінімальна: критерії, рубрика, запит на консультацію	Власний цифровий і методичний продукт
4. Професійно-рефлексивний	Інтегрувати інженерні та цифрові уміння, оцінити власну діяльність	Проведення фрагмента заняття, аналіз і взаємооцінювання, портфоліо, рефлексія	Padlet, Miro, Teams/Classroom	Експертна оцінка й peer review	Високий рівень

2.3. Методи, форми й технології навчання

Метод добирають за етапом формування готовності, типом завдання та ресурсами (табл. 2.3). Загальний принцип – **поступовий перехід відповідальності**: «я роблю» (викладач демонструє розрахунок передачі з коментарями), «ми робимо» (спільне виконання з підказками), «ти робиш» (самостійне виконання й перевірка). Методи доцільно комбінувати, наприклад «перевернуте» навчання + peer instruction + кейс.

Таблиця 2.3 – Методи й технології навчання: суть, засоби та приклади

Метод	**Суть**	**Цифрові засоби**	**Приклад із теми**	**Коли застосовувати**

Проблемне навчання	Створення проблемної ситуації, пошук розв’язання	Moodle (форум), Excel	Чому вал, розрахований лише на кручення, руйнується? Пошук причини	Етапи 2–3; на початку теми
Кейс-метод	Аналіз реальної ситуації з неповними даними	Padlet, Miro	Відмова редуктора: аналіз вихідних даних і розрахунку	Етапи 3–4; для аналізу та оцінювання
Проєктне навчання	Створення продукту за визначений час	CAD, GitHub, Classroom	Оптимізація маси вала зі збереженням запасу міцності	Етап 3; наприкінці модуля
«Перевернуте» навчання	Теорія – вдома, практика – на занятті	Moodle, відеолекції, тести	Відео про алгоритм розрахунку зубчастої передачі; на занятті – розрахунок	Етапи 2–3; великі групи
Змішане навчання	Поєднання очних і дистанційних форм	Moodle, Teams	Лекція онлайн, практикум в Excel – очно	Усі етапи; при обмеженні аудиторних годин
Віртуальна/імітаційна лабораторія	Експеримент у цифровій моделі	CAE (MCE), Colab	Зміна діаметра вала й спостереження за напруженнями	Етапи 2–3; коли реальний експеримент недоступний
Peer instruction / взаємонавчання	Пояснення матеріалу одне одному, обговорення відповідей	Mentimeter, Kahoot!	Голосування за відповідь, обговорення у парах, повторне голосування	Етапи 1–2; закріплення понять

Мікровикладання (microteaching)	Короткий (5–10 хв) фрагмент заняття з аналізом	Teams, відеозапис, Forms	Пояснення однокурсникам кроку розрахунку вала	Етап 4; формування цифрових умінь
Reverse-engineering аналізу готової моделі	Розбір готової таблиці/моделі, пошук помилок	Excel, CAD, ШІ	Знайти помилку в одиницях у чужому розрахунку	Етапи 2–3; формування критичного мислення

2.4. Цифрове освітнє середовище викладача й здобувача

Цифрове освітнє середовище (ЦОС) – сукупність програмних засобів, ресурсів і правил, що підтримує навчальний процес (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Цифрові засоби та їх педагогічне призначення

Засіб	Педагогічне призначення
LMS Moodle	Структурування курсу, ресурси, завдання, тести, журнал оцінок
Google Classroom	Видача й збір завдань, коментарі, оцінювання
Microsoft Teams	Онлайн-заняття, спільна робота, чат, записи
Google Forms / Microsoft Forms	Анкети, короткі тести, самооцінювання
Kahoot!, Quizizz, Mentimeter	Ігрове опитування, миттєве голосування, peer instruction
Padlet	Спільна дошка для ідей, рефлексії, портфоліо
Miro	Інтерактивна дошка, схеми, mind map
Google Colab, GitHub	Виконання коду, обмін проєктами, контроль версій

Структура сторінки онлайн-курсу

Рекомендована структура курсу в LMS: **вступний блок** (силабус, графік, політика доброчесності); **модулі** з метою, матеріалами, шаблонами, практичним завданням і тестом; **форум** взаємодопомоги; **рубрика**, розміщена до виконання роботи; **блок рефлексії** та портфоліо. Єдина структура модулів зменшує когнітивне навантаження.

Принципи вибору засобів та організаційні умови

– педагогічна доцільність: засіб добирають під мету заняття;
– доступність: безкоштовні або ліцензовані засоби, робота з телефона, альтернативи для здобувачів з особливими потребами;
– простота: мінімум платформ, єдиний обліковий запис;
– безпека даних: не завантажувати в ШІ персональні дані та конфіденційні матеріали;
– ліцензійна чистота: вільне або ліцензоване ПЗ, вказування джерел.

Роль ШІ для викладача, ризики й правила академічної доброчесності

ШІ-асистенти допомагають **генерувати варіанти завдань** з різними даними, **складати рубрики**, **адаптувати складність** і готувати **чернетки зворотного зв'язку**. Ризики: помилки в розрахунках, вигадані посилання, надмірна довіра, зниження самостійності, витік даних; відповідальність за зміст завдань і оцінки несе викладач. Правила академічної доброчесності щодо ШІ:

1) ШІ допускається лише в межах, визначених викладачем для завдання, і зазначається у звіті;
2) здобувач указує інструмент і запит (додаток К) та зберігає історію запитів;
3) кожен числовий результат ШІ перевіряється незалежно (ручний розрахунок, довідник);
4) заборонено видавати згенероване за власне без зазначення джерела;
5) заборонено вводити в ШІ персональні дані й неопубліковані матеріали закладу;
6) під час контрольних заходів ШІ не використовується, викладач може попросити усно пояснити розв'язання;
7) порушення розглядається за регламентом закладу; перше – як навчальна ситуація.

2.5. Проєктування практичного заняття з цифровим інструментом

Практичне заняття тривалістю 80 хв рекомендовано будувати за шестикроковою структурою (рис. 2.3): мотивація – 5 хв, актуалізація – 10, демонстрація викладача («я роблю») – 15, кероване виконання («ми робимо») – 25, самостійне виконання («ти робиш») – 15, рефлексія й контроль – 10. Сума часових блоків: 5 + 10 + 15 + 25 + 15 + 10 = 80 хв.

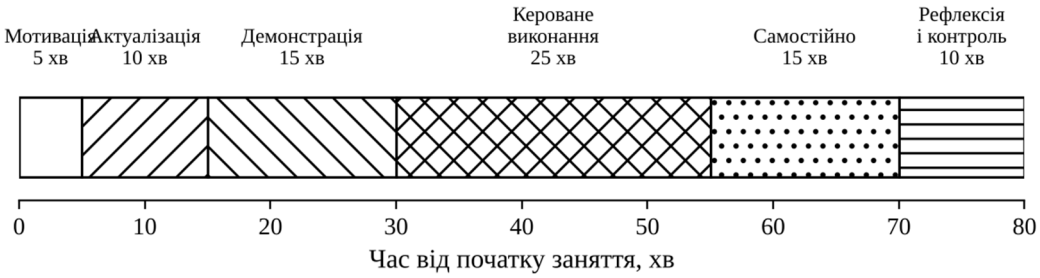


Рис. 2.3. Хронометраж практичного заняття (80 хв)

2.6. Оцінювання результатів навчання

Система оцінювання поєднує **формувальне** (поточний зворотний зв’язок, тести, чек-листи), **підсумкове** (залік, захист проєкту), **самооцінювання** (анкета, рефлексія) та **взаємооцінювання** (peer review за рубрикою). Критерії й рівні виконання оголошуються здобувачам до початку роботи.

Примітка. *Сума ваг: 30 + 20 + 20 + 15 + 15 = 100.*

Інтегральний бал за роботу визначається за формулою

$$S = \sum_{i=1}^{5} w_i \cdot s_i \qquad (2.1)$$

де S – підсумковий бал за роботу (0–100);

w_i – вага i-го критерію (бали);

s_i – коефіцієнт рівня виконання (1,0; 0,75; 0,5 або 0,25).

Приклад. Здобувач отримав рівні: 1,0; 0,75; 0,75; 0,5; 1,0. Тоді S = 30·1,0 + 20·0,75 + 20·0,75 + 15·0,5 + 15·1,0 = 30 + 15 + 15 + 7,5 + 15 = 82,5 бала. Оцінка за дисципліну формується як зважена сума поточного та підсумкового контролю:

$$G = 0{,}6 \cdot G_{\text{пот}} + 0{,}4 \cdot G_{\text{підс}} \qquad (2.4)$$

де G – оцінка за дисципліну (0–100);

$G_{\text{пот}}$ – середній бал за практичні роботи й завдання, у прикладі 82,5;

$G_{\text{підс}}$ – бал за підсумковий захист, у прикладі 84.

За даними прикладу $G = 0{,}6 \cdot 82{,}5 + 0{,}4 \cdot 84 = 49{,}5 + 33{,}6 = 83{,}1$ бала. Дані умовні й ілюструють порядок розрахунку.

Умови зарахування та правила зворотного зв'язку

- виконано й захищено не менше 80 % практичних робіт, усі з балом не нижче мінімального порогу (60);
- подано портфоліо з рефлексією та технологічною картою заняття;
- дотримано правила академічної доброчесності, зокрема щодо ШІ;
- підсумковий бал $G \geq 60$.

Зворотний зв'язок має бути **своєчасним** (3–5 днів), **конкретним** (критерій і місце помилки), **орієнтованим на дію** та **доброзичливим** (спочатку сильні сторони). Доцільно поєднувати коментар викладача, взаємоперевірку й автоматичний зворотний зв'язок LMS; чернетку коментаря може підготувати ШІ, але редагує її викладач.

Питання для самоконтролю

1) Назвіть компоненти методичної системи та поясніть їхній взаємозв'язок.
2) Які педагогічні умови забезпечують ефективність підготовки майбутнього інженера до застосування цифрових інструментів?
3) Чим відрізняються етапи формування готовності за видами діяльності та рівнем підтримки?
4) Обґрунтуйте вибір методів навчання для заняття з розрахунку вала та запропонуйте структуру 80-хвилинного заняття.

3. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЦИФРОВОГО ПРОЄКТУВАННЯ МАШИН І ОБЛАДНАННЯ

3.1. Основні етапи проєктування та конструювання машин

Проєктування машини – це процес перетворення потреби споживача на повний комплект документації, за яким виріб можна виготовити, випробувати й експлуатувати. Його організовують за стадіями, що відповідають національній системі конструкторської документації (зокрема ДСТУ 3008 щодо побудови та оформлення технічних документів) і традиційно успадкованим стадіям розроблення. Кожна стадія завершується чітко визначеним результатом, який перевіряють і затверджують перед переходом далі.

Технічне завдання (ТЗ) фіксує призначення машини, умови експлуатації, основні показники (продуктивність, потужність, масу, ресурс), вимоги безпеки та ергономіки. Помилки на цій стадії найдорожчі, адже виявляються пізніше всього. На стадії **технічної пропозиції** виконують аналіз аналогів і патентний пошук, розглядають альтернативні принципові схеми. **Ескізний проєкт** визначає принципові конструктивні рішення, загальний вигляд, компонувальну схему, орієнтовні розміри. У **технічному проєкті** остаточно вибирають конструкцію, виконують основні розрахунки на міцність, жорсткість і ресурс, уточнюють кінематичні та силові схеми. **Робочий проєкт** передбачає розроблення креслень деталей, складальних одиниць, специфікацій і технологічної документації, а також виготовлення й випробування дослідного зразка.

Послідовність стадій має **ітераційний характер**: результати розрахунків і випробувань нерідко вимагають повернення до попередніх стадій і зміни прийнятих рішень (рис. 3.1). Наприклад, якщо розрахунок на міцність показав недостатній запас міцності вала, доводиться збільшувати діаметр, змінювати матеріал або переглядати компонування. Цифрові інструменти здешевлюють кожну таку ітерацію, оскільки зміна параметру моделі займає хвилини, а не тижні.

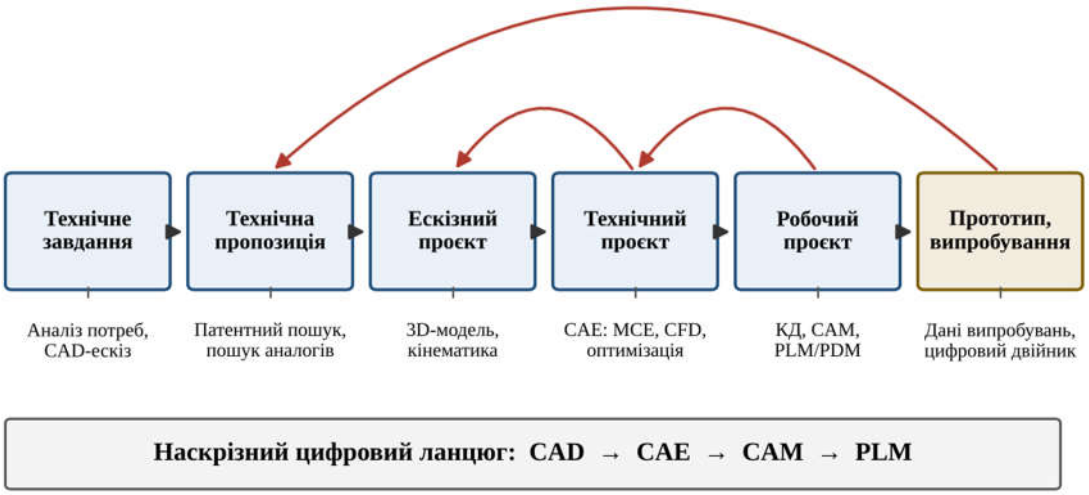


Рис. 3.1. Схема етапів проєктування з ітераційними зворотними зв’язками

Сучасне проєктування спирається на наскрізний **цифровий ланцюг**. Системи автоматизованого проєктування (CAD) створюють геометричну модель і креслення. Системи інженерного аналізу (CAE) використовують цю модель для розрахунків міцності, динаміки, теплових процесів і течії рідин та газів. Системи підготовки виробництва (CAM) генерують програми для верстатів з ЧПК і адитивних установок на основі тієї самої геометрії. Системи управління даними про виріб (PLM/PDM) зберігають версії моделей, специфікації, зміни та забезпечують узгодженість даних між учасниками проєкту. На стадії технічного завдання користуються електронними таблицями й базами вимог, на ескізній – параметричним 3D-моделюванням і табличними розрахунками, на технічному проєкті – розрахунками в Python, MCE та оптимізацією, на робочому – CAD, CAM і PDM/PLM, а на стадії випробувань – обробкою даних і цифровим двійником.

3.2. Поняття конструктивних і технологічних параметрів машин та обладнання

Параметром називають величину, що кількісно характеризує властивість машини, її елемента або процесу роботи. **Конструктивні параметри** визначають будову машини: розміри, форму, взаємне розташування елементів, матеріал. **Технологічні параметри** характеризують режими виконання процесу – частоту

обертання, швидкість подачі, тиск, витрату матеріалу. У машинах для переробки сільськогосподарської продукції ці групи нерозривно пов’язані: продуктивність шнекового транспортера залежить від діаметра й кроку шнека (конструктивні) і від частоти обертання (технологічний).

За фізичним змістом параметри поділяють на кілька груп (рис. 3.2). **Геометричні** – діаметри, довжини, кроки, зазори, кути. **Кінематичні** – частоти обертання, швидкості, прискорення. **Силові** – сили, моменти, тиски, напруження. **Енергетичні** – потужність, ККД, питомі витрати енергії. **Масогабаритні** – маса, об’єм, габаритні розміри. **Експлуатаційні** – продуктивність, ресурс, надійність, витрати на обслуговування.



Рис. 3.2. Класифікація параметрів машин та обладнання

У постановці задачі проєктування кожен параметр виконує одну з трьох ролей. **Змінні проєктування** – ті величини, які конструктор може вільно вибирати й змінювати (діаметр вала, кут встановлення ножа). **Обмеження** – умови, які мають виконуватись обов’язково (напруження не перевищують допустимих, габарит вкладається в задану зону, температура не перевищує межу). **Критерії** – показники, за якими порівнюють допустимі варіанти (маса, собівартість, питома енергоємність). Один і той самий параметр може змінювати роль залежно від задачі: маса в одному випадку є критерієм мінімізації, в іншому – обмеженням на

вантажопідйомність шасі. Параметри пов’язані між собою математичними залежностями, і задача конструктора полягає в тому, щоб підібрати значення змінних, за яких виконуються всі обмеження, а критерії набувають найкращих значень. Наприклад, діаметр і крок шнека транспортера є змінними, потужність двигуна – обмеженням і критерієм, а продуктивність і ресурс – критеріями та вимогами ТЗ. Крім того, параметри поділяють на **детерміновані** (задані точно) та **випадкові** (властивості матеріалу, навантаження, вологість зерна), для яких у розрахунках користуються середніми значеннями й запасами. Це зумовлює потребу в коефіцієнтах запасу та перевірці чутливості результату до зміни вихідних даних.

3.3. Роль цифрових технологій у сучасному інженерному проєктуванні

Цифрові технології охоплюють весь життєвий цикл машини. **CAD** забезпечує тривимірне та параметричне моделювання: зміна одного розміру автоматично оновлює залежні елементи, складання, креслення й масо-інерційні характеристики. **CAE** дозволяє аналізувати напружено-деформований стан методом скінченних елементів, моделювати рух механізмів, течію середовищ і теплообмін. **CAM** переносить геометрію у виробництво. **PLM** забезпечує керування даними й змінами. Важливим напрямом є **оптимізація**: автоматичний пошук значень змінних, що покращують критерій за дотримання обмежень.

Дедалі більшого значення набувають **цифровий двійник** (модель, що актуалізується даними датчиків і дозволяє прогнозувати стан та ресурс машини), **засоби штучного інтелекту** (допомога в підготовці розрахункових скриптів, пошуку літератури, аналізі даних) та **хмарні сервіси** (доступ до обчислювальних потужностей і спільна робота над проєктом без прив’язки до робочого місця).

До переваг належать скорочення часу розроблення, розгляд більшої кількості варіантів, зменшення кількості фізичних прототипів і повторюваність розрахунків. Водночас існують ризики: надмірна довіра до результатів (красива картина напружень не

гарантує коректності моделі), залежність від якості вихідних даних (принцип «сміття на вході – сміття на виході»), потреба в кваліфікації для постановки граничних умов, вартість ліцензій, безпека даних при використанні хмарних сервісів і ШІ, а також зайва складність там, де достатньо аналітичної оцінки.

Якість вихідних даних, верифікація та валідація

Достовірність результатів визначається насамперед **вихідними даними**: геометрією, властивостями матеріалів, навантаженнями та граничними умовами. Властивості матеріалів слід брати з довідників або сертифікатів, з посиланням на джерело й одиниці виміру; навантаження – з нормативних вимог, розрахунку або вимірювань. Безпосередньо перед розрахунком необхідно перевірити узгодженість одиниць, діапазони значень і повноту набору даних.

Для оцінювання моделі розрізняють два поняття. **Верифікація** відповідає на питання «чи правильно розв’язано рівняння?»: перевіряють програмну реалізацію, збіжність за густотою сітки, порівнюють з відомим аналітичним розв’язком простішої задачі. **Валідація** відповідає на питання «чи правильні рівняння та припущення?»: результати порівнюють з експериментом, заміряними напруженнями, даними експлуатації. Рекомендований мінімум для навчальних робіт: перевірка розмірностей, оцінка порядку величини, порівняння з ручним розрахунком і аналіз чутливості до ключових вхідних параметрів.

3.4. Основні підходи до оцінювання ефективності конструктивних рішень

Ефективність конструктивного рішення оцінюють сукупністю критеріїв. До **технічних** належать міцність (здатність чинити опір руйнуванню), жорсткість (опір деформації), запас міцності, ресурс, маса, продуктивність, енергоємність. Запас міцності визначають як відношення граничного напруження до діючого:

$$n = \frac{\sigma_{lim}}{\sigma} \geq [n] \qquad (3.1)$$

де n – розрахунковий коефіцієнт запасу міцності;

$\sigma_{\lim}$ – граничне напруження матеріалу (межа текучості або витривалості), МПа;
σ – найбільше діюче напруження в небезпечному перерізі, МПа;
$[n]$ – допустимий запас міцності, що приймається за довідником (для загального машинобудування типово 1,3–2,5).

Наприклад, при $\sigma_{\lim}$ = 360 МПа та σ = 150 МПа маємо n = 360/150 = 2,4, що перевищує допустиме значення $[n]$ = 2,0, тобто умова міцності виконується.

Для порівняння машин різної потужності й розмірів використовують **питомі показники**. Питома металоємність показує, скільки маси припадає на одиницю продуктивності, а питома енергоємність – скільки енергії витрачається на одиницю продукції:

$$g_m = \frac{m}{Q} \tag{3.2}$$

де g_m – питома металоємність, кг/(т/год);
m – маса машини, кг;
Q – продуктивність, т/год.

$$e = \frac{P}{Q} \tag{3.3}$$

де e – питома енергоємність, кВт·год/т;
P – споживана потужність, кВт;
Q – продуктивність, т/год.

Наприклад, для подрібнювача зерна з m = 1200 кг, P = 22 кВт, Q = 5 т/год отримуємо g_m = 1200/5 = 240 кг/(т/год) та e = 22/5 = 4,4 кВт·год/т.

До **економічних** критеріїв належать собівартість виготовлення, експлуатаційні витрати та строк окупності. Строк окупності додаткових капіталовкладень у вдосконалену конструкцію:

$$T_{ok} = \frac{\Delta K}{\Delta E} \tag{3.4}$$

де T_{ok} – строк окупності, років;
ΔK – додаткові капіталовкладення, грн;
ΔE – річна економія експлуатаційних витрат, грн/рік.

Для аграрних машин істотними є також **ергономічні** (рівень шуму, вібрації, зручність обслуговування, безпека) та **екологічні**

критерії (викиди, втрати продукції, ущільнення ґрунту). Їх оцінюють порівнянням з нормативними вимогами або за експертними балами.

Зведений показник за методом вагових коефіцієнтів

Коли критеріїв кілька й вони мають різні одиниці вимірювання, користуються **інтегральним (зведеним) показником**. Спочатку показники **нормують**, щоб привести їх до безрозмірного вигляду в діапазоні від 0 до 1, причому найкращому варіанту відповідає значення 1. Для показників, які бажано збільшувати (запас міцності, ресурс), і для тих, що бажано зменшувати (маса, собівартість, енергоємність), формули різні:

$$k_i = \frac{x_i}{x_{max}} \tag{3.5}$$

де k_i – нормований показник i-го критерію (чим більше, тим краще);
x_i – значення критерію для даного варіанта;
$x_{\max}$ – найкраще (найбільше) значення критерію серед порівнюваних варіантів.

$$k_i = \frac{x_{min}}{x_i} \tag{3.6}$$

де $x_{\min}$ – найкраще (найменше) значення критерію серед порівнюваних варіантів (для показників, які бажано зменшувати); решта позначень – як у формулі (3.5).

Значущість критеріїв враховують ваговими коефіцієнтами w_i, що визначаються експертно (ранжуванням, попарним порівнянням) і задовольняють умову $\sum w_i = 1$. Інтегральний критерій:

$$K = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot k_i \tag{3.7}$$

де K – інтегральний критерій ефективності варіанта (чим більший, тим краще);
w_i – ваговий коефіцієнт i-го критерію, $\sum w_i = 1$;
k_i – нормований показник i-го критерію;
n – кількість критеріїв.

Приклад: вибір варіанта конструкції привідного вузла

Порівняємо три варіанти конструкції привідного вузла шнекового живильника (А, Б, В) за п’ятьма критеріями. Вихідні

значення, напрямок оптимізації та ваги w_i наведено в табл. 3.1; ваги задано експертно й у сумі дають 1,00.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для порівняння варіантів

Критерій	Одиниця	Напрямок	w_i	А	Б	В
Маса m	кг	min	0,20	42	36	48
Запас міцності n	–	max	0,25	2,1	1,7	2,6
Питома енергоємність e	кВт·год/т	min	0,20	4,8	5,4	4,5
Собівартість	тис. грн	min	0,20	38	31	46
Ресурс	год	max	0,15	8000	6000	10000

Нормуємо показники. Для маси, найменше значення 36 кг: $k_А$ = 36/42 = 0,857; $k_Б$ = 36/36 = 1,000; $k_В$ = 36/48 = 0,750. Для запасу міцності, найбільше значення 2,6: $k_А$ = 2,1/2,6 = 0,808; $k_Б$ = 1,7/2,6 = 0,654; $k_В$ = 1,000. для енергоємності $k_А$ = 0,938; $k_Б$ = 0,833; $k_В$ = 1,000; для собівартості 0,816; 1,000; 0,674; для ресурсу 0,800; 0,600; 1,000. Інтегральний критерій за формулою (3.7) для варіанта А: K = 0,20·0,857 + 0,25·0,808 + 0,20·0,938 + 0,20·0,816 + 0,15·0,800 = 0,844; аналогічно K = 0,820 для Б і 0,885 для В.

Найкращим за зведеним показником є варіант В (K = 0,885), хоча він найважчий і найдорожчий: його перевагу забезпечують запас міцності, ресурс і енергоємність. Варіант Б, найдешевший і найлегший, має найнижчий K = 0,820. Різниця між варіантами невелика (близько 4–8 %), тому перед остаточним вибором обов’язково перевіряють **стійкість рішення**: змінюють ваги на ±0,05–0,10 і з’ясовують, чи зберігається перше місце. Також слід переконатися, що кожен варіант задовольняє обмеження (мінімально допустимий запас міцності, бюджет), оскільки високе значення K не компенсує порушення обмеження.

Примітка. *Типова помилка – нормувати показники за єдиною формулою без урахування напрямку оптимізації: тоді більша маса помилково збільшує* К. *Іншою помилкою є вибір ваг «під заздалегідь обраний варіант».*

3.5. Методика вивчення теми «Цифрове проєктування машин і обладнання».

Цілі навчання

– **пояснити** (розуміти) послідовність етапів проєктування та роль цифрових інструментів на кожному з них;
– **класифікувати** (аналізувати) параметри машини на конструктивні й технологічні та обґрунтувати вибір варіанта вузла за інтегральним показником;
– **створити** (створювати) цифровий кейс на основі порівняння двох варіантів конструкції.

Тип і форма заняття; рекомендовані методи

Тема належить до модуля 2 (лекції 2 год, практичні 2 год, самостійна робота 6 год). Доцільні проблемна лекція-візуалізація зі схемою етапів проєктування та практичне заняття-кейс за прикладом вибору привідного вузла з підрозділу 3.4. Метод кейсів поєднують із роботою в парах: перша пара здобувачів добирає ваги критеріїв, друга перевіряє розрахунок.

Таблиця 3.2 – Фрагмент плану вивчення теми

Мета	Види діяльності здобувачів	Цифрові засоби	Форма контролю
Засвоїти етапи проєктування	Складання схеми етапів з прив’язкою інструментів	Miro, Padlet	Експрес-опитування в Kahoot!
Навчитися порівнювати варіанти	Нормування показників, обчислення інтегрального критерію	Excel або Google Sheets	Перевірка листа за чек-листом
Підготувати матеріал	Розроблення цифрового кейсу	LMS Moodle, Google Forms	Рубрика оцінювання кейсу

Диференційовані завдання

1) **Репродуктивний рівень.** Назвіть стадії проєктування за схемою та співвіднесіть із ними інструменти з таблиці підрозділу 3.1; розподіліть наведені параметри на конструктивні й технологічні.
2) **Частково-пошуковий рівень.** За вихідними даними підрозділу 3.4 нормуйте показники, обчисліть інтегральний

критерій і з’ясуйте, чи змінюється вибір варіанта при зміні ваг.

3) **Творчий рівень.** Запропонуйте власну задачу порівняння двох варіантів вузла сільськогосподарської машини, сформулюйте критерії й обґрунтуйте ваги.

Типові труднощі здобувачів і способи їх подолання

– змішування конструктивних і технологічних параметрів – використання картки-класифікатора із прикладами;
– довільний вибір ваг критеріїв – обговорення в групі та обов’язкова перевірка чутливості;
– недооцінювання верифікації вихідних даних – вимога вказувати джерело кожного числа;
– формальне перенесення схеми в таблицю без розуміння зворотних зв’язків – усне пояснення ітерації «вузол – розрахунок – уточнення».

Примітка. *Порада викладачеві: починайте практичне заняття з демонстрації помилкового розрахунку, щоб здобувачі самі сформулювали потребу у верифікації.*

Питання для самоконтролю

1)Назвіть стадії проєктування машини та результат кожної з них.

2)Чому проєктування має ітераційний характер і як цифрові інструменти впливають на вартість ітерацій?

3)Чим відрізняються змінні проєктування, обмеження та критерії? Наведіть приклади для молоткової дробарки.

4)У чому різниця між верифікацією та валідацією розрахункової моделі?

5)Як нормують показники, які бажано збільшувати та зменшувати, і як розраховують інтегральний критерій за методом вагових коефіцієнтів?

4. ЦИФРОВІ ІНСТРУМЕНТИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ

Цифрові інструменти не змінюють суті розрахунків, але скорочують час, зменшують кількість помилок і дають змогу швидко варіювати параметри. У розділі розглянуто електронні таблиці, математичні пакети та калькулятори; результати прикладів перевірено незалежним розрахунком.

4.1. Використання електронних таблиць Microsoft Excel та Google Sheets для інженерних розрахунків

Розрахунковий лист доцільно ділити на чотири зони: **вихідні дані**, **проміжні величини**, **результати** та **перевірки** (умови міцності). Коефіцієнти не слід «зашивати» у формули – кожен має бути окремою коміркою. Відносне посилання `B2` змінюється при копіюванні, абсолютне `$B$2` – ні; комірці можна присвоїти ім’я; тоді формула читається як `=P_kW*9550/n`.

Найчастіше застосовують функції `SQRT`, `PI`, `RADIANS`, `ROUND`, умову `IF`, вибір із довідкової таблиці `INDEX` + `MATCH` або `XLOOKUP`/`VLOOKUP` та `SUMPRODUCT` для сум добутків. **Перевірка даних** (Data Validation) обмежує введення діапазоном або списком, **умовне форматування** підсвічує порушену умову міцності, **«Що-якщо»** («Підбір параметра») знаходить вхідну величину для заданого результату. **Solver** («Пошук рішення») мінімізує цільову комірку (масу, вартість) за обмежень. Google Sheets має ті самі базові функції, підтримує спільну роботу, коментарі та історію змін; слід лише звіряти роздільник аргументів («;» чи «,»).

Приклад: розрахунок прямозубої циліндричної передачі

Задача. За вихідними даними P = 7,5 кВт, n_1 = 960 хв$^{-1}$, u = 4, ККД η = 0,97, z_1 = 20, m = 2,5 мм, b_w = 60 мм, сталь 45 (поліпшення, НВ 260) визначити моменти, розміри передачі та перевірити контактну міцність за залежністю Герца для сталевих прямозубих коліс.

$$T_1 = \frac{P \cdot 10^3}{\omega_1},\ \omega_1 = \frac{\pi n_1}{30},\ T_2 = T_1 u \eta \qquad (4.1)$$

де T_1, T_2 – моменти, Н·м; ω_1 – кутова швидкість, рад/с.

$$F_t = \frac{2T_1 \cdot 10^3}{d_1},\ d_1 = mz_1,\ a_w = \frac{m(z_1+z_2)}{2} \qquad (4.2)$$

де F_t – колова сила, Н; d_1 – діаметр шестірні, мм; a_w – міжосьова відстань, мм.

$$\sigma_H = Z_E Z_H Z_\varepsilon \sqrt{\frac{F_t K_H (u+1)}{b_w d_1 u}} \le [\sigma_H] \qquad (4.3)$$

де Z_E = 190 МПа$^{1/2}$ (сталь – сталь); $Z_H = \sqrt{(2/(\sin\alpha \cdot \cos\alpha))} = 2{,}495$ при $\alpha = 20°$; $Z_\varepsilon = \sqrt{((4 - \varepsilon_\alpha)/3)}$, $\varepsilon_\alpha = 1{,}88 - 3{,}2(1/z_1 + 1/z_2)$; $K_H = 1{,}3$ (приймається за довідником).

$$[\sigma_H] = \frac{2\,HB + 70}{S_H} \qquad (4.4)$$

де HB – твердість за Брінеллем; $S_H = 1{,}1$ – коефіцієнт запасу (за довідником для поліпшеної сталі).

Лист розрахунку подано в табл. 4.1; вихідні дані містяться в B2–B12 (P, n_1, u, η, z_1, m, b_w, K_H, HB, S_H, Z_E).

Таблиця 4.1 – Розрахунковий лист прямозубої передачі в Excel

Комірка	Величина	Формула	Значення
B14	ω_1, рад/с	`=PI()*B3/30`	100,53
B15	T_1, Н·м	`=B2*1000/B14`	74,60
B16	T_2, Н·м	`=B15*B4*B5`	289,5
B17:B19	z_2, d_1, a_w, мм	`=B6*B4; =B7*B6; =B7*(B6+B17)/2`	80; 50; 125
B20	F_t, Н	`=2*B15*1000/B18`	2984
B21	Z_H	`=SQRT(2/(SIN(RADIANS(20))*COS(RADIANS(20))))`	2,495
B22	ε_α	`=1.88-3.2*(1/B6+1/B17)`	1,68
B23	Z_ε	`=SQRT((4-B22)/3)`	0,879
B24	σ_H, МПа	`=B12*B21*B23*SQRT(B20*B9*(B4+1)/(B8*B18*B4))`	529,9
B25	$[\sigma_H]$, МПа	`=(2*B10+70)/B11`	536,4
B26	Перевірка	`=IF(B24<=B25;"Так";"Ні")`	Так

Напруга становить 98,8 % від допустимої (529,9/536,4), тобто запас малий. За рис. 4.1 мінімальна ширина вінця при K_H = 1,3 складає близько 58,6 мм, а при K_H = 1,5 умова міцності з b_w = 60 мм не виконується (σ_H = 569 МПа).

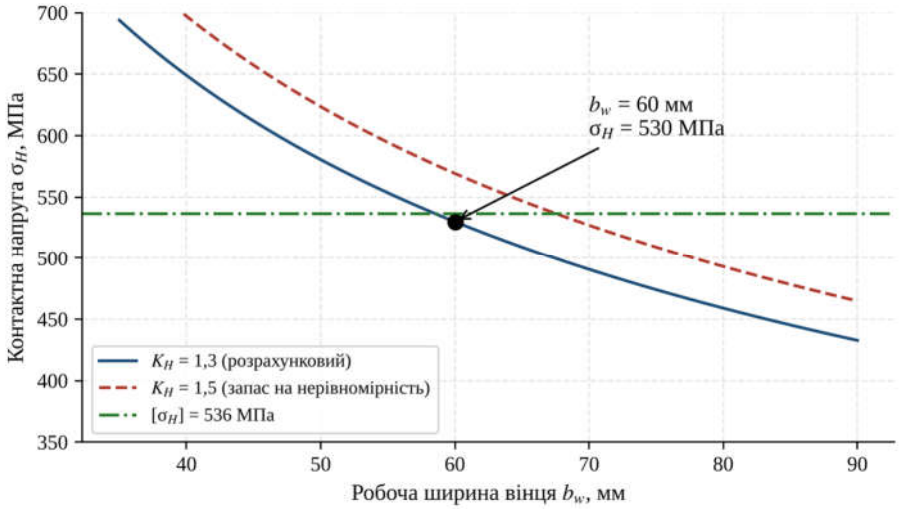


Рис. 4.1. Контактна напруга σ_H залежно від ширини вінця b_w (a_w = 125 мм)

4.2. Застосування математичних пакетів для розрахунку параметрів машин і механізмів

Для систем нелінійних рівнянь, диференціальних рівнянь руху, оптимізації та символьних перетворень застосовують математичні пакети (табл. 4.2). Для навчання та виробничих скриптів раціональний Python: він безкоштовний, код додається до звіту, а розрахунок легко повторити з іншими даними. GeoGebra зручна для перегляду схеми механізму, Wolfram Alpha – для швидкої перевірки рівняння.

Примітка. *Умови ліцензування змінюються; їх слід звіряти на сайті розробника.*

Приклад: кінематика кривошипно-повзунного механізму

Радіус кривошипа r = 60 мм, довжина шатуна l = 240 мм, n = 300 хв$^{-1}$, $\lambda = r/l = 0{,}25$, $\omega = 2\pi n/60 = 31{,}42$ рад/с. Переміщення повзуна від верхньої мертвої точки та його швидкість:

$$s = r(1 - \cos\varphi) + l(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2\varphi}) \qquad (4.5)$$

де s – переміщення повзуна, м; φ – кут повороту кривошипа.

$$v = r\omega\left(\sin\varphi + \frac{\lambda\sin\varphi\cos\varphi}{\sqrt{1-\lambda^2\sin^2\varphi}}\right) \qquad (4.6)$$

де v – швидкість повзуна, м/с.

Лістинг 2.1 – Кінематика кривошипно-повзунного механізму

```
import numpy as np
from scipy.optimize import minimize_scalar, brentq
r, l, n = 0.06, 0.24, 300.0            # м, м, об/хв
lam, w = r / l, 2 * np.pi * n / 60     # lambda, omega
def s(phi):                            # переміщення, м
    return r*(1 - np.cos(phi)) + l*(1 - np.sqrt(1 -
(lam*np.sin(phi))**2))
def v(phi):                            # швидкість, м/с
    root = np.sqrt(1 - (lam*np.sin(phi))**2)
    return r*w*(np.sin(phi) + lam*np.sin(phi)*np.cos(phi)/root)
S = s(np.pi)                           # хід повзуна
opt = minimize_scalar(lambda f: -v(f), bounds=(0.5, 2.0),
method="bounded")
half = brentq(lambda f: s(f) - S/2, 0.1, 3.0)   # s = S/2
print(f"Хід S = {S*1e3:.1f} мм")
print(f"v_max = {v(opt.x):.3f} м/с при phi =
{np.degrees(opt.x):.1f} град")
print(f"s = S/2 при phi = {np.degrees(half):.1f} град")
```

Результат запуску: хід S = 120,0 мм (= 2r); v_{max} = 1,943 м/с при φ = 76,7°; половина ходу – при φ = 82,8°. Контроль: $r\omega$ = 1,885 м/с; максимум перевищує його на 3 % через скінченну довжину шатуна (рис. 4.2).

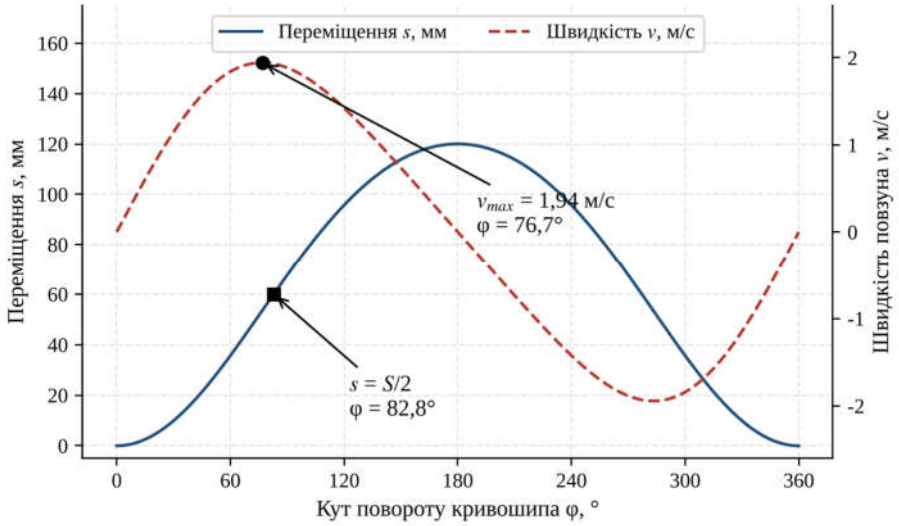


Рис. 4.2. Переміщення та швидкість повзуна (r = 60 мм, l = 240 мм, n = 300 хв$^{-1}$)

4.3. Використання цифрових калькуляторів для розрахунку передач, валів, підшипників та інших деталей машин

Цифровий калькулятор – програма чи веб-сервіс із готовою методикою розрахунку деталі. Розрізняють онлайн-калькулятори, модулі САПР, каталожні калькулятори виробників підшипників і приводів, мобільні застосунки та власні скрипти. Головний ризик – «чорна скринька»: невідомі методика, коефіцієнти й одиниці, тому результат необхідно перевіряти.

Приклад А: вал

Для шестірні з розд. 4.1 (T = 74,60 Н·м, F_t = 2984 Н, $F_r = F_t \cdot \mathrm{tg}\,20° = 1086$ Н) вал на двох опорах, L = 120 мм, шестірня посередині. Попередній діаметр за [τ] = 25 МПа:

$$d \geq \sqrt{3]\frac{16T}{\pi[\tau]}} \tag{4.7}$$

де T – момент, Н·мм; [τ] – допустиме напруження (за довідником), МПа.

$d \geq 24{,}8$ мм; приймаємо d = 30 мм (під підшипник 6206). Реакції R_x = 1492 Н, R_y = 543 Н, R = 1587,8 Н; момент під шестірнею M = 95,27 Н·м. Еквівалентні момент і напруження:

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{M^2 + 0{,}75\,T^2},\ \sigma_{\text{екв}} = \frac{M_{\text{екв}}}{W},\ W = \frac{\pi d^3}{32} \tag{4.8}$$

де W – осьовий момент опору, мм^3.

$M_{\text{екв}} = 115{,}1$ Н·м; $W = 2650{,}7$ мм³; $\sigma_{\text{екв}} = 43{,}4$ МПа ≤ [σ] = 60 МПа (за довідником для сталі 45); за [σ] = 60 МПа мінімальний діаметр 26,9 мм, отже запас є.

Приклад Б: підшипник

Кульковий радіальний підшипник 6206 (C = 19,5 кН за каталогом), F_a = 0, тому X = 1, Y = 0, V = 1; коефіцієнт безпеки $K_б$ = 1,2 (за довідником):

$$P = (XVF_r + YF_a)K_б \tag{4.9}$$

де P – еквівалентне навантаження, Н.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p,\ L_{10h} = \frac{10^6}{60\,n}\left(\frac{C}{P}\right)^p \qquad (4.10)$$

де L_{10} – ресурс, млн обертів (90 % надійності); L_{10h} – ресурс, год; p = 3 для кулькових, 10/3 для роликових підшипників.

$P = 1587{,}8 \cdot 1{,}2 = 1905$ Н; $L_{10} = (19\,500/1905)^3 = 1072$ млн об.; $L_{10h} = 18\,609$ год ≥ 10 000 год. Граничне навантаження для 10 000 год – 2344 Н (рис. 4.3); запас – близько 23 %.

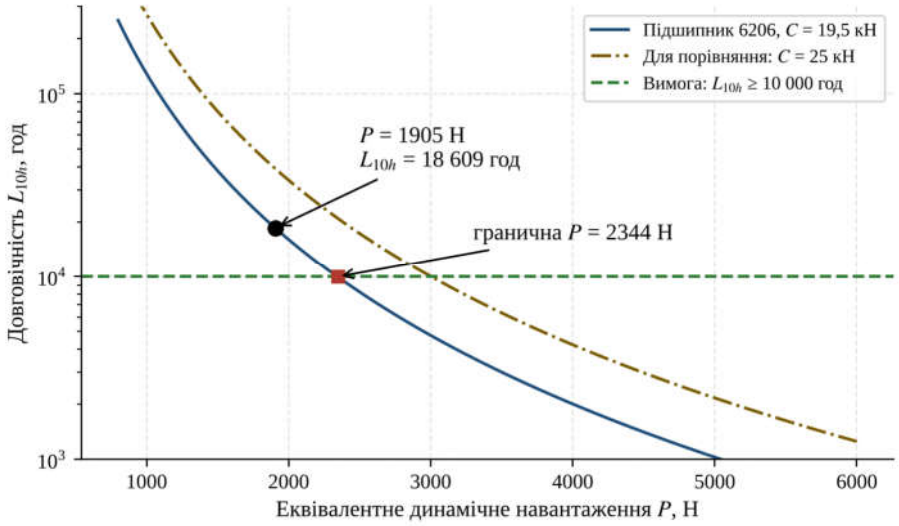


Рис. 4.3. Ресурс підшипника L_{10h} залежно від навантаження P (n = 960 хв$^{-1}$)

Таблиця 4.3 – Вхідні та вихідні дані калькулятора

Блок	Вхідні дані	Результат
Вал	T = 74,60 Н·м; F_t = 2984 Н; F_r = 1086 Н; L = 120 мм	d_{min} = 24,8 мм; $M_{екв}$ = 115,1 Н·м; $\sigma_{екв}$ = 43,4 МПа
Підшипник	6206; C = 19,5 кН; n = 960 хв$^{-1}$; F_r = 1587,8 Н; $K_б$ = 1,2	P = 1905 Н; L_{10h} = 18 609 год

Перевірка результатів калькулятора

Перевірка складається з трьох дій: **оцінка порядку величини** ($M_{екв}$ не може бути меншим за T); **зворотний розрахунок** (за L_{10h} = 18 609 год маємо $(C/P)^3 = 18\,609 \cdot 57\,600/10^6 = 1072$, що збігається з прямим розрахунком); **ручний перерахунок** контрольного прикладу. Типова помилка – одиниці: T у Н·м замість Н·мм змінює діаметр за (4.7) у 10 разів. Алгоритм наведено на рис. 4.4, перелік перевірок – у табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Контрольний перелік перевірки калькулятора

Перевірка	Критерій
Одиниці та методика	Єдина система; збіг із методикою курсу
Порядок величини, зворотна підстановка	Розбіжність не більше 5–10 %
Контрольний приклад з відомою відповіддю	Збіг результату
Фіксація версії та вхідних даних	Розрахунок відтворюється

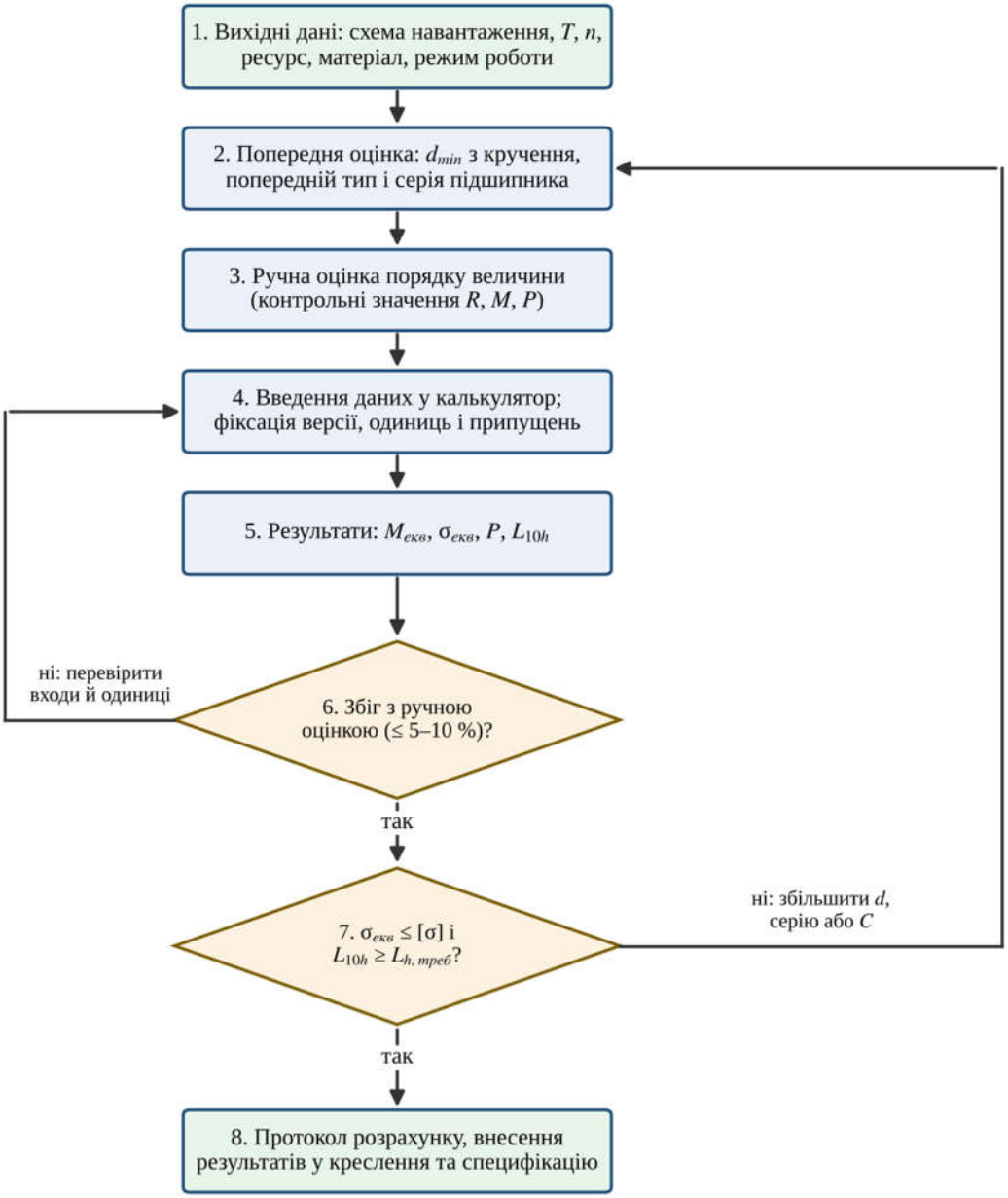


Рис. 4.4. Алгоритм підбору та перевірки деталей за допомогою калькулятора

4.4. Автоматизація інженерних розрахунків за допомогою інструментів штучного інтелекту.

Розрахунковий лист Excel, пакет математичних обчислень і калькулятор виконують те, що задано користувачем: формулу, алгоритм, послідовність дій. Асистенти на основі штучного інтелекту (ШІ) працюють інакше: вони допомагають **сформулювати** метод, **скласти** формули та код, **пояснити** результат і оформити звіт. Тому їх доцільно розглядати як доповнення до інструментів, описаних у підрозділах 4.1–4.3, а не як їх заміну. Нижче наведено правила, за яких таке доповнення підвищує продуктивність і не знижує надійності розрахунку.

Що таке ШІ-асистенти і що вони можуть у розрахунках

Сучасні ШІ-асистенти побудовані на великих мовних моделях (англ. *large language model*, LLM). Модель навчена на великих масивах текстів і програмного коду та генерує відповідь як найімовірніше продовження запиту. Вона не «знає» результату розрахунку в тому сенсі, в якому його знає програма, що виконує арифметику: правильна відповідь отримується тоді, коли метод типовий і добре представлений у даних навчання, або коли асистент має змогу виконати код. До загальновідомих інструментів належать чат-асистенти (ChatGPT, Claude, Gemini, Microsoft Copilot), пошукові асистенти із посиланнями на джерела (на кшталт Perplexity), а також Wolfram|Alpha – обчислювальна система, яка виконує символьні й числові обчислення за заданими правилами і не є мовною моделлю. Функціональність цих сервісів змінюється, тому перед використанням слід ознайомитися з поточними умовами та можливостями кожного.

В інженерних розрахунках ШІ-асистент доцільно залучати для таких завдань:

- пояснення методики розрахунку простими словами та із прикладом;
- складання алгоритму (послідовності кроків) і блок-схеми;
- генерування формул для Excel або Google Sheets та скриптів мовою Python;

– перевірка розмірностей і пошук помилок у таблиці чи коді;
– аналіз результатів, зокрема порівняння з очікуваним порядком величини;
– підготовка тексту пояснювальної записки, таблиць і підписів до рисунків;
– підказка орієнтовних довідкових величин – лише з обов'язковою перевіркою за джерелом.

Примітка. *Складено автором на основі практики використання ШІ-асистентів у навчальних розрахунках.*

Обмеження і ризики

Головна особливість мовних моделей полягає в тому, що відповідь, оформлена впевнено й грамотно, може бути хибною. Слід враховувати такі ризики.

– **«Галюцинації»** – вигадані формули, коефіцієнти, назви стандартів, пункти нормативних документів і посилання на джерела, які не існують.
– **Арифметичні й розмірнісні помилки.** Без виконання коду модель «оцінює» результат, а не обчислює його; типові помилки – змішування Н і кН, мм і м, кВт і Вт.
– **Застарілі або неточні дані.** Модель може посилатися на редакції стандартів, що втратили чинність, або на коефіцієнти з іншої методики.
– **Відсутність відповідальності.** Відповідальність за прийняте рішення завжди несе інженер, а не інструмент.
– **Конфіденційність.** Креслення, технічні умови, комерційні й персональні дані не слід передавати в публічні сервіси без дозволу власника.
– **Академічна доброчесність.** Використання ШІ слід зазначати у роботі (інструмент, мета, дата, фрагмент запиту); видавати відповідь асистента за власний результат неприпустимо.

Узагальнений принцип роботи формулюється так: **«ШІ пропонує – інженер перевіряє»**. Жоден числовий результат, одержаний за

допомогою ШІ, не може потрапити до розрахунку чи звіту без перевірки.

Структура ефективного запиту

Якість відповіді значною мірою залежить від якості запиту. Ефективний запит містить шість елементів, послідовність яких показано на рис. 4.5.

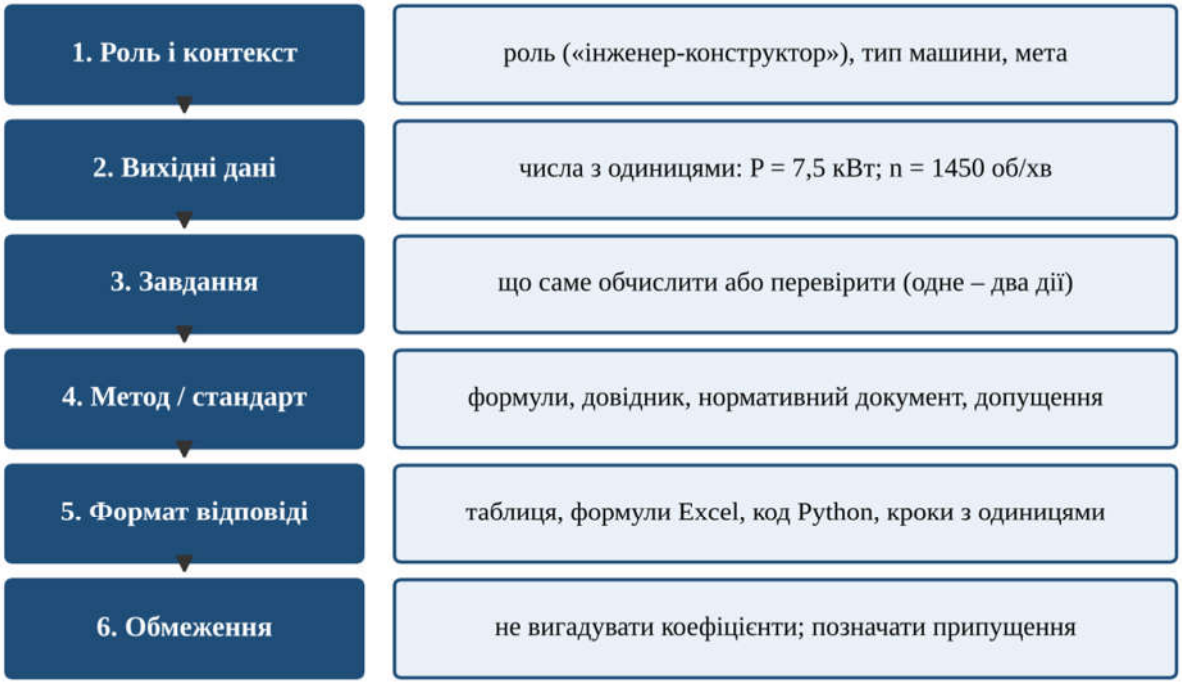


Рис. 4.5. Структура ефективного запиту до ШІ-асистента

Розглянемо різницю на прикладі. Нечіткий запит: «Порахуй вал для двигуна 7,5 кВт». У ньому немає частоти обертання, матеріалу, схеми навантаження, методу і формату відповіді, тому асистент змушений домислювати. Запит із повною структурою наведено нижче.

> **Запит із повною структурою**
> Роль: ти – інженер-конструктор приводів сільськогосподарських машин.
> Дані: потужність на валу P = 7,5 кВт; частота обертання n = 1450 об/хв; відстань між опорами L = 400 мм; сила в зубчастому зачепленні F = 3000 Н на відстані a = 150 мм від лівої опори; допустиме напруження [σ] = 60 МПа (припущення).
> Завдання: визнач крутний момент, реакції опор, максимальний згинальний момент і мінімальний діаметр вала.
> Метод: еквівалентний момент за гіпотезою енергії формозмін; діаметр округлити до значення з нормального ряду.
> Формат: таблиця «величина – формула – підстановка – результат – одиниці».

> Обмеження: не вигадуй коефіцієнтів; усі припущення виписуй окремо; якщо даних бракує – спершу постав запитання.

Приклади запитів та ілюстративних відповідей

Приклад 1. Формули Excel для розрахунку передачі. Здобувач задає дані для комірок і просить асистента записати формули з коментарями.

> **Запит**
> У комірках: B2 – потужність P, кВт; B3 – частота обертання n1, об/хв; B4 – передатне число u; B5 – ККД передачі. Запиши формули для: крутного моменту T1 (Н·м), частоти n2, моменту T2 на веденому валу. Використовуй абсолютні посилання, коментар до кожної формули.

> **Ілюстративний фрагмент відповіді; значення необхідно перевірити**
> B6 (T1): =9550*B2/B3*
> B7 (n2): =B3/B4
> B8 (T2): =9550*B2*B5/B7
> Для P = 7,5; n1 = 1450; u = 4; ККД = 0,96 отримуємо T1 ≈ 49,4 Н·м; n2 = 362,5 об/хв; T2 ≈ 189,7 Н·м.

Формули перевіряються безпосередньо в таблиці: достатньо ввести ці дані і порівняти результат із ручним розрахунком. Слід також звернути увагу на роздільник аргументів, прийнятий у локалізованій версії програми (кома або крапка з комою).

Приклад 2. Python-скрипт для підбору діаметра вала. Асистенту доручено написати код за даними запиту, наведеного вище. Нижче подано скрипт, який було реально виконано здобувачем (автором) для перевірки.

> **Ілюстративний фрагмент відповіді; значення необхідно перевірити**

```
import math
P, n = 7.5, 1450              # кВт, об/хв
F, L, a = 3000.0, 0.40, 0.15  # Н, м, м
sigma = 60.0                  # МПа (припущення)
T  = 9550*P/n                 # Н·м
Ra = F*(L-a)/L; Rb = F*a/L    # Н
M  = Ra*a                     # Н·м під силою
Me = math.sqrt(M**2 + 0.75*T**2) # Н·м
d  = (32*Me*1e3/(math.pi*sigma))**(1/3)  # мм
print(T, Ra, Rb, M, Me, d)
```

Результат виконання: $T = 49{,}4$ Н·м; $R_A = 1875$ Н; $R_B = 1125$ Н; $M_{max} = 281{,}25$ Н·м; $M_{екв} = 284{,}5$ Н·м; $d = 36{,}4$ мм, тобто за нормальним рядом приймається $d = 38$ мм. Епюри будуються додаванням до скрипта кількох рядків бібліотеки Matplotlib. Результат збігається з ручним розрахунком, що підтверджує правильність коду.

Приклад 3. Інтерпретація результатів МСЕ. Асистент не бачить моделі, тому гіпотези він формулює лише за описом, який надає інженер.

> **Запит**
> Вал діаметром 38 мм зі ступінчастою галтеллю. Розрахунок за формулами опору матеріалів дає номінальне напруження 142 МПа, а за МСЕ максимальне еквівалентне напруження в галтелі – 305 МПа. Закріплення – по торцях, сила прикладена в точці. Назви можливі причини розбіжності та скажи, як кожну перевірити.

> **Ілюстративний фрагмент відповіді; значення необхідно перевірити**
> 1) Концентрація напружень у галтелі: відношення 305/142 ≈ 2,1 відповідає порядку теоретичного коефіцієнта концентрації; звірте з довідником для відношення r/d.
> 2) Сингулярність у точці прикладання сили: замініть її розподіленим навантаженням.
> 3) Залежність від сітки: згущуйте сітку й стежте за збіжністю результату.
> 4) Узгодженість одиниць (мм, Н, МПа) та умов закріплення.

Порада асистента корисна як **перелік гіпотез**, але висновок робиться лише після змін у моделі та повторного розрахунку.

Приклад 4. Порівняння двох варіантів за критеріями.

> **Запит**
> Порівняй ланцюгову й клинопасову передачі для приводу транспортера (P = 7,5 кВт, u = 4) за критеріями: вартість, довговічність, шум, обслуговування, захист від перевантаження. Подай таблицею, окремо вкажи припущення. Ваги критеріїв я задам сам.

Відповідь у вигляді таблиці є початковою оцінкою. Ваги критеріїв і бали встановлює інженер, а числові показники (довговічність, вартість) беруться з каталогів виробників.

Методика верифікації результатів ШІ

Перевірка результатів виконується за чек-листом, наведеним у табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Чек-лист верифікації відповіді ШІ

№	Перевірка	Як виконати
1	Розмірності	Підставити одиниці у кожну формулу та звести до основних (Н, мм, МПа)
2	Порядок величини	Оцінити результат «на око» й порівняти з аналогами
3	Граничні випадки	Підставити $n \to \infty$ або $P = 0$; результат має бути логічним
4	Незалежний розрахунок	Повторити в Excel, на калькуляторі чи вручну
5	Довідник або стандарт	Звірити коефіцієнти й методику з джерелом
6	Повторний запит	Сформулювати інакше та порівняти відповіді
7	Запуск коду	Виконати скрипт і порівняти з відомим прикладом

Кількісною мірою розбіжності між відповіддю ШІ та контрольним значенням є відносна похибка:

$$\delta = \frac{|X_{\text{ШІ}} - X_{\text{ет}}|}{X_{\text{ет}}} \cdot 100\% \qquad (4.11)$$

де $X_{\text{ШІ}}$ – значення, подане асистентом;
$X_{\text{ет}}$ – еталонне значення (ручний розрахунок, довідник);
δ – відносна похибка, %.

Для типових інженерних розрахунків похибка не повинна перевищувати кількох відсотків, а розбіжність у десятки відсотків і більше вказує на помилку в методі, даних або одиницях.

Цикл роботи. Перевірка вбудована в загальний цикл роботи з асистентом (рис. 4.6): за розбіжності запит уточнюється, а прийнятий результат фіксується у журналі.



Рис. 4.6. Цикл «запит – відповідь – перевірка – уточнення – фіксація»

Приклад: ШІ помиляється

Нехай потрібно визначити крутний момент на валу двигуна потужністю P = 7,5 кВт при n = 1450 об/хв, а потім мінімальний діаметр вала з розрахунку на кручення при $[\tau]$ = 25 МПа. Крутний момент визначається за формулою:

$$T = \frac{9550 \cdot P}{n} \tag{4.12}$$

де T – крутний момент, Н·м;
P – потужність, кВт;
n – частота обертання, об/хв;
9550 – коефіцієнт переведення одиниць, що відповідає P у кВт.

Діаметр вала з розрахунку на кручення:

$$d = \sqrt{3]\frac{16T}{\pi[\tau]}} \tag{4.13}$$

де d – діаметр вала, мм;
T – крутний момент, Н·мм;
$[\tau]$ – допустиме дотичне напруження, МПа (Н/мм^2).

Припустимо, ШІ-асистент подав відповідь: «T = 9550 · 7500 / 1450 ≈ 49 397 Н·м; діаметр вала d ≈ 2,16 мм». Відповідь оформлена впевнено, але чек-лист виявляє дві помилки.

1) **Розмірності.** Коефіцієнт 9550 передбачає потужність у кВт, а асистент підставив 7500 Вт. Правильно: $T = 9550 \cdot 7{,}5 / 1450 = 49{,}4$ Н·м. Різниця – рівно у 1000 разів.
2) **Порядок величини.** Момент майже 50 кН·м для двигуна 7,5 кВт нереалістичний; діаметр 2,16 мм для вала приводу – теж.
3) **Незалежний розрахунок.** Для формули (4.13) момент слід підставити в Н·мм: $T = 49\,397$ Н·мм. Тоді $d = \sqrt[3]{(16 \cdot 49\,397 / (\pi \cdot 25))} = 21{,}6$ мм; асистент підставив T в Н·м і отримав значення, менше правильного у 10 разів ($\sqrt[3]{1000} = 10$).
4) **Підсумок.** Для оцінки за формулою (4.11) похибка моменту становить $\delta = |49\,397 - 49{,}4| / 49{,}4 \cdot 100\ \% \approx 99\,900\ \%$, а діаметра – $\delta = |2{,}16 - 21{,}6| / 21{,}6 \cdot 100\ \% = 90\ \%$. Після виправлення вал уточнюється до стандартного значення $d = 22$ мм.

Примітка. *Еталонні значення обчислено в Python за формулами (4.12) і (4.13).*

Урок прикладу: помилка в одиницях є «спокусливою», тому що структура формули – правильна. Лише перевірка розмірностей і порядку величини, виконана до використання результату, дозволяє її виявити.

Рекомендації щодо організації роботи

– **Журнал запитів.** Для кожного розрахунку фіксуйте дату, назву інструмента, текст запиту, ключові фрагменти відповіді та результат перевірки.
– **Відтворюваність.** Збережіть код, вхідні дані та версії бібліотек; повторний запуск має давати той самий результат.
– **Джерела.** Усі коефіцієнти й положення методики супроводжуйте посиланнями на підручник, довідник чи стандарт, а не на «відповідь ШІ».
– **Захист даних.** Передавайте асистенту лише знеособлені й неконфіденційні дані; за потреби замінюйте реальні розміри умовними.

– **Поєднання з іншими інструментами.** ШІ складає формули й код, а обчислення виконують Excel чи Python; геометрію й міцність підтверджують CAD і МСЕ.
– **Прозорість.** У пояснювальній записці вказуйте, для чого використовувалося ШІ, і те, що результати перевірено особисто.

4.5. Методика вивчення теми «Цифрові інструменти розрахунку».

Цілі навчання

– **побудувати** (створювати) розрахунковий лист Excel або Google Sheets для передачі з перевіркою вхідних даних;
– **порівняти** (аналізувати) результати таблиці, математичного пакета й калькулятора та пояснити розбіжності;
– **оцінити** (оцінювати) відповідь ШІ-асистента за чек-листом верифікації.

Тип і форма заняття; рекомендовані методи

Тема – модуль 3 (лекції 4 год, практичні 8 год, самостійна робота 12 год). Провідні методи: демонстрація з покроковим виконанням (етап «я роблю»), лабораторно-практична робота в парах («ми робимо»), індивідуальне завдання («ти робиш»). Розділ 4.4 доцільно вивчати методом «запит – відповідь – перевірка»: здобувач не приймає результат ШІ без перевірки, що формує рефлексивно-етичний складник компетентності.

Таблиця 4.8 – Фрагмент плану вивчення теми

Мета	Види діяльності здобувачів	Цифрові засоби	Форма контролю
Розрахунок передачі в таблиці	Введення формул, перевірка одиниць, побудова графіка $\sigma_H(b_w)$	Excel, Google Sheets	Огляд листа викладачем
Кінематика механізму	Розрахунок переміщення й швидкості повзуна	Python (Google Colab), математичний пакет	Звіт із графіком

Розрахунок вала й підшипника	Введення даних, порівняння з ручним розрахунком	Цифрові калькулятори	Контрольний перелік перевірки
Робота з ШІ	Складання запиту, пошук помилки у відповіді	ШІ-асистент	Заповнений чек-лист верифікації

Диференційовані завдання

1) **Репродуктивний рівень.** Відтворіть розрахунковий лист прямозубої передачі за описом підрозділу 4.1 та отримайте таблицю залежності σ_H від b_w.
2) **Частково-пошуковий рівень.** Розрахуйте ресурс підшипника в калькуляторі та вручну; поясніть причини розбіжності. Отримайте від ШІ розрахунок вала й знайдіть помилку за чек-листом.
3) **Творчий рівень.** Розробіть шаблон листа Excel із захистом комірок формул і підказками, які пояснюють кожен крок.

Типові труднощі здобувачів і способи їх подолання

– змішування одиниць (мм, м, Н·мм) – окремий стовпець одиниць і перевірка розмірності;
– абсолютні й відносні посилання у формулах – тренувальна вправа з копіюванням формул;
– довіра до результату калькулятора – обов’язкова оцінка порядку величини вручну;
– некритичне прийняття відповіді ШІ – вимога вказати формулу й повторити розрахунок незалежно.

Комплексне інженерне завдання

Розробляється практична робота «Розрахунок передачі в електронній таблиці»: вихідні дані, покроковий опис, контрольні значення для самоперевірки та тест у LMS Moodle. Окремо слід передбачити правила використання ШІ під час виконання роботи й спосіб підтвердження самостійності.

Примітка. *Порада викладачеві: заздалегідь підготуйте навмисно помилкову відповідь ШІ та розгляньте її на занятті разом зі здобувачами.*

Питання для самоконтролю

1) Які переваги й обмеження мають електронні таблиці (Excel, Google Sheets) порівняно з пакетами математичних обчислень і калькуляторами?
2) У яких випадках для інженерних розрахунків доцільно використовувати символьні та числові математичні пакети?
3) Чим принципово відрізняється розрахунок у Wolfram|Alpha чи Excel від відповіді мовної моделі?
4) Назвіть шість елементів ефективного запиту до ШІ-асистента та наведіть приклад вихідних даних з одиницями.
5) Опишіть порядок перевірки відповіді ШІ та поясніть, як розрахувати відносну похибку й чому не можна використовувати результат без перевірки.

5. ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ

5.1. Використання CAD-систем для створення тривимірних моделей машин і обладнання

Системи автоматизованого проєктування (CAD) є базовим інструментом сучасного інженера-конструктора. Тривимірна модель стає єдиним джерелом геометричної інформації: з неї отримують креслення, масо-інерційні характеристики, вихідні дані для розрахунку методом скінченних елементів (МСЕ), керуючі програми для верстатів з ЧПК та файли для адитивного виробництва. Для аграрної та машинобудівної галузі це особливо важливо, оскільки складальні одиниці (редуктори, ходові системи, робочі органи) складаються з десятків і сотень деталей, взаємне положення яких необхідно перевіряти ще до виготовлення.

За способом опису форми розрізняють **каркасне**, **поверхневе** та **твердотільне** моделювання. Каркасна модель містить лише ребра й для інженерних задач майже не використовується. Поверхневе моделювання описує тільки оболонку виробу та застосовується для складних обводів (кожухи, лопаті, відвали плугів). Твердотільне моделювання описує замкнений об’єм, тому дає змогу автоматично обчислювати масу, положення центра мас і моменти інерції; для валів, зубчастих коліс, корпусів і рам основним є саме воно.

Побудова твердотільної деталі виконується за єдиною логікою: **ескіз** на площині → **операція** над ескізом (витягування, обертання, вирізання, зсув уздовж траєкторії) → **додаткові елементи** (фаски, галтелі, отвори, масиви). Ескіз складається з геометричних примітивів, до яких застосовують **обмеження** (збіг, паралельність, перпендикулярність, горизонтальність, дотик, симетрія) та **розміри**. Добре сформований ескіз є повністю визначеним: його елементи не можуть довільно зміщуватися. Послідовність операцій фіксується в **дереві побудови**, яке дозволяє повернутися до будь-якого кроку та змінити його параметри.

Для передавання моделей між системами використовують нейтральні формати: STEP (точна твердотільна геометрія та

структура збірки) – для обміну між CAD та імпорту в CAE-системи; STL (сітка трикутників) – для 3D-друку; DXF/DWG (двовимірні контури) – для лазерного різання. Після імпорту слід перевірити одиниці виміру та збіг габаритів. Після призначення матеріалу система автоматично розраховує масу, положення центра мас і моменти інерції; для сталі зазвичай приймають густину 7850 кг/м^3.

Алгоритм створення тривимірної моделі ступінчастого вала

Нижче наведено узагальнену послідовність, придатну для FreeCAD, Onshape та більшості параметричних систем; назви команд у різних програмах відрізняються, тому їх слід шукати в довідці конкретної системи. Результат побудови показано на рис. 5.1.

1) Створіть нову деталь, задайте систему одиниць (мм) та призначте матеріал (сталь).
2) Оберіть площину, що проходить через вісь вала, і створіть ескіз його осьового півперерізу: ламана лінія контуру ступенів з опорою на вісь.
3) Задайте розміри ступенів (діаметри d_i та довжини l_i) і перевірте, що ескіз повністю визначений.
4) Виконайте операцію обертання ескіза навколо осі на 360° – утвориться твердотільна заготовка вала.
5) Додайте фаски на торцях і галтелі в місцях переходу між ступенями (радіус $r \approx 0{,}07d_1$).
6) Створіть ескіз на дотичній площині та вирізанням сформуйте шпонковий паз потрібної довжини, ширини та глибини.
7) Перегляньте масо-інерційні характеристики та порівняйте масу з очікуваною (для вала на рис. 5.1 – близько 1,16 кг без урахування паза й фасок).
8) Збережіть файл у власному форматі та експортуйте копію у форматі STEP для передавання на розрахунок і виготовлення.

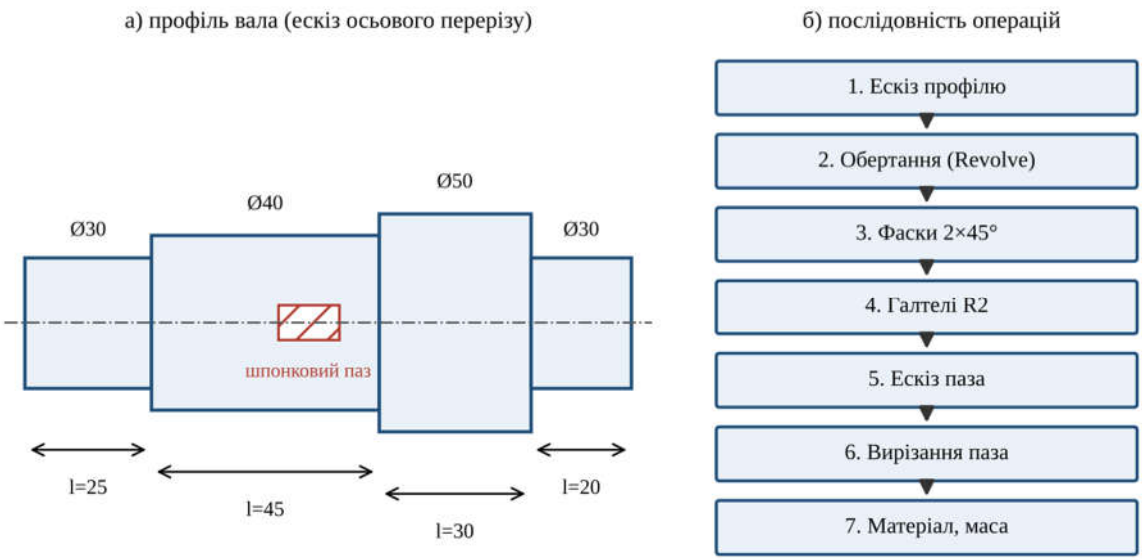


Рис. 5.1. Ступінчастий вал: профіль ескіза та послідовність операцій побудови моделі

5.2. Основи параметричного моделювання деталей та складальних одиниць

Параметричне моделювання – це підхід, за якого геометрія моделі керується набором розмірів, змінних і залежностей між ними. Зміна одного параметра (наприклад, діаметра) автоматично перебудовує всю модель за закладеною логікою. Це забезпечує швидке створення типорозмірних рядів, варіантний розрахунок і оптимізацію, а також зменшує кількість помилок при внесенні змін.

Ключове поняття – **задум проєктування** (design intent): сукупність правил, які визначають, як модель має реагувати на зміни. Наприклад, якщо отвір має бути завжди посередині пластини, його положення слід задавати обмеженням симетрії або формулою, а не числом від краю. Модель, створена без чіткого задуму, при зміні розмірів «розвалюється».

Розглянемо параметризацію ступінчастого вала. Базовим параметром є діаметр посадкової ділянки d_1; решту розмірів виражають через нього та через висоту буртика t (рис. 5.1). Діаметри наступних ступенів:

$$d_2 = d_1 + 2t, \qquad d_3 = d_2 + 2t \tag{5.1}$$

де d_1 – діаметр першого ступеня (під підшипник), мм;
d_2, d_3 – діаметри наступних ступенів, мм;

t – висота буртика, мм.

Для d_1 = 30 мм і t = 5 мм отримуємо d_2 = 40 мм, d_3 = 50 мм; довжини ступенів задають коефіцієнтами від d_1, а радіус галтелі $r \approx 0{,}07d_1$ = 2 мм. Зміна єдиного значення d_1 (наприклад, до 35 мм) миттєво перебудовує всю модель.

Залежності у складальних одиницях

Складання формується з деталей, положення яких задають **зв'язками складання** (збіг осей, збіг або паралельність площин, дотик поверхонь, задана відстань чи кут). Для кожної деталі слід залишати рівно ту кількість ступенів свободи, яка відповідає її функції: вал у підшипниках має зберігати обертання навколо осі. Першу деталь зазвичай фіксують, а решту прив'язують до неї; надмірні та суперечливі зв'язки призводять до помилок перебудови.

5.3. Аналіз міцності та деформацій конструктивних елементів

Розрахунок міцності відповідає на питання: чи витримає елемент конструкції задане навантаження без руйнування й недопустимих деформацій. Основними величинами є **напруження** (внутрішня сила на одиницю площі, МПа) і **деформація** (відносна зміна розмірів, безрозмірна). У межах пружності вони пов'язані законом Гука, а загальна оцінка міцності при складному напруженому стані виконується за еквівалентним напруженням.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \qquad \tau = G \cdot \gamma \tag{5.2}$$

де σ, τ – нормальне та дотичне напруження, МПа;
ε, γ – лінійна та кутова деформації;
E, G – модулі пружності першого та другого роду, МПа (для сталі $E \approx 2{,}1 \cdot 10^5$ МПа, $G \approx 0{,}8 \cdot 10^5$ МПа).

Для плоского напруженого стану з нормальним напруженням σ та дотичним τ (характерним для вала, що одночасно згинається й скручується) еквівалентне напруження за енергетичною теорією (von Mises) і коефіцієнт запасу за межею текучості становлять:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \tag{5.3}$$

де $\sigma_{\text{екв}}$ – еквівалентне напруження за von Mises, МПа.

$$n = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\text{екв}}} \geq [n] \tag{5.4}$$

де n – розрахунковий коефіцієнт запасу;
σ_T – межа текучості матеріалу, МПа;
$[n]$ – допустимий коефіцієнт запасу (зазвичай 1,3…2,5 залежно від відповідальності та точності розрахунку).

Згин і кручення

При чистому та поперечному згині нормальні напруження в небезпечному перерізі, а для круглого перерізу – його осьовий момент опору та момент інерції, визначаються за формулами:

$$\sigma = \frac{M}{W}, \qquad W = \frac{\pi d^3}{32}, \qquad I = \frac{\pi d^4}{64} \tag{5.5}$$

де M – згинальний момент у перерізі, Н·мм;
W – осьовий момент опору перерізу, мм^3;
I – осьовий момент інерції перерізу, мм^4;
d – діаметр вала, мм.

Прогин балки залежить від схеми навантаження. Для консолі довжиною L із силою F на вільному кінці та для двоопорної балки з силою F посередині максимальні прогини відповідно дорівнюють:

$$f_{\text{кон}} = \frac{FL^3}{3EI}, \qquad f_{2\text{оп}} = \frac{FL^3}{48EI} \tag{5.6}$$

де $f_{\text{кон}}$, $f_{2\text{оп}}$ – найбільші прогини консолі та двоопорної балки, мм;
F – сила, Н;
L – довжина (проліт), мм;
$E\,I$ – жорсткість перерізу на згин, Н·мм^2.

Під час кручення вала крутним моментом T дотичні напруження та кут закручування на довжині L:

$$\tau = \frac{T}{W_p}, \quad W_p = \frac{\pi d^3}{16}, \qquad \varphi = \frac{TL}{GI_p}, \quad I_p = \frac{\pi d^4}{32} \tag{5.7}$$

де W_p – полярний момент опору, мм^3;
I_p – полярний момент інерції, мм^4;
φ – кут закручування, рад.

Числовий приклад: двоопорний вал

Умова. Гладкий вал діаметром $d = 40$ мм, сталь із $\sigma_T = 540$ МПа, $E = 2{,}1 \cdot 10^5$ МПа, $G = 0{,}8 \cdot 10^5$ МПа. Відстань між опорами $L = 600$ мм. Зосереджена сила $F = 4$ кН прикладена на відстані $a = 200$ мм від лівої опори ($b = 400$ мм). Вал передає крутний момент $T = 300$ Н·м. Розрахункова схема та епюри наведені на рис. 5.2.

$$R_A = \frac{Fb}{L}, \qquad R_B = \frac{Fa}{L}, \qquad M_{max} = R_A \cdot a = \frac{Fab}{L} \tag{5.8}$$

де R_A, R_B – реакції опор, Н;

a, b – відстані від сили до лівої та правої опор, мм;

$M_{\max}$ – максимальний згинальний момент (під силою), Н·мм.

Розв’язання. Реакції: $R_A = 4000 \cdot 400/600 = 2666{,}7$ Н; $R_B = 4000 \cdot 200/600 = 1333{,}3$ Н (перевірка: $R_A + R_B = 4000$ Н). Максимальний момент $M_{\max} = 2666{,}7 \cdot 200 = 533\,333$ Н·мм $\approx 533{,}3$ Н·м. Геометрія перерізу: $W = \pi \cdot 40^3/32 = 6283$ мм^3; $I = \pi \cdot 40^4/64 = 125\,664$ мм^4; $W_p = 12\,566$ мм^3.

Напруження згину $\sigma = 533\,333/6283 = 84{,}9$ МПа; дотичні напруження від кручення $\tau = 300\,000/12\,566 = 23{,}9$ МПа. Еквівалентне напруження за формулою (5.3): $\sigma_{екв} = \sqrt{(84{,}9^2 + 3 \cdot 23{,}9^2)} = 94{,}4$ МПа. Коефіцієнт запасу за формулою (5.4): $n = 540/94{,}4 = 5{,}72$.

$$f_C = \frac{Fa^2b^2}{3EIL} \tag{5.9}$$

де f_C – прогин під силою, мм.

Прогин під силою $f_C = 4000 \cdot 200^2 \cdot 400^2/(3 \cdot 2{,}1 \cdot 10^5 \cdot 125\,664 \cdot 600) = 0{,}539$ мм, тобто $L/1113$, що не перевищує типового допустимого значення $L/1000 = 0{,}6$ мм. Кут закручування за формулою (5.7): $\varphi = 300\,000 \cdot 600/(0{,}8 \cdot 10^5 \cdot 251\,327) = 0{,}00895$ рад $\approx 0{,}51°$. Якщо в небезпечному перерізі є галтель із $K_t = 1{,}8$ (за довідником), то $\sigma_{\max} = 1{,}8 \cdot 84{,}9 = 152{,}8$ МПа, що відповідає запасу близько 3,5 за нормальними напруженнями.

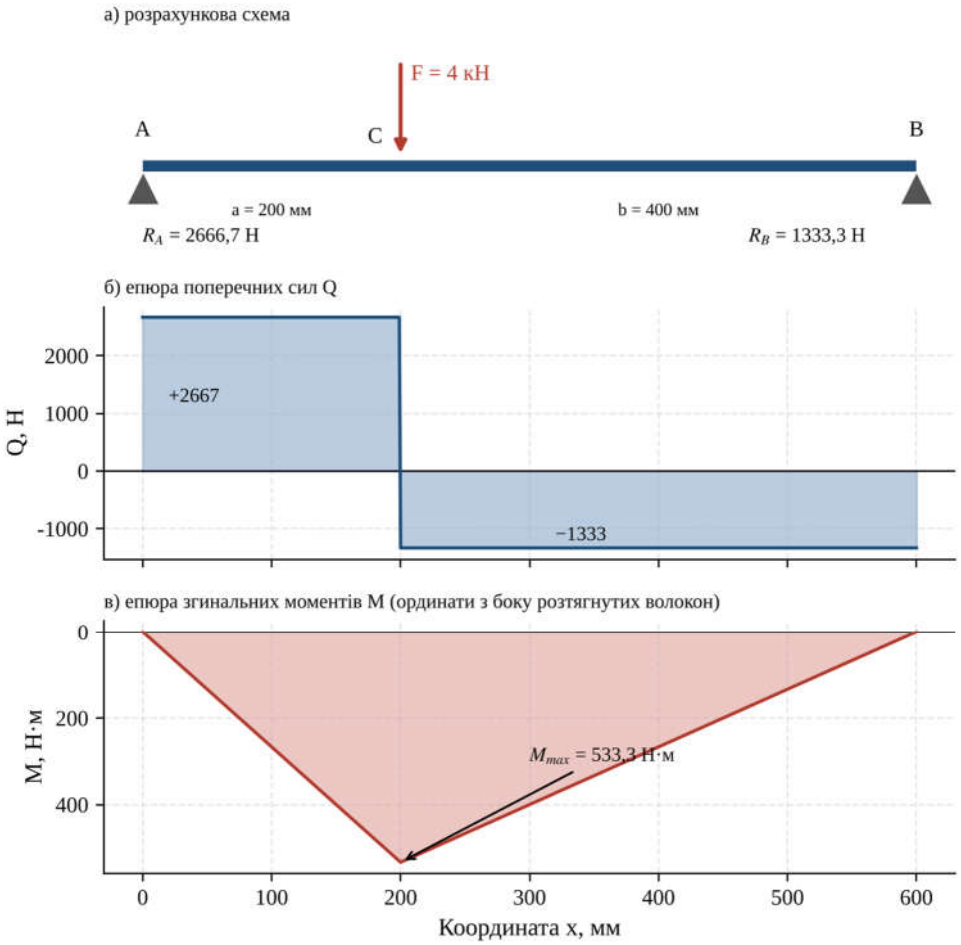


Рис. 5.2. Двоопорний вал: розрахункова схема та епюри поперечних сил Q і згинальних моментів M

Примітка. *Ручний розрахунок слугує* ***еталоном*** *для верифікації МСЕ: якщо результати скінченно-елементної моделі простої балки відрізняються від аналітичних більш ніж на кілька відсотків, слід шукати помилку в закріпленнях, навантаженні або одиницях виміру, а не довіряти програмі.*

5.4. Використання CAE-систем для інженерного аналізу конструкцій

Системи комп’ютерного інженерного аналізу (CAE) дозволяють розраховувати міцність, жорсткість, коливання та теплові режими деталей складної форми, для яких аналітичні формули недоступні. Основним методом є **метод скінченних елементів**: конструкцію розбивають на скінченну кількість простих елементів (трикутники, чотирикутники, тетраедри, гексаедри),

з’єднаних у **вузлах**. Невідомими є переміщення вузлів, а всередині елемента переміщення апроксимуються функціями форми.

Для кожного елемента складають матрицю жорсткості, а зі згодою вузлів – глобальну систему лінійних рівнянь:

$$[K] \cdot \{u\} = \{F\}, \qquad k = \frac{EA}{l} \tag{5.10}$$

де $[K]$ – глобальна матриця жорсткості системи;
$\{u\}$ – вектор вузлових переміщень;
$\{F\}$ – вектор вузлових сил;
k – жорсткість найпростішого стрижневого елемента (площа перерізу A, довжина l), Н/мм.

Після врахування закріплень система розв’язується відносно $\{u\}$, а далі за переміщеннями обчислюють деформації, напруження та реакції зв’язків. Точність залежить від типу й розміру елементів: чим дрібніша сітка, тим точніше результат, але тим більший обсяг обчислень.

Граничні умови, матеріал і сітка

Сітка має бути достатньо густою в зонах концентрації напружень (галтелі, отвори) і може бути крупнішою в малонавантажених областях. Надійність результату перевіряють **дослідженням збіжності за сіткою**: розрахунок повторюють на кількох сітках зі збільшенням кількості елементів доти, доки зміна контрольної величини не стане меншою за обраний поріг (зазвичай 2…5 %). Інтегральні величини (прогин) збігаються швидше, ніж місцеве напруження біля галтелі.

Алгоритм CAE-аналізу та типові помилки

Типовими помилками є: **сингулярності** (необмежене зростання напружень біля гострих внутрішніх кутів, точкових сил і закріплень – з подрібненням сітки вони не збігаються й не мають фізичного змісту); **надмірно жорстке закріплення**; **неправильні одиниці**; надто крупна сітка; розрахунок без перевірки реакцій.

Типи аналізу

Залежно від задачі виконують **статичний** аналіз (переміщення та напруження від постійних навантажень), **модальний** (власні

частоти – для уникнення резонансу), **втомний**, **тепловий** та **нелінійний** (пластичність, контакт). З лінійного статичного аналізу зазвичай починають. Серед інструментів є хмарні (SimScale), відкриті (верстак FEM у FreeCAD) та комерційні (Ansys, Abaqus, модулі в CAD-системах).

5.5. Візуалізація та інтерпретація результатів цифрового моделювання

Постпроцесор подає результати у вигляді **полів** (напружень, переміщень, коефіцієнта запасу) на деформованій або недеформованій моделі з кольоровою шкалою. Для порівняння варіантів слід використовувати однакову шкалу з верхньою межею, прив'язаною до $[\sigma]$ або σ_T; масштабний множник деформацій указують на рисунку; кількісну оцінку виконують за зондами в характерних точках і епюрами вздовж шляху. Зміна діапазону шкали може як приховати небезпечну зону, так і створити хибне враження про перевантаження.

Оцінювання похибки та валідація

Верифікація відповідає на питання «чи правильно розв'язано рівняння» (порівняння з аналітичним рішенням, дослідження збіжності), **валідація** – «чи правильну модель обрано» (порівняння з експериментом, наприклад, тензометруванням). Відносна похибка та критерій узгодженості:

$$\delta = \frac{|X_{\text{МСЕ}} - X_{\text{ет}}|}{|X_{\text{ет}}|} \cdot 100\% \qquad (5.11)$$

де δ – відносна похибка, %;

$X_{\text{МСЕ}}$ – значення, отримане чисельно;

$X_{\text{ет}}$ – еталонне значення (аналітичне або експериментальне).

Наприклад, якщо за ручним розрахунком σ = 84,9 МПа, а в МСЕ-моделі на віддаленій від закріплень ділянці отримано 86,2 МПа, то δ = 1,5 %, і модель вважається верифікованою для цього перерізу. Якщо розбіжність із даними тензометрії складає 20 %, слід перевірити граничні умови, властивості матеріалу, точність вимірювань та вплив залишкових напружень.

5.6. Методика вивчення теми «Цифрове моделювання та аналіз конструкцій».

Цілі навчання

- **побудувати** (створювати) параметричну тривимірну модель ступінчастого вала;
- **виконати** (застосовувати) перевірку міцності двоопорного вала та порівняти її з результатом CAE;
- **інтерпретувати** (аналізувати) поле напружень і обґрунтувати достатність сітки.

Тип і форма заняття; рекомендовані методи

Тема – модуль 4 (лекції 4 год, практичні 8 год, самостійна робота 12 год). Рекомендовано лекцію-демонстрацію з екранною трансляцією побудови моделі та практикум із поетапними інструкціями. Для CAE-аналізу ефективний цикл Колба: досвід (розрахунок), спостереження (збіжність сітки), узагальнення, нове застосування. Роботу в CAD-системі організовують у парах за ролями «оператор – контролер», що підтримує взаємне навчання.

Таблиця 5.1 – Фрагмент плану вивчення теми

Мета	Види діяльності здобувачів	Цифрові засоби	Форма контролю
Створити модель вала	Побудова ескіза та послідовності операцій, задання параметрів	CAD-система	Перевірка зміни моделі при редагуванні параметра
Перевірити міцність	Побудова епюр Q і M, розрахунок напружень	Excel, Python	Звіт із розрахунковою схемою
Виконати CAE-аналіз	Задання закріплень, навантажень, сітки	CAE-модуль	Порівняння з аналітичним розв’язком
Інтерпретувати результати	Налаштування відображення, оцінювання похибки	Постпроцесор	Контрольний перелік інтерпретації

Диференційовані завдання

1) **Репродуктивний рівень.** Побудуйте модель ступінчастого вала за заданими розмірами й визначте масу.

2) **Частково-пошуковий рівень.** Змініть параметри вала за правилами підрозділу 5.2, порівняйте напруження у двоопорному валі з розрахунком у МСЕ при двох густотах сітки та поясніть різницю.

3) **Творчий рівень.** Підготуйте набір конфігурацій вала для різних потужностей і сформулюйте критерії допустимості моделі.

Типові труднощі здобувачів і способи їх подолання

– жорсткі розміри замість параметрів – тест на зміну одного розміру з перебудовою моделі;

– некоректні граничні умови – схема закріплень, що її здобувач пояснює до запуску розрахунку;

– довіра до «красивої» картини напружень – обов'язкове порівняння з аналітичною оцінкою;

– сингулярності біля гострих кутів – показ збіжності результатів при згущенні сітки.

Комплексне інженерне завдання

Розробляється фрагмент заняття: демонстраційна модель вала з трьома параметрами, інструкція з перебудови та міні-тест на розуміння ролі граничних умов. Слід передбачити варіант заняття без ліцензійного ПЗ, наприклад із безкоштовним переглядачем моделей.

Примітка. *Порада викладачеві: давайте здобувачам лише початкову модель і вимагайте від них самостійно скласти перелік граничних умов.*

Питання для самоконтролю

1) Чим твердотільне моделювання відрізняється від поверхневого, і які задачі вирішуються кожним із них?
2) Що таке задум проєктування (design intent) та які типові помилки параметризації призводять до втрати працездатності моделі?
3) Запишіть формули для напруження згину, прогину двоопорної балки та кута закручування вала й поясніть значення всіх величин.

6. МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ МАШИН І ОБЛАДНАННЯ

6.1. Основні критерії оптимізації конструктивних параметрів

Оптимізація – це цілеспрямований пошук таких значень конструктивних параметрів, за яких обраний показник якості досягає екстремуму без порушення вимог міцності, жорсткості, габаритів і технології. Цифрові інструменти (електронні таблиці, мови програмування, пакети МСЕ з модулями оптимізації) дозволяють замінити багаторазове «ручне» перебирання варіантів систематичним пошуком. Математично задача формулюється так:

$$\min_{x \in X} f(x), \quad g_j(x) \le 0 \ (j = 1, \dots, m), \quad h_k(x) = 0 \ (k = 1, \dots, p), \quad x_i^L \le x_i \le x_i^U \qquad (6.1)$$

де $x = (x_1, \dots, x_n)$ – вектор змінних проєктування (діаметри, товщини, довжини, частоти обертання);

$f(x)$ – цільова функція (критерій оптимальності);

$g_j(x)$ – обмеження-нерівності (міцність, жорсткість, габарит);

$h_k(x)$ – обмеження-рівності (умова складання, заданий передавальний відношення);

$x^{\mathrm{L}}{}_i$, $x^{\mathrm{U}}{}_i$ – нижня й верхня межі змінної (стандартні ряди, технологічні можливості).

Розв’язок, що задовольняє всі обмеження, називають **допустимим**, а допустимий розв’язок з найменшим значенням f – **оптимальним**. Обмеження, яке в оптимумі перетворюється на рівність, називають **активним**; саме активні обмеження визначають оптимум. Якщо оптимум лежить усередині допустимої області, обмеження не впливають на результат і проєктувальник може вільно обирати стандартні розміри.

Цільові функції в машинобудуванні та агроінженерії

Найчастіше мінімізують масу m, вартість C, питомі витрати енергії E, габарит, прогин або амплітуду коливань; максимізують продуктивність Q, коефіцієнт корисної дії η, ресурс чи запас міцності. Задачу максимізації зводять до мінімізації заміною f на $-f$.

Критерії слід виражати кількісно, у єдиній системі одиниць, а вимоги, які не можна кількісно оцінити (естетика, зручність обслуговування), краще вводити як обмеження або експертні бали (підрозділ 6.4).

Типи задач і методи розв'язання

За числом цілей розрізняють однокритеріальні та багатокритеріальні задачі, за типом змінних – неперервні та дискретні (стандартні профілі, модулі, ряди діаметрів), за характером функцій – лінійні, нелінійні, опуклі та багатоекстремальні. Вибір методу залежить від цих ознак і від вартості одного обчислення цільової функції. Повний перебір (сітка) простий і наочний, але витрати зростають експоненційно з числом змінних; градієнтні методи (SLSQP, GRG) швидкі, проте потребують гладкості й знаходять локальний мінімум; метод Нелдера–Міда не потребує похідних; штрафні функції зводять задачу до безумовної; генетичні алгоритми забезпечують глобальний пошук і працюють із дискретними змінними, але потребують багатьох обчислень f; топологічна оптимізація розподіляє матеріал в заданому об'ємі за результатами МСЕ.

На практиці рекомендовано починати з грубого сіткового сканування (воно дає уявлення про форму допустимої області й виявляє кілька мінімумів), після чого уточнювати розв'язок градієнтним методом із початковою точкою, взятою зі сканування.

6.2. Оптимізація масогабаритних характеристик деталей і вузлів

Зменшення маси знижує матеріаломісткість, інерційні навантаження та енерговитрати привода, тому масу деталей обертання й несучих елементів мінімізують найчастіше. Розглянемо суцільний вал і порожнистий вал із зовнішнім діаметром D і товщиною стінки t (внутрішній діаметр $d = D - 2t$).

Постановка задачі

Вихідні дані. Вал довжиною L = 0,8 м, сталь (ρ = 7850 кг/м^3, E = 2,1·10^{11} Па, $\sigma_т$ = 540 МПа, запас n = 3, тобто $[\sigma]$ = 180 МПа). Посередині діє поперечна сила F = 4 кН (шарнірне обпирання),

обертальний момент T = 1500 Н·м. Допустимий прогин $[f]$ = 0,8 мм. Згинальний момент $M = FL/4$ = 800 Н·м. Цільова функція:

$$m = \rho L \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) = \rho L \frac{\pi}{4} \cdot 4t(D - t) \qquad (6.2)$$

де ρ – густина матеріалу, кг/м^3;
L – довжина вала, м;
D, t – зовнішній діаметр і товщина стінки, м.

Обмеження: міцність за еквівалентним напруженням (гіпотеза найбільших дотичних напружень у спрощеній формі за енергетичною теорією), жорсткість і місцева стійкість тонкої стінки:

$$\sigma_{\text{екв}} = \frac{\sqrt{M^2 + 0{,}75T^2}}{W} \le [\sigma], \quad W = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D} \qquad (6.3)$$

де W – осьовий момент опору перерізу, м^3;
M, T – згинальний та обертальний моменти, Н·м;
$[\sigma]$ – допустиме напруження, Па.

$$f = \frac{FL^3}{48EI} \le [f], \quad I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}, \quad t \ge \frac{D}{20} \qquad (6.4)$$

де f – прогин посередині прольоту, м;
E – модуль пружності, Па;
I – осьовий момент інерції, м^4;
умова $t \ge D/20$ – прийнята обмежувальна вимога щодо мінімальної товщини стінки (технологічність і місцева стійкість).

Еквівалентний момент $\sqrt{(M^2 + 0{,}75T^2)}$ = 1525,6 Н·м. Для суцільного вала межа міцності дає $d \ge 44{,}2$ мм, а межа жорсткості – $d \ge 47{,}7$ мм; визначальною є жорсткість, тому d = 47,7 мм, m = 11,22 кг, $\sigma_{\text{екв}}$ = 143,2 МПа, f = 0,80 мм.

Розв’язання скануванням

У Python для кожного D від 40 до 120 мм (крок 0,5 мм) перебирали t від 1 до 30 мм (крок 0,1 мм), обираючи найменше допустиме t, і серед результатів – мінімальну масу. Область допустимих рішень показано на рис. 6.1. Для D = 63 мм мінімальна допустима товщина t = 3,2 мм (m = 3,78 кг); при D = 100 мм – t = 5,1 мм (m = 9,55 кг); при D = 120 мм – t = 6,1 мм (m = 13,71 кг).

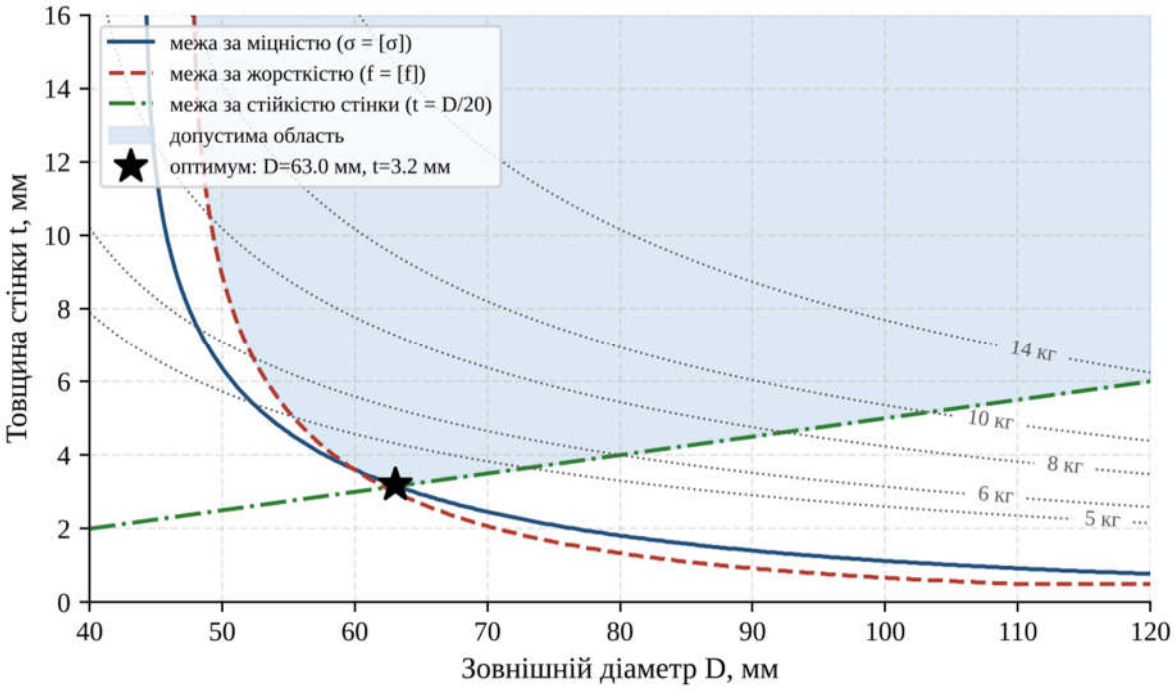


Рис. 6.1. Допустима область у площині (D, t), ізолінії маси та оптимум порожнистого вала

Мінімум маси за скануванням: D = 63,0 мм, t = 3,2 мм, m = 3,78 кг ($\sigma_{екв}$ = 178,3 МПа, f = 0,754 мм). Порівняно із суцільним валом (11,22 кг) економія становить 66 %. Зі збільшенням D вище оптимуму маса зростає, бо міцність і жорсткість уже мають запас, а товщину стінки обмежує $t = D/20$; при менших D доводиться різко збільшувати t. Оптимум розташований на перетині трьох активних обмежень (рис. 6.1). Для виготовлення слід округлити розміри до стандартного ряду труб, наприклад 63 × 3,2 мм, після чого повторно перевірити $\sigma_{екв}$ та f.

Перевірка методом SLSQP бібліотеки scipy.optimize (початкова точка D = 80 мм, t = 5 мм, змінні в мм, обмеження за формулами (6.3), (6.4)) дала D = 63,08 мм, t = 3,15 мм, m = 3,73 кг. Відмінність від сканування (3,78 кг) зумовлена кроком сітки 0,1 мм. Аналогічно задачу розв’язують в Excel Solver (метод «Нелінійний ГПГ», цільова клітинка – маса, змінні – D і t, обмеження за формулами (6.3), (6.4) і $t \geq D/20$); слід повторити запуск з іншого початкового наближення. Типова помилка – змішування одиниць (мм і м) у функціях обмежень.

6.3. Оптимізація енергетичних та експлуатаційних показників обладнання

Потужність на валу робочої машини визначається моментом і кутовою швидкістю, а потужність приводу – з урахуванням втрат у кожній ланці передачі:

$$P = \frac{M\omega}{\eta}, \qquad \eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \ldots \cdot \eta_k \tag{6.5}$$

де P – потужність привода, Вт;
M – момент опору на робочому органі, Н·м;
ω – кутова швидкість, рад/с;
η_i – ККД окремих ланок (редуктор, підшипники, муфта).

Для порівняння машин різної продуктивності використовують питомі витрати енергії на одиницю продукції:

$$E = \frac{P}{Q} \tag{6.6}$$

де E – питомі витрати енергії, кВт·год/т;
P – споживана потужність, кВт;
Q – продуктивність, т/год.

Збільшення частоти обертання підвищує Q, але зазвичай збільшує втрати на перемішування й тертя; діаметр впливає на Q кубічно, тому для заданої продуктивності існує безліч пар (D, n), що відрізняються енергоємністю.

Приклад: горизонтальний шнековий конвеєр

Припущення моделі (коефіцієнти ілюстративні й підлягають уточненню за довідником або експериментом): транспортується пшениця (ρ = 750 кг/м^3); крок шнека $S = 0{,}8D$; коефіцієнт заповнення $\psi = 0{,}30$; довжина $L_к = 12$ м; продуктивність не менша $Q_{min} = 20$ т/год; електродвигун має синхронну частоту 1450 об/хв. Продуктивність і потужність на транспортування:

$$Q = 60 \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot S\psi n\rho \cdot 10^{-3}, \qquad P_{тр} = \frac{QL_к w_0}{367} \tag{6.7}$$

де Q – продуктивність, т/год (D, S – у м, n – в об/хв);
w_0 – коефіцієнт опору переміщенню; прийнято $w_0 = 2{,}5\cdot[1 + (n/100)^2]$, де другий доданок враховує зростання втрат на перемішування;

$P_{тр}$ – потужність на транспортування, кВт.

З прийнятими даними $Q = 8{,}48 \cdot D^3 n$. ККД приводу: $\eta_{ред} = 0{,}99 - 0{,}0006 \cdot 1450/n$ (чим нижча частота обертання, тим більше передавальне відношення й нижчий ККД редуктора), $\eta_{підш} = 0{,}99$, $\eta_{муф} = 0{,}98$. Обмеження: $Q \geq 20$ т/год; $n \leq 30/\sqrt{D}$ (гранична частота за умови відсутності відкидання зерна); $0{,}20 \leq D \leq 0{,}45$ м (габарит жолоба). Мінімізується $E = P_{тр}/(\eta \cdot Q)$.

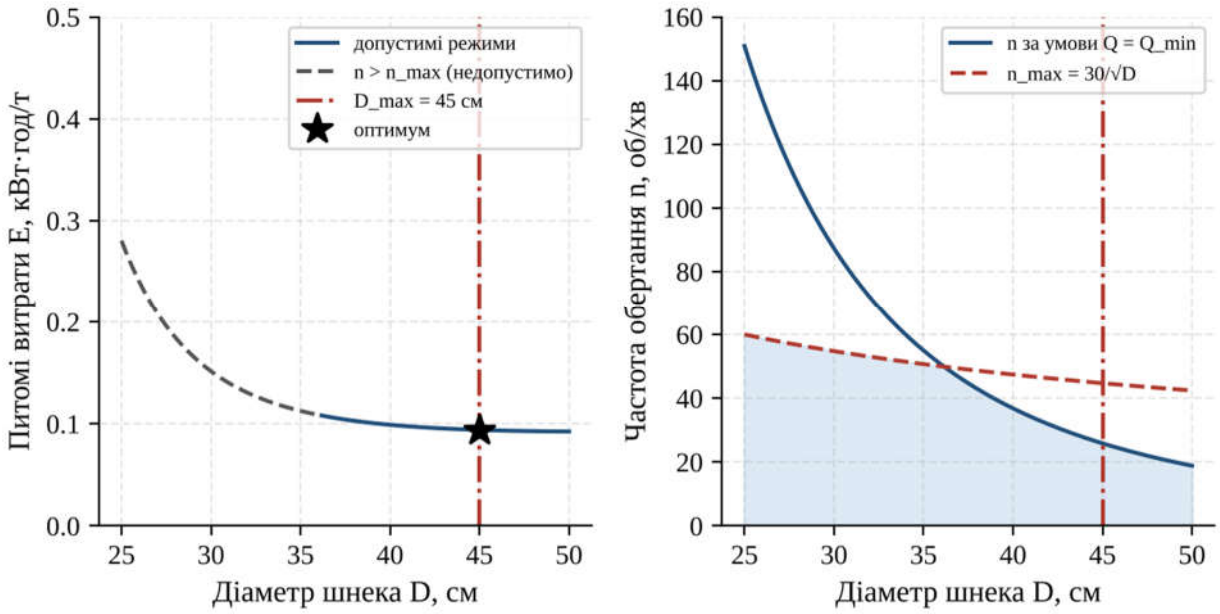


Рис. 6.2. Питомі витрати енергії (а) та режими $n(D)$ за умови $Q = Q_{min}$ (б)

Метод SLSQP з початкової точки (0,40 м; 40 об/хв) дав D = 0,450 м (верхня межа), n = 25,9 об/хв, Q = 20,0 т/год, E = 0,094 кВт·год/т, $P_{ел}$ = 1,88 кВт. Отже, активні обмеження – $Q \geq Q_{min}$ та $D \leq D_{max}$; зростання частоти понад необхідну лише збільшує втрати (при D = 0,40 м і n = 47,4 об/хв, Q = 25,7 т/год, E = 0,106 кВт·год/т). Крива $E(D)$ (рис. 6.2, а) має пологий хід: перехід від D = 0,40 до 0,45 м знижує E лише на 5 %, тому при дефіциті місця цілком виправданий стандартний шнек 0,40 м. Висновок справедливий для прийнятої моделі; для реального обладнання коефіцієнти w_0, ψ слід калібрувати за результатами випробувань.

6.4. Використання цифрових інструментів для порівняння альтернативних конструктивних рішень

Коли варіанти конструкції дискретні (різні схеми, матеріали, постачальники вузлів) і оцінюються за кількома різнорідними

критеріями, застосовують **матрицю рішень**. Алгоритм складається з п’яти кроків: 1) сформувати перелік варіантів і критеріїв; 2) заповнити матрицю значень x_{ij}; 3) задати ваги критеріїв w_j ($\Sigma w_j = 1$) за експертною оцінкою або методом попарних порівнянь; 4) нормалізувати значення; 5) обчислити інтегральну оцінку й ранжувати варіанти. Мінімаксна нормалізація приводить усі критерії до шкали від 0 до 1:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \ (\text{чим більше, тим краще}), \qquad r_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \ (\text{чим менше, тим краще}) \tag{6.8}$$

де x_{ij} – значення j-го критерію для i-го варіанта;
$x_j^{\min}$, $x_j^{\max}$ – найменше й найбільше значення критерію серед варіантів.

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} w_j r_{ij} \tag{6.9}$$

де S_i – інтегральна оцінка i-го варіанта (чим більша, тим краще);
w_j – вага j-го критерію, $\Sigma w_j = 1$;
n – кількість критеріїв.

Приклад: вибір конструкції несучої балки штанги обприскувача

Порівнюються чотири варіанти (А – зварна сталева ферма, Б – алюмінієвий профіль, В – вуглепластикова труба, Г – сталева труба з ребрами). Значення критеріїв умовні, наведені для демонстрації методики; у реальному проєкті їх беруть з розрахунку та цінових пропозицій. Ваги: маса 0,25; вартість 0,30; прогин 0,15; ресурс 0,20; технологічність 0,10. Для перших трьох критеріїв «менше – краще». Вихідна матриця та результати – в табл. 6.1.

Примітка. *Розрахунок виконано в Python; нормалізація за формулою (6.8).*

У Excel нормалізацію реалізують формулою `=(B2-МІН($B2:$E2))/(МАКС($B2:$E2)-МІН($B2:$E2))`, оцінку – `=СУМПРОИЗВ($B$2:$B$6;B8:B12)`, ранг – `=РАНГ(F14;$F$14:$I$14)`. Переможцем є варіант Б ($S = 0{,}729$).

Аналіз чутливості до ваг

Ваги задаються суб’єктивно, тому результат необхідно перевірити. Змінюючи вагу вартості w_2 від 0 до 1 і пропорційно перерозподіляючи решту ваг, отримують залежності $S_i(w_2)$. Варіант Б лідирує при $0{,}13 < w_2 < 0{,}60$; при менших вагах переможцем стає В (найлегший і найжорсткіший), при більших – найдешевший варіант А. Додатково виконано 10 000 випадкових відхилень усіх ваг на ±20 %: варіант Б був першим у 100 % випадків, тобто вибір стійкий. Якщо ж лідерство змінюється при малих збуреннях, необхідно уточнювати ваги або вводити додаткові критерії.

6.5. Багатокритеріальна оптимізація інженерних систем

Реальні задачі рідко зводяться до одного критерію: зменшення маси, як правило, збільшує прогин, а підвищення продуктивності – витрати енергії. Задача формулюється для векторної цільової функції $\mathbf{f}(x) = (f_1(x), \ldots, f_q(x)) \to \min$. Розв’язок x^A **домінує** над x^B, якщо $f_i(x^A) \le f_i(x^B)$ для всіх i і хоча б для одного i нерівність строга. Недоміновані допустимі розв’язки утворюють **множину Парето**, а їх образ у просторі критеріїв – **фронт Парето**: поліпшити одну ціль на ньому можна лише погіршенням іншої. Остаточний вибір на фронті – прерогатива проєктувальника.

Основні підходи

- **лінійна згортка** – мінімізація $F = \Sigma w_i \tilde{f}_i$, де $\tilde{f}_i$ – нормалізовані цілі; змінюючи ваги, отримують різні точки фронту (але не вгнуті ділянки);
- **метод ε-обмежень** – одна ціль мінімізується, а решта переводиться в обмеження $f_i \le \varepsilon_i$; підходить, коли є технічні вимоги на допустимі значення;
- **відстань до ідеальної точки** – вибір точки фронту, найближчої до «утопічної» точки $(f_1^{\min}, f_2^{\min})$;
- **еволюційні алгоритми** (зокрема NSGA-II) – підтримують популяцію розв’язків, ранжують її за рівнями недомінування й підтримують розмаїтість за відстанню скупчення; дають наближення всього фронту за один запуск і придатні для дискретних та негладких задач.

Приклад: балка прямокутного перерізу

Сталева балка (ρ = 7850 кг/м^3, $E = 2{,}1\cdot10^{11}$ Па) довжиною L = 1 м лежить на двох опорах, посередині діє F = 2 кН. Змінні: ширина b = 20…40 мм і висота h = 20…100 мм (крок 1 мм). Цілі – мінімізувати масу та прогин; обмеження – міцність:

$$\min m = \rho bhL, \quad \min f = \frac{FL^3}{4Ebh^3}, \quad \sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \le [\sigma] = 160 \text{ МПа} \tag{6.10}$$

де b, h – ширина та висота перерізу, м;
F – зосереджена сила, Н;
$f = FL^3/(48EI)$ при $I = bh^3/12$ – прогин посередині прольоту;
$\sigma = M/W$ – найбільше нормальне напруження при $M = FL/4$ і $W = bh^2/6$.

З 1701 комбінації (b, h) умові міцності задовольняють 1579. Алгоритм виділення фронту: розташувати допустимі варіанти за зростанням маси й залишити ті, у яких прогин менший за всі попередні (у Python – один прохід по відсортованому масиву). Отримано 103 недоміновані точки (рис. 6.3). Фронт утворюють переважно балки з мінімальною шириною b = 20 мм: прогин пропорційний $1/h^3$, а маса – h, тому вигідніше нарощувати висоту, а не ширину. Приклад домінування: варіант (b = 30, h = 60 мм; m = 14,13 кг; f = 0,37 мм) гірший за (20; 74 мм; 11,62 кг; 0,29 мм) за обома цілями.

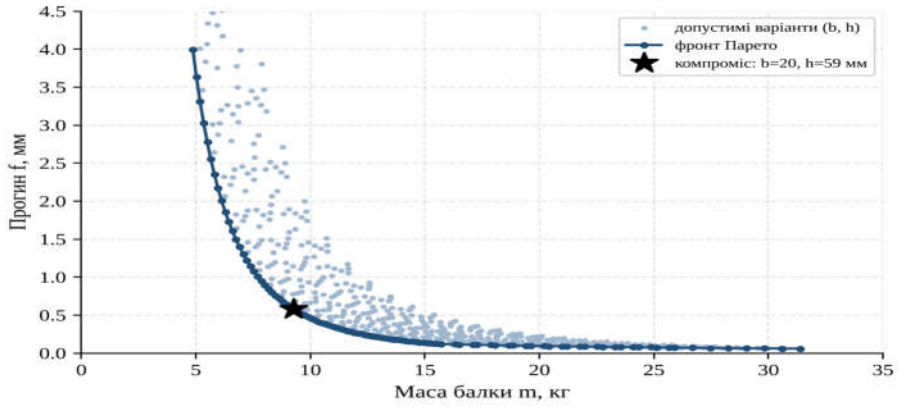


Рис. 6.3. Простір цілей «маса – прогин» і фронт Парето для балки

Компромісна точка (b = 20 мм, h = 59 мм; m = 9,26 кг; f = 0,58 мм) знайдена за мінімальною евклідовою відстанню до ідеальної

точки в нормалізованому просторі; лінійна згортка з $w = 0{,}5$ дає $h =$ 63 мм, з $w = 0{,}2$ (пріоритет жорсткості) – 89 мм, з $w = 0{,}8$ (пріоритет маси) – 44 мм ($m = 6{,}91$ кг; $f = 1{,}40$ мм). Метод ε-обмежень із вимогою $f \leq 2$ мм повертає $h = 40$ мм (6,28 кг). Для задач із десятками змінних і дорогими МСЕ-розрахунками фронт шукають NSGA-II, однак для двох змінних вичерпне сканування простіше й надійніше.

6.6. Методика вивчення теми «Оптимізація конструктивних параметрів».

Цілі навчання

– **сформулювати** (розуміти) цільову функцію, змінні та обмеження задачі оптимізації;

– **розв'язати** (застосовувати) задачу про порожнистий вал скануванням і в Excel Solver;

– **обґрунтувати** (оцінювати) вибір рішення за матрицею рішень і фронтом Парето.

Тип і форма заняття; рекомендовані методи

Тема – модуль 5 (лекції 2 год, практичні 6 год, самостійна робота 10 год). Доцільні проблемна лекція та практикум із дослідницьким елементом: здобувачі спершу шукають оптимум скануванням, потім перевіряють його Solver, що показує сутність методу. Для порівняння альтернатив застосовують дискусію щодо ваг критеріїв з наступним аналізом чутливості. Метод проєктів доречний для самостійної роботи.

Таблиця 6.2 – Фрагмент плану вивчення теми

Мета	Види діяльності здобувачів	Цифрові засоби	Форма контролю
Поставити задачу	Вибір змінних, цільової функції й обмежень	Конспект, Padlet	Усна перевірка постановки
Знайти оптимум	Сканування, пошук у Solver, розв'язання у scipy	Excel Solver, Python	Збіг результатів трьох методів
Порівняти альтернативи	Матриця рішень, зміна ваги критерію «Вартість»	Excel, Google Sheets	Таблиця чутливості
Побудувати фронт Парето	Вибір компромісного рішення для балки	Python, Excel	Обґрунтований звіт

Диференційовані завдання

1) **Репродуктивний рівень.** Для порожнистого вала складіть таблицю мінімальної допустимої товщини стінки при різних D та знайдіть мінімальну масу.
2) **Частково-пошуковий рівень.** Розв’яжіть задачу в Solver із різними початковими наближеннями, порівняйте з результатом сканування; змініть вагу критерію в задачі про балку штанги обприскувача й опишіть, як змінюється вибір.
3) **Творчий рівень.** Сформулюйте власну задачу оптимізації вузла (наприклад, шнека чи скребкового транспортера) та оберіть метод її розв’язання.

Типові труднощі здобувачів і способи їх подолання

– неповна постановка (відсутні обмеження) – шаблон «змінні – ціль – обмеження»;
– збіг Solver до локального оптимуму – повторний запуск з іншими початковими значеннями;
– довільні ваги критеріїв – обов’язковий аналіз чутливості;
– плутанина між одно- й багатокритеріальною задачею – порівняння точки оптимуму та фронту Парето на графіку.

Примітка. *Порада викладачеві: нехай здобувачі спершу передбачать положення оптимуму на графіку, а потім перевірять припущення розрахунком.*

Питання для самоконтролю

1) Із яких елементів складається математична постановка задачі оптимізації? Що таке допустима область та активне обмеження?
2) Чому в прикладі порожнистого вала оптимум лежить на перетині кількох обмежень? Як змінюється маса при русі від оптимуму вздовж кожного з них?
3) У чому полягають нормалізація та інтегральна оцінка в матриці рішень і навіщо виконують аналіз чутливості до ваг?
4) Що таке фронт Парето та домінування? Чим відрізняються лінійна згортка, метод ε-обмежень і NSGA-II?

7. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ У ПРОЄКТУВАННІ АГРОІНЖЕНЕРНОГО ОБЛАДНАННЯ

У розділі розглянуто п’ять типових задач проєктування агроінженерного обладнання. Вихідні дані умовні, розрахунки відтворюються в Excel або Python.

7.1. Розрахунок конструктивних параметрів робочих органів сільськогосподарських машин

Продуктивність шнекового конвеєра визначається об’ємом, який гвинт переміщує за оберт, коефіцієнтом заповнення жолоба та частотою обертання:

$$Q = 60 \cdot \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \cdot S \cdot n \cdot \psi \cdot \rho \qquad (7.1)$$

де Q – продуктивність, кг/год; D, d – діаметри гвинта та вала, м; S – крок, м; n – частота обертання, хв$^{-1}$;
ψ – коефіцієнт заповнення (0,25–0,4 для зернових); ρ – насипна густина, кг/м^3.

Потужність на валу двигуна та гранична частота обертання:

$$N = \frac{Q \cdot w \cdot L}{367 \cdot \eta}, \qquad n_{\max} = \frac{A}{\sqrt{D}} \qquad (7.2)$$

де Q – продуктивність, т/год; L – довжина конвеєра, м; η – ККД привода;
w – коефіцієнт опору (1,2–1,5 для чистого зерна, до 4 для абразивних матеріалів), $A \approx 45$ для зерна – приймаються за довідником.

Приклад. $D = 0{,}25$ м; $d = 0{,}05$ м; $S = 0{,}20$ м; $n = 80$ хв$^{-1}$; $\psi = 0{,}3$; $\rho = 550$ кг/м^3; $L = 6$ м; $w = 4{,}0$; $\eta = 0{,}885$. Об’єм за оберт $V = \pi/4 \cdot (0{,}25^2 - 0{,}05^2) \cdot 0{,}20 = 0{,}00942$ м^3; $Q = 60 \cdot 0{,}00942 \cdot 80 \cdot 0{,}3 \cdot 550 = 7\,464$ кг/год $\approx$ 7,46 т/год. Потужність $N = 7{,}46 \cdot 4{,}0 \cdot 6/(367 \cdot 0{,}885) = 0{,}55$ кВт; з запасом 1,2 обираємо двигун 0,75 кВт. Оскільки $n_{\max} = 45/\sqrt{0{,}25} = 90$ хв$^{-1}$, режим 80 хв$^{-1}$ припустимий. Залежність $Q(n)$ показано на рис. 7.1; режими при $n > 90$ хв$^{-1}$ перевищують $n_{\max}$.

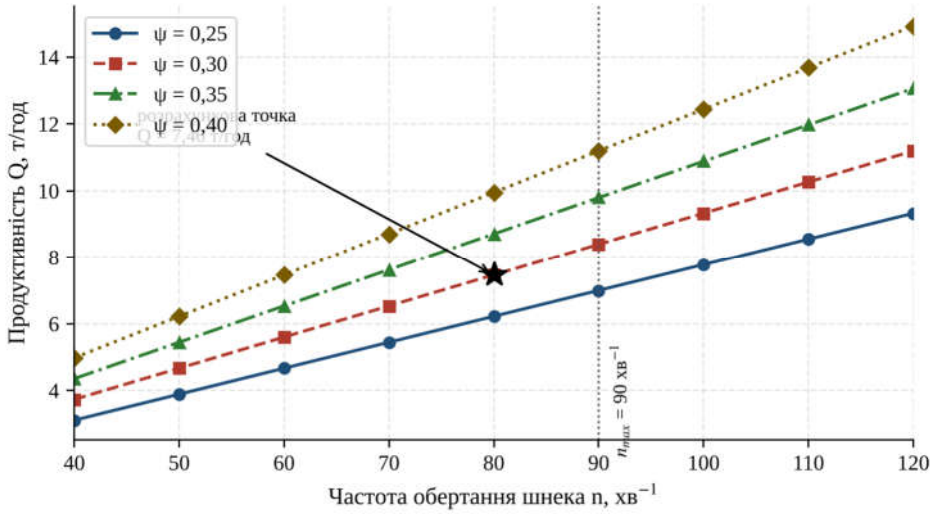


Рис. 7.1. Залежність продуктивності шнекового конвеєра від частоти обертання при різних коефіцієнтах заповнення

$$v = \frac{\pi D_p n}{60} \tag{7.3}$$

де D_p – діаметр кола молотків, м; для D_p = 0,4 м і n = 3 000 хв$^{-1}$ v = 62,8 м/с (типово 50–80 м/с).

Для молоткової дробарки ключовим є колова швидкість молотків (вплив v на енерговитрати розглянуто в підрозділі 7.3):

7.2. Цифрове моделювання елементів механізмів і приводів

Першим кроком цифрового проєктування привода є кінематичний і силовий розрахунок, що рекурентно визначає параметри валів:

$$P_i = P_{i-1} \cdot \eta_i, \qquad T_i = T_{i-1} \cdot u_i \cdot \eta_i = \frac{9550\, P_i}{n_i} \tag{7.4}$$

де P_i (кВт), T_i (Н·м), n_i (хв$^{-1}$) – параметри i-го вала; u_i, η_i – передатне число та ККД i-ї передачі.

Приклад. Привод шнека змішувача (рис. 7.2) містить клинопасову передачу (u = 2,0; η = 0,96), циліндричний редуктор (u = 5,0; η = 0,97) і ланцюгову передачу (u = 1,8; η = 0,95). Загальне u = 18, η = 0,885. На вихідному валу потрібні P_{IV} = 3,0 кВт при n_{IV} = 80 хв$^{-1}$, отже потужність двигуна P_m = 3,0/0,885 = 3,39 кВт; обираємо двигун 4 кВт, 1 440 хв$^{-1}$. Див. табл. 7.1.

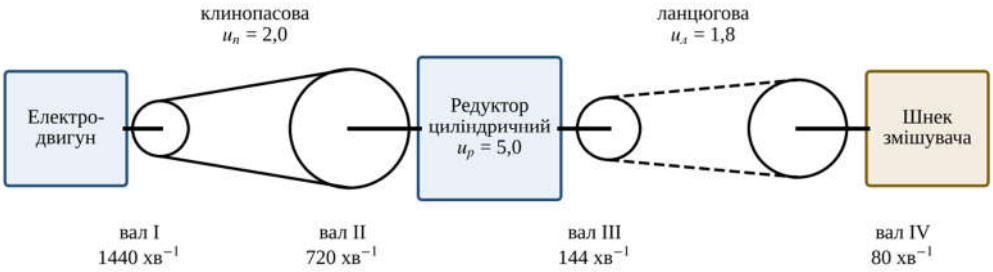


Рис. 7.2. Кінематична схема привода шнека змішувача

Таблиця 7.1 – Кінематичні та силові параметри валів привода

Вал	***n*, хв$^{-1}$**	***P*, кВт**	***T*, Н·м**	**Передача до вала**
I (двигун)	1 440	3,39	22,5	–
II	720	3,26	43,2	клинопасова, u = 2,0
III	144	3,16	209,4	редуктор, u = 5,0
IV (шнек)	80	3,00	358,1	ланцюгова, u = 1,8

Для вала d = 50 мм обрано шпонку 14×9, l = 70 мм:

$$\sigma_{см} = \frac{2T}{d \cdot h_p \cdot l_p} \le [\sigma]_{см} \qquad (7.5)$$

де T – момент, Н·мм; $h_p = 0{,}4h$; $l_p = l - b$ (робочі висота й довжина шпонки), мм; $[\sigma]_{см}$ = 100–120 МПа – приймається за довідником.

Маємо h_p = 3,6 мм; l_p = 56 мм; $\sigma_{см} = 2 \cdot 358\,100/(50 \cdot 3{,}6 \cdot 56) = 71$ МПа < 100 МПа – з’єднання працездатне.

3D-модель створюють так: параметри в таблиці – ескіз і «обертання» вала (фаски, галтелі) – шпонка, колесо, підшипники в складанні зі сполученнями – перевірка колізій – передача навантажень у МСЕ-модуль для порівняння з формулою (7.11).

7.3. Розрахунок та оптимізація параметрів обладнання для переробки сільськогосподарської продукції

Задача: знайти колову швидкість молотків v, за якої питомі енерговитрати мінімальні, а середній розмір частинок $d_{ср} \le 1{,}0$ мм. Використано умовні апроксимації (для реальної машини коефіцієнти визначають експериментально):

$$d_{ср} = 0{,}8(70/v)^{1{,}2}, \qquad Q = 2{,}0(v/70)^{0{,}5} \tag{7.6}$$

де $d_{ср}$ – середній розмір частинок, мм; Q – продуктивність, т/год; v – швидкість, м/с (40–100 м/с).

$$N = N_x + 14\lg(i)\cdot Q, \quad N_x = 0{,}8 + 7\cdot 10^{-6}v^3, \quad i = \frac{4}{d_{ср}}, \quad e = \frac{N}{Q} \tag{7.7}$$

де N, N_x – повна потужність і потужність холостого ходу, кВт; i – ступінь здрібнювання; e – питомі витрати, кВт·год/т.

Оскільки $d_{ср}$ зменшується зі зростанням v, а e зростає, оптимум лежить на межі допуску: $v_{min} = 70\cdot(0{,}8/1{,}0)^{1/1{,}2} = 58{,}1$ м/с. Результати – у табл. 7.2 і на рис. 7.3.

Таблиця 7.2 – Результати розрахунку режимів дробарки

v, м/с	Q, т/год	$d_{ср}$, мм	N, кВт	e, кВт·год/т	Допуск $d_{ср} \le 1{,}0$ мм
50	1,69	1,20	14,07	8,32	не виконано
58,1	1,82	1,00	17,54	9,62	на межі (оптимум)
70	2,00	0,80	22,77	11,39	виконано
80	2,14	0,68	27,39	12,81	виконано

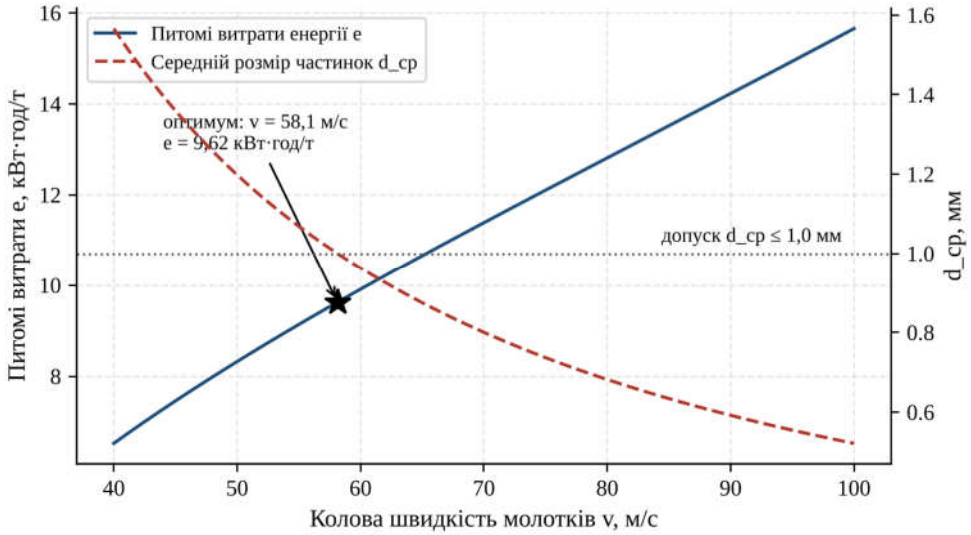


Рис. 7.3. Питомі витрати енергії та середній розмір частинок залежно від колової швидкості молотків

Оптимальний режим порівняно з 70 м/с зменшує питомі витрати з 11,39 до 9,62 кВт·год/т (на 15,5 %). В Excel задачу розв’язує «Пошук рішення», у Python – перебір сітки або `scipy.optimize.minimize_scalar`.

7.4. Аналіз конструктивних параметрів обладнання для тваринницьких підприємств

Привод змішувача кормів розраховують за методикою підрозділу 7.2, а для скребкового транспортера гною порівняємо три швидкості ланцюга. Дано: Q_r = 12 т/год; ρ = 400 кг/м^3; ψ = 0,7; висота скребка h = 0,10 м; L = 40 м; w = 1,0; w_c = 0,35; η = 0,80.

$$B = \frac{Q_r}{3{,}6\, h\, v\, \psi\, \rho}, \qquad q = \frac{Q_r}{3{,}6\, v} \tag{7.8}$$

де B – ширина жолоба, м; v – швидкість ланцюга, м/с; q – лінійна маса вантажу, кг/м.

$$F = g \cdot L\,(q \cdot w + q_c \cdot w_c), \qquad N = \frac{F \cdot v}{1000\,\eta} \tag{7.9}$$

де F – тягове зусилля, Н; q_c = 10 + 25B – лінійна маса ланцюга зі скребками, кг/м (умовна формула); N – потужність, кВт.

Таблиця 7.3 – Параметри варіантів скребкового транспортера

Варіант	v, м/с	B, м	q, кг/м	q_c, кг/м	F, Н	N, кВт	$q_c \cdot L$, кг
В1	0,2	0,595	16,67	24,88	9 956	2,49	995
В2	0,3	0,397	11,11	19,93	7 096	2,66	797
В3	0,4	0,298	8,33	17,45	5 667	2,83	698

Вибір виконано методом зваженої матриці рішень: показники нормують ($k = x_{\min}/x$) та зважують:

$$J_j = \sum_{i=1}^{3} \omega_i \cdot k_{ij}, \qquad \sum_{i=1}^{3} \omega_i = 1 \tag{7.10}$$

де ω_i – ваги: потужність 0,4; маса 0,3; швидкість (знос) 0,3; k_{ij} – нормований показник.

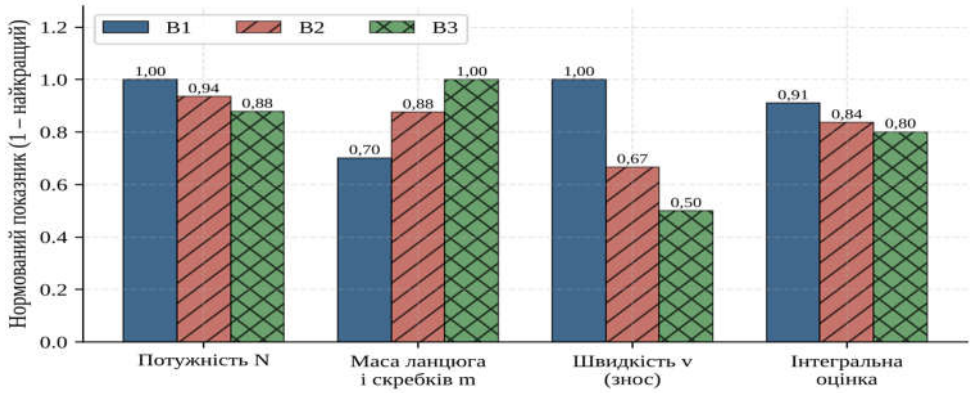


Рис. 7.4. Порівняння варіантів скребкового транспортера за нормованими показниками

Оцінка J = 0,91/0,84/0,80, тому найкращий варіант В1 (v = 0,2 м/с).

7.5. Практичний приклад комплексного вдосконалення конструкції машини із застосуванням цифрових інструментів

Розглянемо модернізацію шнекового завантажувача зерна (L = 6 м, потрібна $Q_{\text{потр}}$ = 7,0 т/год), запроєктованого із надмірним запасом: D = 0,32 м; d = 0,08 м; S = 0,32 м; n = 75 хв$^{-1}$; привід через черв'ячний редуктор (η = 0,96·0,80·0,95 = 0,730). Мета – зменшити металомісткість і енерговитрати. Алгоритм (7 кроків):

1) **Аналіз вихідного стану.** За (7.1) Q = 17,9 т/год; за (7.2) N = 1,61 кВт; маса шнека – 292 кг.
2) **Постановка задачі:** мінімізувати $J = 0{,}5\cdot m/m_0 + 0{,}5\cdot N/N_0$ при $Q \geq 7{,}0$ т/год, $n \leq n_{\max}$.
3) **Пошук** у Python: оптимум (D = 0,215 м, n = 96 хв$^{-1}$) лежить на межі $n_{\max}$ без запасу за Q (7,02 т/год).
4) **Конструктивний вибір.** Стандартні D = 0,25 м, S = 0,20 м, n = 80 хв$^{-1}$: Q = 7,46 т/год (запас 6,6 %), $n < n_{\max}$ = 90 хв$^{-1}$; маса шнека – 148 кг.
5) **Заміна передачі:** циліндричний редуктор замість черв'ячного, η = 0,885, N = 0,55 кВт.
6) **Перевірка вала.** $q = 148\cdot 9{,}81/6 = 242$ Н/м; l = 2,0 м; $M = q\cdot l^2/8$ = 121 Н·м; $T = 9550\cdot 0{,}552/80 = 65{,}9$ Н·м; за (7.11) $\sigma_{\text{екв}}$ = 10,9 МПа (запас за $\sigma_{\text{т}}$ = 360 МПа понад 30); прогин за (7.12) 0,78 мм < l/1000.
7) **Цифрова верифікація.** 3D-модель, МСЕ-розрахунок вала, креслення.

$$\sigma_{\text{екв}} = \frac{\sqrt{M^2 + 0{,}75\,T^2}}{W}, \qquad W = \frac{\pi d^3}{32} \tag{7.11}$$

де M, T – згинальний і крутний моменти, Н·м; W – момент опору перерізу, м^3.

$$f = \frac{5\,q\,l^4}{384\,E\,I}, \qquad I = \frac{\pi d^4}{64} \tag{7.12}$$

де q – навантаження, Н/м; l – проліт, м; $E = 2{,}1 \cdot 10^{11}$ Па; I – момент інерції, м^4.

Примітка. *Продуктивність знижено цілеспрямовано до потрібного рівня 7,0 т/год.*

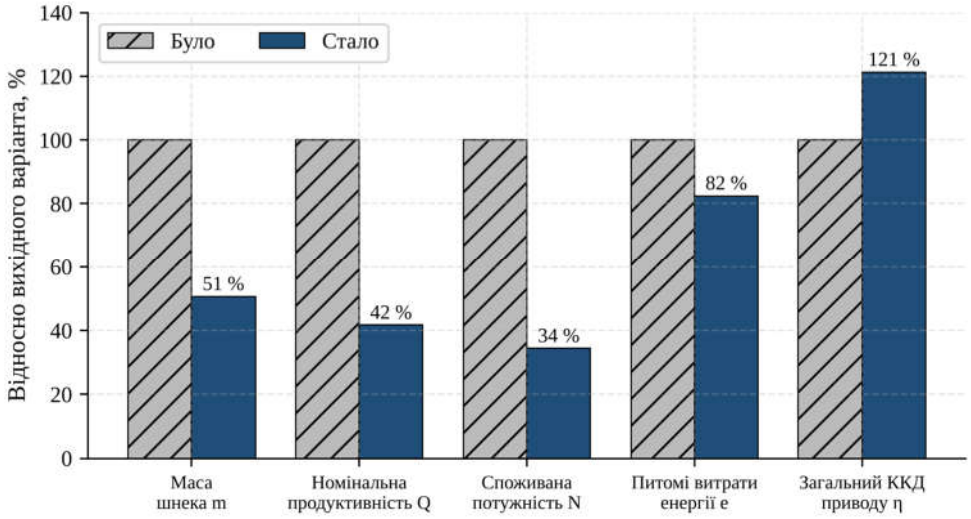


Рис. 7.5. Порівняння показників до та після вдосконалення (вихідний варіант = 100 %)

Маса зменшилася майже вдвічі, потужність – на 66 %, питомі витрати – на 17,5 % (табл. 7.4, рис. 7.5).

7.6. Методика вивчення теми «Цифрові інструменти в проєктуванні агроінженерного обладнання».

Цілі навчання

- **виконати** (застосовувати) розрахунок продуктивності та потужності робочого органа (шнек, дробарка, скребковий транспортер);
- **порівняти** (аналізувати) варіанти конструкції за нормованими показниками;
- **спроєктувати** (створювати) комплексне завдання за схемою «до – після вдосконалення».

Тип і форма заняття; рекомендовані методи

Тема входить до модуля 6 (лекції 4 год, практичні 12 год, самостійна робота 12 год разом із розділами 8–10). Провідний метод – навчальний проєкт у малих групах за принципом контекстного

навчання: група отримує «замовлення» на вдосконалення машини та проходить цикл розрахунок – моделювання – оптимізація – презентація. Ролі (розрахунковик, конструктор, аналітик, доповідач) змінюються між заняттями. Завершальне заняття проводять як захист проєктів із взаємним оцінюванням.

Таблиця 7.5 – Фрагмент плану вивчення теми

Мета	**Види діяльності здобувачів**	**Цифрові засоби**	**Форма контролю**
Розрахувати робочий орган	Залежність продуктивності шнека від *n* при різних коефіцієнтах заповнення	Excel, Google Sheets	Перевірка листа
Проаналізувати привід	Кінематичний і силовий розрахунок валів привода шнека змішувача	Excel, CAD	Порівняння з контрольними значеннями
Порівняти варіанти	Нормування показників скребкового транспортера	Excel	Матриця рішень із обґрунтуванням
Представити проєкт	Показники шнекового завантажувача до й після вдосконалення	Miro, презентація	Рубрика захисту проєкту

Диференційовані завдання

1) **Репродуктивний рівень.** Побудуйте залежність продуктивності шнека від частоти обертання за формулами підрозділу 7.1 і прочитайте з графіка допустимий діапазон режимів.
2) **Частково-пошуковий рівень.** Розрахуйте режими дробарки й обґрунтуйте колову швидкість молотків за питомими витратами енергії та розміром частинок.
3) **Творчий рівень.** Виберіть машину, знайдіть слабке місце, запропонуйте вдосконалення й оцініть його за схемою підрозділу 7.5.

Типові труднощі здобувачів і способи їх подолання

– нечітка межа між завданнями учасників групи – письмовий розподіл ролей і контрольних точок;

– відрив розрахунку від реальної машини – використання фото та паспортних даних обладнання;
– перевантаження презентації розрахунками – шаблон із трьох слайдів: задача, метод, висновок;
– непорівнянність критеріїв – обов’язкове нормування показників.

Комплексне інженерне завдання

Складається міні-проєкт «Вдосконалення робочого органа машини» з картою завдань, переліком цифрових засобів, рубрикою оцінювання та переліком типових помилок. Матеріал слід адаптувати до рівня підготовки здобувачів.

Примітка. *Порада викладачеві: включайте в оцінювання проєкту окремий критерій внеску кожного учасника, щоб запобігти формальній участі.*

Питання для самоконтролю

1) Від яких параметрів залежить продуктивність шнека і чому існує обмеження за частотою обертання?
2) Як визначаються потужність, момент і частота обертання на валах багатоступеневого привода?
3) За якою формулою перевіряється шпонкове з’єднання і що робити, якщо умова міцності не виконується?
4) У чому полягає метод зваженої матриці рішень і як перевірити стійкість вибору до зміни ваг?
5) Назвіть кроки комплексного вдосконалення конструкції цифровими інструментами та призначення кожного.

8. ОРГАНІЗАЦІЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ

8.1. Послідовність виконання індивідуального інженерного завдання

Самостійна робота над індивідуальним завданням становить значну частину навчального навантаження і є основною формою формування навичок застосування цифрових інструментів. Щоб уникнути хаотичного виконання, роботу слід розбити на логічні етапи з контрольними результатами. Рекомендована послідовність наведена нижче, а її схема – на рис. 8.1.

1) **Отримання завдання:** тема, вихідні дані за варіантом, строки, уточнення в керівника.
2) **Аналіз вихідних даних:** перевірка повноти, приведення до одиниць СІ, виділення обмежень.
3) **Вибір методики:** розрахункова схема, формули, програмні засоби, допущення.
4) **Розрахунок** в електронній таблиці або скрипті з окремим блоком вихідних даних.
5) **Цифрове моделювання:** 3D-модель, матеріал, закріплення, навантаження, перевірка збіжності сітки.
6) **Аналіз результатів:** порівняння розрахунку з моделюванням, перевірка умов міцності та жорсткості.
7) **Оптимізація:** критерій, обмеження, змінні, фіксація найкращого варіанта.
8) **Оформлення звіту** за вимогами підрозділу 8.3.
9) **Захист:** доповідь 5–7 хв, демонстрація моделі, відповіді на питання.

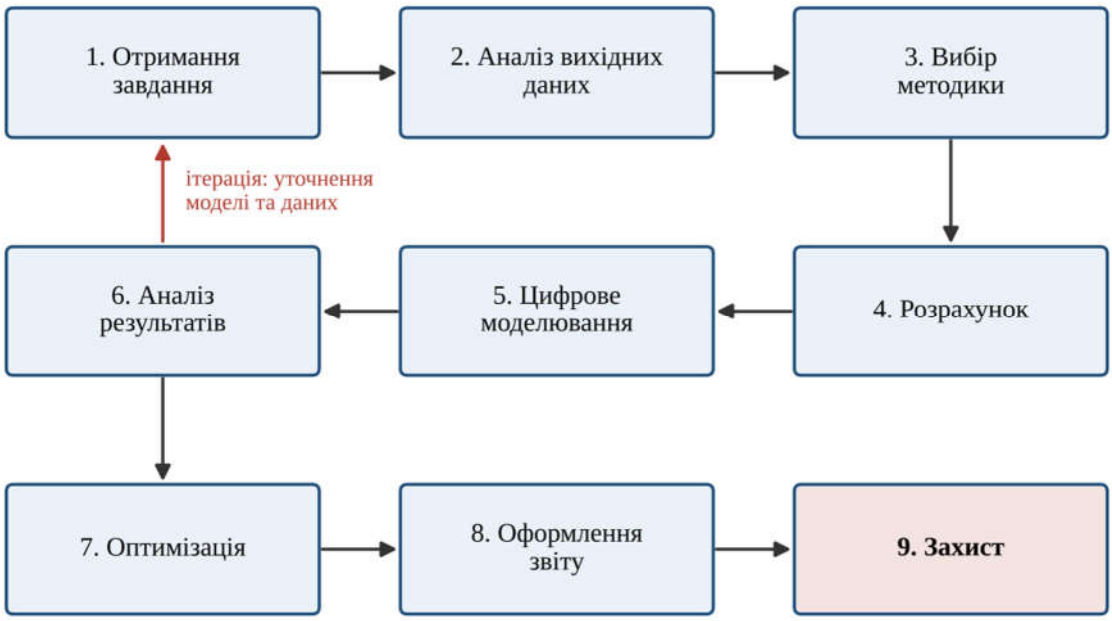


Рис. 8.1. Послідовність виконання індивідуального інженерного завдання

Етапи не є суто лінійними: якщо розбіжність між аналітичним розрахунком і моделюванням перевищує допустиму (орієнтовно 5–10 %), необхідно повернутися до перевірки вихідних даних і моделі. Орієнтовний розподіл годин (30 год) наведено в табл. 8.1; точний розподіл визначає робоча програма дисципліни.

Примітка. *Розподіл орієнтовний і коригується залежно від складності завдання.*

8.2. Використання цифрових ресурсів для пошуку технічної інформації

Якість інженерного розрахунку значною мірою залежить від достовірності вихідних даних: властивостей матеріалів, нормативних коефіцієнтів, характеристик серійного обладнання. Здобувач має вміти швидко знаходити такі дані в авторитетних джерелах і критично їх оцінювати. Основні типи цифрових ресурсів та їх призначення подано в табл. 8.2.

Таблиця 8.2 – Цифрові ресурси для пошуку технічної інформації

Тип ресурсу	Приклади	Що шукати
Національні бібліотеки та репозитарії	Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського (НБУВ),	Дисертації, монографії, підручники, методичні матеріали

	інституційні репозитарії закладів вищої освіти	
Наукометричні бази	Scopus, Web of Science	Рецензовані статті, огляди, методики розрахунку
Пошукові системи та відкриті архіви	Google Scholar, DOAJ	Статті у відкритому доступі, цитування, повні тексти
Патентні бази	Укрпатент, Espacenet	Технічні рішення, аналоги конструкцій робочих органів
Каталоги виробників	Сайти та електронні каталоги виробників підшипників, редукторів, електродвигунів	Паспортні характеристики, розміри, ресурс, 3D-моделі
Нормативні документи	Національні стандарти ДСТУ, міжнародні стандарти	Вимоги до розрахунку, допуски, позначення

Стратегія пошуку

Пошук починають із ключових слів українською та англійською мовами з синонімами (наприклад, «напружено-деформований стан» – stress-strain state), застосовують оператори AND, OR, NOT, пошук фрази в лапках, обмеження за роками. Спершу доцільно знайти оглядову статтю або підручник, а потім перейти до вузьких джерел за їхніми переліками літератури.

Критичне оцінювання джерел

Джерело оцінюють за авторитетністю (видавець, рецензування), актуальністю (рік видання, чинність стандарту), відповідністю умовам завдання (тип матеріалу, режим навантаження) та узгодженістю даних щонайменше у двох незалежних джерелах. Для збирання й оформлення джерел рекомендовано менеджери бібліографії (Zotero, Mendeley або аналогічні): вони зберігають метадані, усувають дублікати та формують список літератури; автоматично створений перелік слід перевірити вручну та привести до вимог кафедри.

Штучний інтелект у пошуку

Інструменти на основі ШІ можуть допомогти сформулювати ключові слова, пояснити термін, запропонувати структуру огляду. Водночас вони здатні генерувати неправдиві посилання, неточні числові значення та неіснуючі стандарти. Тому **кожне джерело та кожне числове значення, отримане за допомогою ШІ, слід**

перевірити за першоджерелом, а факт використання ШІ вказати у звіті. Посилання на ШІ як на джерело даних для розрахунку не допускається.

8.3. Вимоги до оформлення результатів розрахунків і цифрового моделювання

Звіт має відтворювати хід роботи так, щоб інший інженер міг повторити розрахунок і отримати ті самі результати. Загальні вимоги до оформлення (поля, шрифт, нумерація сторінок) – відповідно до вимог кафедри; нижче наведено специфічні вимоги до обчислювальної частини. Рекомендована структура звіту: вступ і постановка задачі; розрахункова схема та допущення; аналітичний розрахунок; цифрова модель; результати та аналіз; оптимізація; висновки; додатки (електронні таблиці, скрипти, перелік ПЗ).

- усі величини подавати в одиницях СІ; одиниці вказувати прямим шрифтом, змінні – курсивом;
- формули нумерувати в межах розділу, після кожної формули давати розшифровку величин; результати підстановки наводити з одиницями;
- таблиці й рисунки нумерувати, кожен має підпис і посилання в тексті; скриншоти МСЕ повинні містити шкалу з одиницями, позначення закріплень і навантажень;
- вказувати назву й версію використаного програмного забезпечення, тип скінченних елементів і розмір сітки;
- у явному вигляді записувати допущення (лінійно-пружний матеріал, відсутність концентраторів, статичне навантаження тощо);
- зазначати використання ШІ: для чого застосовано, який запит, як перевірено результат.

Примітка. *Звіт без вказаних допущень і версій програмного забезпечення вважається неповним, оскільки результат неможливо відтворити.*

8.4. Критерії оцінювання

Оцінювання індивідуального завдання проводиться за 100-бальною шкалою. Розподіл балів за складовими наведено в табл. 8.3.

Таблиця 8.3 – Критерії оцінювання індивідуального завдання

Критерій	Що оцінюється	Бали
Правильність розрахунків	Коректність формул, одиниць, числових результатів	30
Якість цифрової моделі	Адекватність геометрії, граничних умов, сітки, матеріалу	20
Аналіз результатів	Порівняння методів, перевірка умов міцності, висновки	20
Оптимізація	Чітко задані критерій і обмеження, обґрунтований вибір варіанта	15
Оформлення	Структура, таблиці, рисунки, посилання	10
Самостійність, доброчесність, використання ШІ	Власний варіант даних, коректне зазначення джерел та ШІ, захист	5
Разом		100

Шкала переведення: **A** – 90–100 балів (відмінно); **B** – 82–89 (добре); **C** – 74–81 (добре); **D** – 64–73 (задовільно); **E** – 60–63 (задовільно); **FX, F** – менше 60 (незадовільно).

Роботи, виконані за чужим варіантом, з неперевіреними даними ШІ або з ознаками плагіату, не приймаються до оцінювання та повертаються на доопрацювання. Найтиповіші помилки, які знижують оцінку:

– змішування одиниць (мм і м, Н і кН, МПа і Н/мм² без перерахунку);

– відсутність перевірки моделі: порівняння з аналітичним розрахунком або тестова задача;

– сингулярності в місцях точкового навантаження, інтерпретовані як реальні напруження;

– запозичені формули та дані без посилань на джерело.

Питання для самоконтролю

1) Назвіть основні етапи виконання індивідуального інженерного завдання та результат кожного з них.
2) За яких умов необхідно повернутися до попереднього етапу?

3) Як перевірити достовірність інформації, отриманої за допомогою ШІ?
4) Які відомості про програмне забезпечення обов’язково вказувати у звіті?

8.5. Портфоліо та рефлексія як засоби самостійної роботи майбутнього інженера.

Самостійна робота майбутнього інженера має не лише забезпечити виконання індивідуального завдання, а й зробити наочним власний професійний розвиток. Для цього використовують електронне портфоліо та рефлексивний щоденник. Портфоліо – цілеспрямована добірка артефактів із поясненнями, що **доводить** сформованість цифрової компетентності; щоденник фіксує процес навчання.

Структура електронного портфоліо

Портфоліо містить розділи: візитівка й цілі; цифрові артефакти (розрахунки, моделі, звіти); методичні артефакти (тести, рубрики, ресурси); рефлексія; план розвитку. Кожний артефакт анотують: мета, інструменти, частка роботи, виконана за допомогою ШІ, спосіб перевірки результату. Доказовість означає, що артефакт можна відкрити, відтворити й співвіднести з критерієм; твердження про вміння без файлу не зараховується (табл. 8.4).

Таблиця 8.4 – Складники портфоліо і критерії оцінювання

Складник	Критерій доказовості	Бали
Візитівка й цілі	Цілі конкретні й вимірювані	10
Цифрові артефакти	Відтворюваність, коректні одиниці, перевірка результату	25
Методичні артефакти	Узгодженість цілей, завдань і контролю	30
Рефлексивний розділ	Аналіз причин, висновки для дій	20
План розвитку й оформлення	Реалістичність плану, прозорість джерел і ШІ	15
Разом		100

Рефлексивний щоденник за циклом Колба

Після кожного практичного заняття здобувач відповідає на чотири запитання (5–8 речень разом): **конкретний досвід** – що я робив і який отримав результат; **рефлексивне спостереження** – що спрацювало, що ні, які були труднощі; **абстрактна концептуалізація** – яким правилом чи принципом це пояснюється; **активне експериментування** – що я зміню наступного разу й як перевірю зміну.

Самооцінювання та взаємооцінювання

Самооцінювання проводять за тією самою рубрикою, що й викладач, до подання роботи. Взаємооцінювання: кожну роботу оцінюють двоє однокурсників за рубрикою, записуючи одну сильну сторону й одну пропозицію; їхня оцінка враховується до 10 % балів, щоб зменшити суб’єктивність.

9. ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ

Практичні завдання охоплюють основні етапи цифрового інженерного проєктування: розрахунок у електронних таблицях, перевірку міцності, тривимірне моделювання, аналіз методом скінченних елементів (МСЕ), порівняння варіантів і оптимізацію. Кожне завдання виконується за індивідуальним варіантом: номер варіанта дорівнює залишку від ділення порядкового номера здобувача в списку групи на 6 (залишок 0 відповідає варіанту 6). Звіт оформлюють за вимогами підрозділу 8.3 і включають до нього вихідні дані, таблиці результатів, рисунки й обґрунтований висновок.

9.1. Розрахунок параметрів механічної передачі в Microsoft Excel.

Мета. Навчитися автоматизувати розрахунок геометричних і силових параметрів прямозубої циліндричної передачі та перевірку зубів на згин в електронній таблиці.

Таблиця 9.1 – Вихідні дані до завдання 9.1 (кут профілю 20°, зубчасті колеса без зміщення)

Варіант	**Потужність P, кВт**	**Частота n_1, хв$^{-1}$**	**Передаточне число u**	**Число зубів z_1**	**Модуль m, мм**	**Ширина b, мм**
1	5,5	1440	3,15	22	2,5	32
2	7,5	1450	4,0	20	3,0	40
3	11	1450	3,55	24	3,0	45
4	4	960	2,5	25	2,5	30
5	15	970	4,0	22	4,0	50
6	3	1420	5,0	20	2,0	25

1) Створіть аркуш із блоком вихідних даних (окремі комірки з підписами й одиницями) та блоком результатів.
2) Обчисліть обертовий момент на шестірні за формулою (9.1) та число зубів колеса $z_2 = z_1 u$ (заокругліть до цілого).
3) Розрахуйте ділильні діаметри та міжосьову відстань за формулою (9.2).
4) Визначте колову й радіальну сили за формулою (9.3).

5) Виконайте перевірку зуба шестірні на згин за формулою (9.4); коефіцієнти Y_F і K_F прийміть за довідником.

$$T_1 = 9550\frac{P}{n_1} \tag{9.1}$$

$$d = mz, \quad a_w = \frac{m(z_1+z_2)}{2} \tag{9.2}$$

$$F_t = \frac{2T_1}{d_1}, \quad F_r = F_t \operatorname{tg} 20° \tag{9.3}$$

$$\sigma_F = \frac{F_t Y_F K_F}{bm} \le [\sigma]_F \tag{9.4}$$

де T_1 – момент на шестірні, Н·м (за P у кВт і n_1 у хв$^{-1}$);
d – ділильний діаметр, мм; a_w – міжосьова відстань, мм;
F_t, F_r – колова й радіальна сили, Н;
Y_F – коефіцієнт форми зуба; K_F – коефіцієнт навантаження;
$[\sigma]_F$ – допустиме напруження згину, МПа.

Мінімальний приклад (варіант 2). T_1 = 9550·7,5/1450 = 49,4 Н·м; z_2 = 20·4 = 80; d_1 = 3·20 = 60 мм; a_w = 3·(20+80)/2 = 150 мм; F_t = 2·49 400/60 = 1647 Н; F_r = 599 Н. Приймаючи Y_F = 4,07 (для z = 20) і K_F = 1,3, отримуємо σ_F = 1647·4,07·1,3/(40·3) = 72,6 МПа, що значно менше $[\sigma]_F$ (для поліпшеної сталі за довідником – порядку 200 МПа). Умова міцності виконується із запасом.

Контрольні запитання

1) Чому блок вихідних даних слід відокремлювати від формул?
2) Як змінюється F_t при зменшенні модуля та незмінному моменті?
3) Як у Excel організувати перевірку умови з виведенням повідомлення?

9.2. Визначення геометричних параметрів вала та перевірка його міцності.

Мета. Визначити мінімально допустимий діаметр вала під зубчастим колесом за зведеним моментом і побудувати епюри моментів.

Вал установлено на двох шарнірних опорах A і B, колесо розташоване посередині прольоту l (епюри моментів будують за

схемою двоопорної балки із силою посередині). Допустиме напруження $[\sigma]$ = 60 МПа, кут зачеплення 20°.

Примітка. *Дві останні колонки – контрольні значення для самоперевірки.*

1) Обчисліть сили в зачепленні за формулою (9.5).
2) Визначте згинальні моменти в двох площинах і сумарний момент у середньому перерізі за формулою (9.6).
3) Знайдіть зведений момент за формулою (9.7).
4) Обчисліть мінімальний діаметр за формулою (9.8) і округліть до стандартного значення з ряду нормальних лінійних розмірів.

$$F_t = \frac{2T}{d_к}, \quad F_r = F_t \operatorname{tg} 20° \tag{9.5}$$

$$M = \frac{l}{4}\sqrt{F_t^2 + F_r^2} \tag{9.6}$$

$$M_{зв} = \sqrt{M^2 + 0{,}75T^2} \tag{9.7}$$

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32M_{зв}}{\pi[\sigma]}} \tag{9.8}$$

де F_t, F_r – колова та радіальна сили, Н;
M – сумарний згинальний момент, Н·мм;
$M_{зв}$ – зведений момент (за гіпотезою енергії формозміни), Н·мм;
$[\sigma]$ – допустиме напруження, МПа.

Мінімальний приклад (варіант 2). F_t = 2·300 000/200 = 3000 Н; F_r = 1092 Н; M = 240·√(3000²+1092²)/4 = 191,6 Н·м; $M_{зв}$ = √(191,6²+0,75·300²) = 322,8 Н·м; $d \geq \sqrt[3]{}$(32·322 800/(π·60)) = 38,0 мм. Приймаємо d = 40 мм; діаметр потрібно ще перевірити на витривалість і жорсткість.

Контрольні запитання

1) Чому в зведеному моменті стоїть коефіцієнт 0,75?
2) Як зміниться діаметр, якщо проліт збільшити на 20 %?
3) Які перевірки необхідні додатково до розрахунку на статичну міцність?

9.3. Створення 3D-моделі деталі сільськогосподарської машини.

Мета. Освоїти параметричне твердотільне моделювання деталі та отримати її масу й положення центра мас.

Деталь обирають за варіантом: 1 – ступінчастий вал із шпонковим пазом; 2 – маточина зі шліцьовим отвором; 3 – кронштейн кріплення ножа; 4 – диск посівної секції; 5 – лапа культиватора; 6 – корпус підшипникового вузла. Розміри задає керівник; матеріал – сталь (густина 7850 кг/м³).

1) Створіть повністю визначений ескіз і побудуйте основну форму видавлюванням або обертанням.
2) Додайте отвори, фаски, галтелі, пази.
3) Задайте матеріал і визначте масу, центр мас, моменти інерції.
4) Створіть креслення та збережіть модель у форматі STEP.

Контрольні запитання

1) Які переваги має параметрична модель порівняно з непараметричною?
2) Чому ескіз має бути повністю визначеним?
3) Для чого потрібен обмінний формат STEP?

9.4. Аналіз напружено-деформованого стану конструктивного елемента.

Мета. Виконати статичний розрахунок консольного елемента методом скінченних елементів і порівняти його результати з аналітичним розв’язком.

Консольна пластина прямокутного перерізу $b \times h$ довжиною l, навантажена на вільному кінці силою F. Геометрія та навантаження – за даними варіанта А з табл. 9.3; матеріал – сталь ($E = 2{,}1 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0{,}3$).

1) Задайте матеріал, жорстке закріплення одного торця та силу на вільному торці.
2) Виконайте розрахунок щонайменше для трьох розмірів елемента сітки та оцініть збіжність.

3) Обчисліть аналітичні значення $\sigma = 6Fl/(bh^2)$ і $f = 4Fl^3/(Ebh^3)$.
4) Порівняйте результати та поясніть розбіжність, зокрема вплив закріплення.

Контрольні запитання

1) Як переконатися, що розв’язок не залежить від густоти сітки?
2) Чому напруження біля закріплення можуть відрізнятися від аналітичних?
3) Яка різниця між напруженнями за Мізесом і головними напруженнями?

9.5. Порівняння двох конструктивних варіантів робочого органу.

Мета. Порівняти два варіанти консольного елемента робочого органу (стійки, ножа) за міцністю, жорсткістю та масою й обґрунтувати вибір.

Варіанти *A* і *B* відрізняються товщиною *h*. Матеріал – сталь з межею текучості 355 МПа, коефіцієнт запасу 1,5, тобто $[\sigma] = 237$ МПа; допустимий прогин $[f] = l/50$; густина 7850 кг/м³; $E = 2{,}1 \cdot 10^5$ МПа. Дані та контрольні результати наведено в табл. 9.3.

Таблиця 9.3 – Вихідні дані до завдання 9.5 та контрольні результати (A / B)

Варіант	F, **Н**	l, **мм**	b, **мм**	h_A / h_B, **мм**	σ, **МПа**	f, **мм**	m, **кг**
1	500	300	60	10 / 8	150 / 234	4,3 / 8,4	1,41 / 1,13
2	600	350	60	12 / 10	146 / 210	4,7 / 8,2	1,98 / 1,65
3	800	400	70	14 / 12	140 / 190	5,1 / 8,1	3,08 / 2,64
4	400	250	50	8 / 7	188 / 245	4,7 / 6,9	0,78 / 0,69
5	1000	400	80	16 / 14	117 / 153	3,7 / 5,6	4,02 / 3,52
6	700	320	60	12 / 10	156 / 224	4,2 / 7,3	1,81 / 1,51

1) Для кожного варіанта обчисліть напруження за формулою (9.9), прогин за формулою (9.10) і масу за формулою (9.11).
2) Занесіть результати в таблицю та перевірте умови $\sigma \le [\sigma]$ і $f \le [f]$.
3) Сформулюйте висновок: який варіант прийнятний за всіма критеріями.

$$\sigma = \frac{6Fl}{bh^2} \tag{9.9}$$

$$f = \frac{4Fl^3}{Ebh^3} \tag{9.10}$$

$$m = \rho\, blh \tag{9.11}$$

де F – сила на вільному кінці, Н; l – виліт, мм;
b, h – ширина й товщина перерізу, мм;
E – модуль пружності, МПа; ρ – густина матеріалу.

Приклад (варіант 1). Для A: $\sigma = 6\cdot500\cdot300/(60\cdot10^2) = 150$ МПа, f = 4,3 мм ≤ 6 мм, m = 1,41 кг. Для B: σ = 234 МПа (на межі допустимого), f = 8,4 мм > 6 мм, m = 1,13 кг. Варіант B легший на 20 %, але не задовольняє умову жорсткості, тому прийнятним є A.

Контрольні запитання

1) Чому зменшення маси не завжди доцільне?
2) Який із двох критеріїв – міцність чи жорсткість – обмежує товщину в наведених варіантах?
3) Як врахувати вартість матеріалу в порівнянні?

9.6. Оптимізація параметрів обладнання за критерієм енергоефективності.

Мета. Знайти частоту обертання шнека транспортера, за якої питомі витрати енергії на переміщення матеріалу мінімальні.

Потужність приводу та продуктивність за експериментальною апроксимацією описуються залежностями (9.12). Коефіцієнти за варіантами подано в табл. 9.4. Обмеження: $100 \le n \le 400$ хв$^{-1}$; $Q \ge 12$ т/год.

Таблиця 9.4 – Вихідні дані до завдання 9.6 та контрольні результати

Варіант	P_0, кВт	a, кВт·хв	b, кВт·хв^2	c, т/(год·хв$^{-1}$)	$n_{опт}$, хв$^{-1}$	e_{min}, кВт·год/т
1	1,2	0,004	$2\cdot10^{-5}$	0,06	245	0,230
2	1,5	0,005	$3\cdot10^{-5}$	0,08	224	0,230
3	0,9	0,003	$1{,}5\cdot10^{-5}$	0,05	245	0,207
4	2,0	0,006	$4\cdot10^{-5}$	0,10	224	0,239
5	1,0	0,004	$2{,}5\cdot10^{-5}$	0,07	200	0,200
6	1,8	0,005	$2\cdot10^{-5}$	0,09	300	0,189

$$P(n) = P_0 + an + bn^2, \quad Q(n) = cn \tag{9.12}$$

$$e(n) = \frac{P(n)}{Q(n)} = \frac{P_0}{cn} + \frac{a}{c} + \frac{b}{c}n \qquad (9.13)$$

$$n^* = \sqrt{\frac{P_0}{b}} \qquad (9.14)$$

де P_0 – потужність холостого ходу, кВт;

a, b – коефіцієнти втрат, що залежать від швидкості;

c – коефіцієнт продуктивності, т/год на 1 хв$^{-1}$;

e – питомі витрати енергії, кВт·год/т; $n_{опт}$ – оптимальна частота.

1) Створіть у Excel таблицю з кроком n = 10 хв$^{-1}$, обчисліть P, Q, e і побудуйте графік $e(n)$.
2) Знайдіть мінімум функцією `=MIN()` та засобом «Пошук рішення» (Solver) з обмеженнями за n і Q.
3) Порівняйте результат із аналітичним значенням за формулою (9.14).

Приклад (варіант 1). $n_{опт} = \sqrt{(1{,}2/(2\cdot10^{-5}))} = 245$ хв$^{-1}$; $P = 1{,}2 + 0{,}004\cdot245 + 2\cdot10^{-5}\cdot245^2 = 3{,}38$ кВт; $Q = 0{,}06\cdot245 = 14{,}7$ т/год ≥ 12 т/год; $e_{min} = 3{,}38/14{,}7 = 0{,}230$ кВт·год/т.

Контрольні запитання

1) Чому питомі витрати мають мінімум, а не монотонно спадають?
2) Як зміниться $n_{опт}$ при збільшенні потужності холостого ходу?
3) Чому важливо перевіряти обмеження за продуктивністю?

10. ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ ТА ДИДАКТИЧНІ МАТЕРІАЛИ

Завдання 9.1–9.6 тренують інженерну сторону підготовки, завдання цього розділу - проєктування заняття. Технічну тему визначає варіант (табл. 10.1); звіти включають до електронного портфоліо (підрозділ 8.5).

Таблиця 10.1 – Вибір технічної теми для інженерних завдань

Варіант	Тема (завдання розділу 9)
1	Розрахунок механічної передачі в електронних таблицях (9.1)
2	Перевірка міцності вала (9.2)
3	3D-модель деталі сільськогосподарської машини (9.3)
4	Аналіз напружено-деформованого стану (9.4)
5	Порівняння двох варіантів робочого органу (9.5)
6	Оптимізація за енергоефективністю (9.6)

10.1. Розроблення технологічної карти практичного заняття.

Мета. Навчитися проєктувати заняття (80 хв) із вимірюваними цілями, узгодженими методами, цифровими засобами та контролем.
Завдання. За варіантом розробити технологічну карту практичного заняття (структура – додаток Ж).
Хід виконання.

1) Сформулюйте 2–3 вимірювані цілі за таксономією Блума.
2) Визначте вихідний рівень здобувачів і наявні цифрові засоби.
3) Розподіліть 80 хв за етапами: мотивація, нове знання, «я роблю – ми робимо – ти робиш», контроль, рефлексія.
4) Розробіть завдання трьох рівнів, підказки й проведіть експертизу карти.

Зміст звіту: технологічна карта (таблиця); завдання трьох рівнів з відповідями; самоаналіз ризиків.
Критерії (100 балів): цілі – 20; узгодженість методів і засобів – 20; розподіл часу – 15; диференційовані завдання – 20; труднощі й підказки – 10; оформлення – 10; самоаналіз – 5.
Контрольні запитання: 1) Чим мета заняття відрізняється від переліку тем? 2) Яку роль виконує етап рефлексії?

10.2. Створення цифрового навчального кейсу з інженерним розрахунком.

Мета. Опанувати розроблення кейса, у якому здобувачі розв’язують виробничу ситуацію цифровим інструментом. **Завдання.** На основі розрахунку з розділу 9 створити кейс: опис ситуації, дані, шаблон таблиці або моделі, питання до обговорення, еталонний розв’язок.

Хід виконання.

1) Сформулюйте виробничу ситуацію без вказівки способу розв’язання.
2) Підготуйте дані з одним-двома зайвими параметрами й одним неповним.
3) Створіть шаблон із захищеними формулами та перевіркою одиниць.
4) Складіть еталонний розв’язок і перевірте його незалежним способом.
5) Апробуйте кейс на одногрупнику та уточніть формулювання.

Зміст звіту: текст кейса й шаблон; еталонний розв’язок, очікувані помилки; результати апробації.

Критерії (100 балів): достовірність ситуації – 20; коректність даних і розв’язку – 25; шаблон – 20; питання на аналіз – 15; інструкція – 10; апробація – 10.

Контрольні запитання: 1) Чим кейс відрізняється від розрахункової задачі? 2) Навіщо в кейсі зайві або неповні дані?

10.3. Розроблення тесту з автоматичною перевіркою та аналіз його якості.

Мета. Навчитися складати завдання закритої форми у Google Forms, Microsoft Forms або Moodle й оцінювати їх якість кількісно. **Завдання.** Скласти тест із 10–12 завдань, налаштувати автоперевірку, провести пілотування на 15–30 респондентах і розрахувати показники якості.

Коефіцієнт легкості p – частка правильних відповідей; індекс дискримінації D показує здатність завдання розрізняти сильних і слабких:

$$p = \frac{N_{\text{прав}}}{N} \tag{10.1}$$

де $N_{\text{прав}}$ – кількість правильних відповідей на завдання;
N – кількість учасників.

$$D = \frac{N_{\text{в}} - N_{\text{н}}}{n} \tag{10.2}$$

де $N_{\text{в}}$, $N_{\text{н}}$ – правильні відповіді у верхній і нижній групах;
n – чисельність групи (27 % учасників, відсортованих за сумою балів).

Ілюстративний приклад (умовні дані, змодельовані в Python). $N = 30$, $n = 8$. Для завдання 3: $p = 9/30 = 0{,}30$; $D = (5 – 0)/8 = 0{,}62$ (табл. 10.2, рис. 10.1).

Таблиця 10.2 – Показники якості завдань (ілюстративні дані)

Завд.	$N_{\text{прав}}$	p	$N_{\text{в}}$	$N_{\text{н}}$	D	**Висновок**
1	25	0,83	8	3	0,62	легке
2	16	0,53	7	3	0,50	оптимальне
3	9	0,30	5	0	0,62	складне, розрізняє
4	9	0,30	6	0	0,75	складне, розрізняє
5	7	0,23	3	0	0,38	дуже складне
6	13	0,43	5	3	0,25	слабко розрізняє

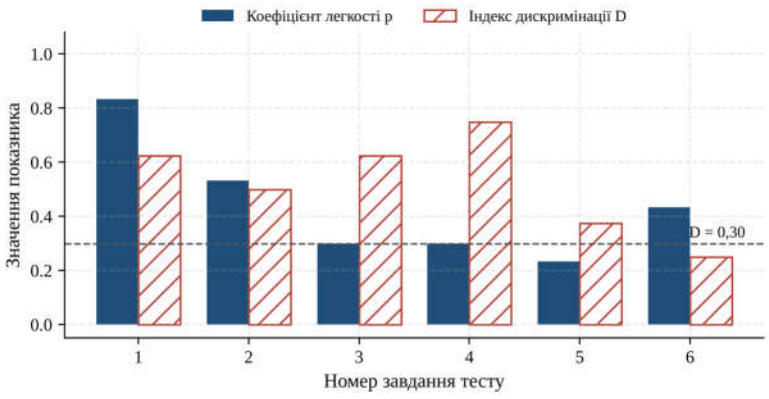


Рис. 10.1. Коефіцієнт легкості та індекс дискримінації завдань (ілюстративні дані)

Таблиця 10.3 – Інтерпретація показників (орієнтовні межі)

Показник	**Значення**	**Рішення**
p	< 0,20	дуже складне: перевірити ключ і тему

p	0,20–0,80	прийнятне
p	> 0,80	дуже легке: лише для актуалізації
D	≥ 0,40	добре розрізняє
D	< 0,30	переглянути; від’ємне – помилка в ключі

Хід виконання.

1) Складіть специфікацію: цілі за Блумом, кількість завдань, час.
2) Напишіть завдання; дистрактори будуйте на типових помилках.
3) Налаштуйте ключі, бали й зворотний зв’язок; проведіть пілотування.
4) Виділіть верхню й нижню групи, обчисліть p і D за формулами (10.1), (10.2).
5) Зробіть висновки за табл. 10.3 і доопрацюйте проблемні завдання.

Зміст звіту: специфікація й тест; таблиця показників і діаграма за зразком рис. 10.1; перелік змінених завдань.

Критерії (100 балів): специфікація – 20; якість завдань – 25; автоперевірка й зворотний зв’язок – 15; розрахунки – 20; аналіз і доопрацювання – 15; оформлення – 5.

Контрольні запитання: 1) Чому занадто легке завдання мало інформативне? 2) Що означає від’ємне D?

10.4. Розроблення рубрики оцінювання практичної роботи.

Мета. Навчитися складати аналітичну рубрику для прозорого оцінювання. **Завдання.** Розробити рубрику: 4–5 критеріїв, 4 рівні, ваги; перевірити на двох умовних роботах.

$$S = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{m} w_i l_i}{l_{\max}} \qquad (10.3)$$

де w_i – вага i-го критерію ($\sum w_i = 1$);

l_i – досягнутий рівень (0–3);

$l_{\max} = 3$; m – кількість критеріїв.

Приклад (табл. 10.4): ваги 0,30; 0,25; 0,25; 0,20, рівні 3; 2; 3; 1. Тоді $\sum w_i l_i = 0{,}9 + 0{,}5 + 0{,}75 + 0{,}2 = 2{,}35$ і $S = 100 \cdot 2{,}35/3 \approx 78{,}3$ бала.

Таблиця 10.4 – Зразок рубрики для роботи з електронними таблицями

Критерій (вага)	Рівень 3	Рівень 2	Рівень 1	Рівень 0
Розрахунок (0,30)	усе вірно, одиниці узгоджені	одна несуттєва помилка	суттєва помилка	відсутній
Структура (0,25)	дані, формули, результат розділені	частково	усе в одному блоці	хаотична
Перевірка (0,25)	незалежна, з висновком	без висновку	візуальна	немає
Звіт (0,20)	повний, з підписами	дрібні недоліки	неповний	відсутній

Хід виконання.

1) Визначте результати навчання й 4–5 спостережуваних критеріїв.
2) Опишіть рівні ознаками, що не перетинаються.
3) Призначте й обґрунтуйте ваги, перевірте суму.
4) Обчисліть бали двох умовних робіт за (10.3).
5) Проведіть калібрування з двома однокурсниками й скоригуйте формулювання.

Зміст звіту: розрахунки балів двох робіт; результат калібрування.
Критерії (100 балів): спостережуваність – 25; чіткість рівнів – 25; ваги – 15; розрахунки – 15; калібрування – 15; оформлення – 5.
Контрольні запитання: 1) Чим аналітична рубрика відрізняється від цілісної? 2) Як ваги впливають на оцінку?

10.5. Мікровикладання: проведення фрагмента заняття (15 хв) із взаємооцінюванням.

Мета. Відпрацювати проведення фрагмента заняття з цифровим інструментом. **Завдання.** За картою з 10.1 провести 15-хвилинну демонстрацію кроку розрахунку або моделювання та коротке завдання для одногрупників; спостерігачі заповнюють лист (табл. 10.5).

Примітка. *Максимум 8 балів; у 100-бальну шкалу переводять множенням на 100/8.*

Хід виконання.

1) Підготуйте ціль, сценарій, 2–3 запитання й резервний варіант на випадок збою.
2) Перевірте обладнання й демонстрацію екрана.
3) Проведіть фрагмент для 4–5 здобувачів (15 хв); спостерігачі заповнюють лист.
4) Проведіть обговорення «самоаналіз – думки колег – висновки» (10 хв).
5) Внесіть зміни в карту й зробіть запис у щоденнику за циклом Колба.

Лист взаємооцінювання. Рецензент указує виконавця й тему; суму балів за табл. 10.5; сильну сторону; одну конкретну пропозицію; рекомендацію «залишити / змінити / відмовитися» щодо цифрового засобу. Оцінює щонайменше двоє рецензентів, підсумок – середнє.

Зміст звіту: карта й сценарій; заповнені листи спостереження; самоаналіз і план змін.

Критерії (100 балів): підготовка – 20; проведення за листом – 40; якість рецензій – 15; самоаналіз – 20; регламент – 5.

Контрольні запитання: 1) Навіщо резервний план на випадок збою? 2) Які вимоги до конструктивного зворотного зв’язку?

10.6. Проєкт «Цифровий навчальний ресурс» (відеоінструкція, інтерактивний аркуш, віртуальна лабораторна) і портфоліо.

Мета. Створити цифровий ресурс, перевірити його якість. **Завдання.** За темою варіанта обрати тип ресурсу (відеоінструкція 3–5 хв із субтитрами; інтерактивний аркуш із 6–8 завдань і автоперевіркою; віртуальна лабораторна з трьома експериментами) і виконати проєкт.

Хід виконання.

1) Визначте аудиторію, мету й місце ресурсу в карті заняття.
2) Складіть сценарій або структуру ресурсу.
3) Створіть ресурс; розрахунки перевірте незалежним способом.
4) Апробуйте з двома користувачами й доопрацюйте.

5) Оформіть анотацію (мета, інструменти, участь ШІ) і додайте до портфоліо.

Зміст звіту: посилання на ресурс; анотація й інструкція; результати апробації; електронне портфоліо (підрозділ 8.5).

Критерії (100 балів): відповідність цілям – 20; правильність змісту – 25; зручність – 15; інструкція – 10; апробація – 15; портфоліо й рефлексія – 10; доброчесність і позначення ШІ – 5.

Контрольні запитання: 1) Як обрати тип ресурсу відповідно до цілі заняття? 2) Що забезпечує доступність відеоінструкції?

ВИСНОВКИ

Методичні рекомендації розкривають методику навчання майбутніх інженерів застосуванню цифрових інструментів для розрахунку, аналізу та оптимізації конструктивних параметрів машин і обладнання. Цифрову компетентність майбутнього інженера запропоновано розглядати як єдність мотиваційно-ціннісного, когнітивного, діяльнісного та рефлексивно-етичного складників. Для діагностики її сформованості визначено критерії, показники та три рівні – початковий, достатній і високий; інтегральний показник дає змогу порівнювати результати здобувачів до й після вивчення дисципліни.

Методична система охоплює цільовий, змістовий, процесуальний і діагностично-результативний компоненти. Формування готовності відбувається поетапно – від ознайомлення з інструментом до самостійного творчого застосування та професійної рефлексії. Ефективними є практико-орієнтовані методи: кейси, проєкти, «перевернуте» навчання, віртуальні лабораторії, мікровикладання та поступовий перехід відповідальності від викладача до здобувача.

Інженерний зміст – електронні таблиці, математичні пакети, цифрові калькулятори, CAD- і CAE-системи, методи однокритеріальної та багатокритеріальної оптимізації – подано разом із методикою його вивчення: цілями за таксономією Блума, диференційованими завданнями трьох рівнів, типовими труднощами та комплексними інженерними завданнями. Практичні приклади підтвердили, що комплексне застосування цифрових інструментів дозволяє знизити металоємність і енергоспоживання агроінженерного обладнання за збереження вимог до міцності й продуктивності.

Окрему увагу приділено штучному інтелекту. Його доцільно використовувати як допоміжний засіб – для генерування варіантів завдань, рубрик, пояснень і програмного коду, – але не як джерело

остаточних результатів. Основне правило: «ШІ пропонує, людина перевіряє».

Рекомендації щодо подальшої роботи

- використовувати діагностичний інструментарій із додатків як основу для власних розробок, адаптуючи їх до програми дисципліни та рівня підготовки групи;
- вести електронне портфоліо та рефлексивний щоденник, фіксуючи вихідні дані, допущення, версії програм і використання ШІ;
- регулярно перевіряти актуальність програмних засобів і умов їх ліцензування;
- перевіряти ефективність методики власним спостереженням і діагностикою, коригуючи завдання за результатами.

ДОДАТОК А. Приклади розрахункових таблиць

Розрахункову таблицю в Excel будують за схемою «вихідні дані – проміжні величини – результати – перевірка»; вихідні дані виділяють кольором, формули не змінюють вручну.

А.1. Розрахунок вала під зубчастим колесом

Вихідні дані: P = 7,5 кВт, n = 960 хв$^{-1}$, m = 3 мм, z = 20, кут зачеплення 20°, l = 200 мм (колесо посередині), $[\sigma]$ = 60 МПа (табл. А.1).

Примітка. *У локалізованому Excel роздільник аргументів – крапка з комою, десятковий роздільник – кома; значення перевірено розрахунком у Python.*

А.2. Перевірка підшипника кочення

Для опори вала діаметром 30 мм прийнято кульковий радіальний підшипник типу 6206 з динамічною вантажопідйомністю C = 19,5 кН (типове значення, уточнюється за каталогом виробника). Еквівалентне навантаження за відсутності осьової сили дорівнює реакції опори; ресурс обчислюють за формулою (А.1).

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n}\left(\frac{C}{P_e}\right)^3 \qquad \text{(А.1)}$$

де L_{10h} – ресурс, год;

n – частота обертання, хв$^{-1}$;

C – динамічна вантажопідйомність, Н;

P_e – еквівалентне навантаження, Н.

Перевірка підшипника 6206 (Excel/Python)

```
R = SQRT(F_t^2 + F_r^2)/2          = 1323 Н
L10 = (19500/R)^3                 = 3200 млн обертів
L10h = 10^6*L10/(60*960)          = 55 550 год  (> 20 000 год)
```

ДОДАТОК Б. Алгоритми виконання інженерних розрахунків

Б.1. Розрахунок і добір діаметра вала

Послідовність розрахунку вала подано на рис. Б.1.

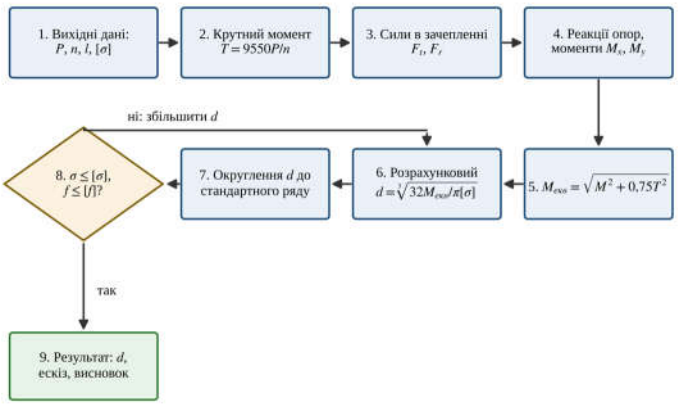


Рис. Б.1. Алгоритм розрахунку вала

Б.2. Ітераційний добір параметрів з обмеженням

Схему ітераційного добору наведено на рис. Б.2.

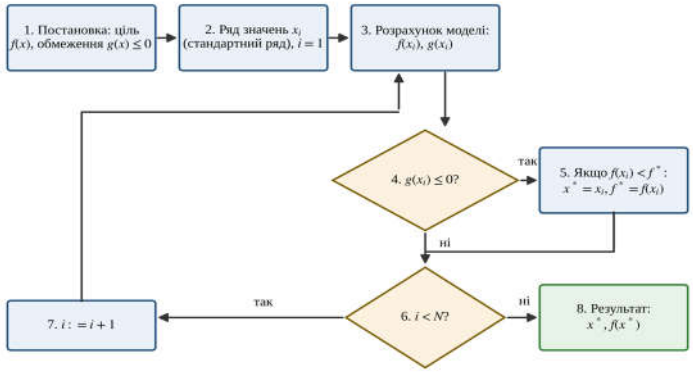


Рис. Б.2. Алгоритм ітераційного добору та оптимізації

Б.3. Псевдокод добору діаметра

Псевдокод

```
T = 9550 * P / n
Mekv = sqrt(M^2 + 0,75*T^2)
ДЛЯ КОЖНОГО d З РЯДУ [28; 30; 32; 35]:  sigma =
32*Mekv/(pi*d^3)
    ЯКЩО sigma <= sigma_dop:
        ВИВЕСТИ d, sigma, запас = sigma_dop/sigma
        ЗУПИНИТИ
ЯКЩО жоден d не підходить: змінити матеріал
```

Контрольний перелік

- одиниці в усіх формулах узгоджені (Н, мм, МПа);
- виконано перевірку граничних випадків;
- висновок містить числові значення та запас.

ДОДАТОК В. Приклади цифрових 3D-моделей

Три прості параметричні моделі доцільно відтворити у CAD-системі (FreeCAD, Onshape); їхні навчальні параметри подано в табл. В.1.

В.1. Ступінчастий вал



Рис. В.1. Ступінчастий вал. Ілюстрація параметричної моделі (побудована засобами Python/Matplotlib)

В.2. Шків (заготовка зубчастого колеса)



Рис. В.2. Шків (заготовка колеса). Ілюстрація параметричної моделі (побудована засобами Python/Matplotlib)

В.3. Кронштейн

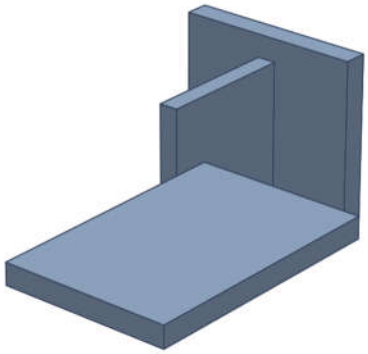


Рис. В.3. Кронштейн з ребром жорсткості. Ілюстрація параметричної моделі (побудована засобами Python/Matplotlib)

Таблиця В.1 – Основні параметри моделей

Модель	**Параметри, мм**
Ступінчастий вал	довжина 200; діаметри ділянок 25 / 30 / 36 / 30 / 25
Шків (заготовка колеса)	отвір 24; маточина 50 × 60; вінець 150 × 34; диск 14
Кронштейн	основа 120 × 80 × 10; стінка 10 × 70; ребро 8 × 60

В.4. Формати файлів і правила іменування

- **.FCStd**, **.step**, **.stl** – формат FreeCAD, обмінний формат і формат для друку;
- ім’я файла: Прізвище-Група-Деталь-vN (наприклад, Val-AI21-v2) без пробілів і спецсимволів;
- версії зберігають окремими файлами.

ДОДАТОК Г. Зразки оформлення результатів оптимізації

Мінімізація маси вала: змінна – діаметр d, обмеження – $\sigma \le [\sigma]$ = 60 МПа, довжина 200 мм, густина 7850 кг/м^3.

Г.1. Таблиця результатів

Примітка. *Початкове наближення – 48 мм; теоретична межа за міцністю 29,24 мм (маса 1,05 кг).*

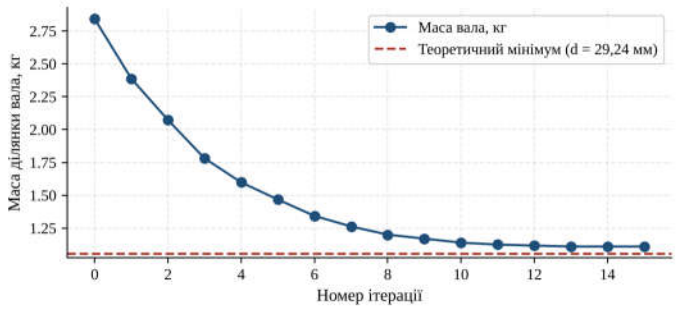


Рис. Г.1. Збіжність ітераційного процесу мінімізації маси

Г.2. Компромісні варіанти

Примітка. *Збільшення діаметра підвищує запас, але збільшує масу: варіанти не домінують один одного (множина Парето).*

Г.3. Зразок висновку

За результатами оптимізації мінімальну масу ділянки вала 1,11 кг забезпечує діаметр 30 мм зі стандартного ряду; напруження 55,6 МПа не перевищує допустимого 60 МПа, запас становить 1,08. За потреби більшого запасу доцільно прийняти 32 мм (запас 1,31, маса зростає на 14 %).

Контрольний перелік оформлення

- сформульовано ціль, змінні й обмеження;
- наведено таблицю ітерацій і графік збіжності;
- обрано варіант і обґрунтовано компроміс.

ДОДАТОК Д. Приклади запитів до інструментів ШІ для інженерних завдань

> **Запит 1. Пояснення методики розрахунку**
> Поясни покроково методику розрахунку [вала редуктора] на міцність при згині та крученні.

> **Запит 2. Перевірка розрахунку**
> Перевір мій розрахунок: [наведіть вихідні дані та кроки].

> **Запит 3. Побудова розрахункової таблиці Excel**
> Запропонуй структуру аркуша Excel для розрахунку [назва вузла]: стовпці Комірка, Показник, Формула, Значення, Одиниця.

> **Запит 4. Скрипт на Python**
> Напиши скрипт Python для розрахунку [величина] за формулою [формула].

> **Запит 5. Постановка задачі оптимізації**
> Допоможи сформулювати задачу оптимізації для [деталь]: цільова функція – [маса/вартість], змінні – [перелік], обмеження – [міцність, жорсткість, габарити].

> **Запит 6. Інтерпретація результатів**
> Ось результати розрахунків: [таблиця].

> **Запит 7. Параметри 3D-моделі**
> Запропонуй перелік параметрів для параметричної моделі [деталь] у [FreeCAD/Onshape] та послідовність побудови ескізів і операцій.

> **Запит 8. Добір матеріалу**
> Порівняй матеріали [сталь 45, сталь 40Х, алюмінієвий сплав] для [деталь] за критеріями міцності, маси, вартості й технологічності.

> **Запит 9. Структура звіту**
> Склади план звіту з практичної роботи «[тема]»: мета, вихідні дані, розрахунки, результати, висновки.

> **Запит 10. Пошук причин розбіжності**
> У мене розбіжність між ручним розрахунком ([значення]) і Excel ([значення]).

Д.1. Правила складання запитів

– указувати роль, мету, вихідні дані й одиниці;

– не передавати конфіденційні дані та персональну інформацію;
– усі числові результати перевіряти незалежним розрахунком.

Таблиця Д.1 – Типові помилки у запитах

Помилка	**Наслідок**	**Як виправити**
Немає вихідних даних	Загальна відповідь	Додати значення з одиницями
Не вказано мету й формат	Неструктурована відповідь	Вказати формат і обсяг
Передано службові дані	Витік інформації	Узагальнити, знеособити

ДОДАТОК Е. Рекомендований перелік цифрових інструментів

Для практичної частини доцільно використати доступні або безкоштовні інструменти.

Таблиця Е.1 – Рекомендовані цифрові інструменти

Інструмент	Призначення	Тип доступу	Примітки
Microsoft Excel	Інженерні розрахунки, таблиці, оптимізація	Ліцензійне ПЗ	Альтернативи: Google Sheets, LibreOffice Calc
FreeCAD	3D-моделювання деталей і вузлів	Вільне ПЗ	Параметричне моделювання; доступне для основних ОС
Onshape	Хмарне CAD-проєктування	Хмарний сервіс	Безкоштовний план для некомерційного використання – перевірте умови
GeoGebra	Математичне моделювання	Безкоштовний для некомерційного використання	Графіки функцій, геометрія, обчислення
SimScale	Інженерне моделювання та аналіз	Хмарний сервіс	Умови безкоштовного доступу змінюються – перевірте
ChatGPT	Допомога в розрахунках, аналізі та інтерпретації результатів	Сервіс ШІ	Альтернативи: Claude, Gemini, Copilot; відповіді перевіряти

Таблиця Е.2 – Рекомендований сценарій використання інструментів за етапами

Етап	Інструмент	Результат
Розрахунок	Excel, Python	Розрахункова таблиця
Оптимізація	Excel (Пошук рішення)	Оптимальні параметри
3D-модель	FreeCAD, Onshape	Модель, креслення
Аналіз міцності	SimScale	Поле напружень
Перевірка й звіт	Excel, ChatGPT	Висновки, звіт

Перед використанням будь-якого інструмента необхідно перевірити актуальні умови ліцензії та безкоштовного доступу на офіційному сайті розробника, а також правила закладу освіти щодо використання сервісів ШІ. Файли слід зберігати локально з резервним копіюванням.

ДОДАТОК Ж. Зразок технологічної карти практичного заняття

Таблиця Ж.1 – Технологічна карта заняття: тема «Параметрична 3D-модель ступінчастого вала та перевірка міцності»

Елемент	Зміст
Мета	Сформувати вміння будувати параметричну модель вала, перевіряти міцність в Excel і обґрунтовувати використання цих засобів у навчанні
Результати (за Блумом)	**Пояснити** роль параметрів; **побудувати** модель; **розрахувати** запас міцності; **порівняти** результати; **оцінити** пропозиції ШІ; **спроєктувати** фрагмент заняття для ПТНЗ
Тип, методи, засоби	Комбіноване практичне заняття; демонстрація, взаємоперевірка, мікровикладання; FreeCAD або Onshape, Excel, Moodle, ШІ-асистент (додаток К)
Диференційовані завдання	Р1: модель за кресленням, готовий аркуш. Р2: власна таблиця, підбір d для $n \geq 2$. Р3: галтель, дослідження $n(r)$, оцінка ШІ
Домашнє завдання, рефлексія	Спроєктувати 15-хвилинний фрагмент заняття з цією моделлю. Рефлексія: яку помилку виявлено перевіркою; де ШІ допоміг, а де ввів в оману
Критерії успіху	Розміри ±0,1 мм, перебудова параметром; розрахунок з висновком; зрозуміле пояснення; ШІ задокументовано

Таблиця Ж.2 – Хронометраж (80 хв), діяльність і формувальне оцінювання

Етап	хв	Викладач	Здобувачі	Оцінювання
Мотивація, актуалізація	15	Ставить проблему; міні-тест у Moodle	Формулюють мету, виконують тест	Автоперевірка, ≥ 60 %
Демонстрація	10	Показує ескіз, таблицю параметрів	Фіксують алгоритм	Спостереження
Моделювання	25	Консультує навідними запитаннями	Будують модель, змінюють параметри	Лист контролю
Розрахунок	15	Пояснює схему навантаження	Заповнюють аркуш Excel	Взаємоперевірка
Мікровикладання	10	Організовує пояснення в парах	Пояснюють крок; ШІ-перевірка	Рубрика
Рефлексія	5	Підсумовує, дає д/з	Заповнюють форму	Картка «зрозуміло / ні»
Разом	80			

ДОДАТОК И. Діагностичний інструментарій

(А) Анкета самооцінки. Шкала: 1 – зовсім не відповідає … 4 – повністю відповідає (табл. И.1).

Таблиця И.1 – Анкета цифрової компетентності

№	Твердження	Складник
1	Цікавлюся новими цифровими інструментами навчання	Мотиваційно-ціннісний
2	Вважаю цифрові засоби важливими для якості освіти	Мотиваційно-ціннісний
3	Прагну застосовувати їх на власних заняттях	Мотиваційно-ціннісний
4	Розумію принципи параметричного моделювання	Когнітивний
5	Вмію будувати й перевіряти розрахункову таблицю	Когнітивний
6	Знаю можливості й обмеження ШІ	Когнітивний
7	Будую 3D-модель за кресленням	Діяльнісний
8	Виконую й інтерпретую розрахунок в Excel	Діяльнісний
9	Створюю цифрове завдання в Moodle	Діяльнісний
10	Аналізую власні помилки в роботі з ІТ	Рефлексивно-етичний
11	Перевіряю відповіді ШІ й зазначаю його використання	Рефлексивно-етичний
12	Захищаю персональні дані	Рефлексивно-етичний

Показник складника $K_j = S_j/12$, де S_j – сума трьох балів. Інтегральний показник обчислюють за формулою (И.1).

$$K = \sum_{j=1}^{4} w_j K_j \qquad (И.1)$$

де w_j – ваги складників: 0,20; 0,25; 0,35; 0,20 (у зазначеному порядку), $\sum w_j = 1$.

Ілюстративний приклад. Суми балів $S = 10; 8; 7; 10$, тож $K_j = 0{,}833; 0{,}667; 0{,}583; 0{,}833$, а $K = 0{,}2\cdot0{,}833 + 0{,}25\cdot0{,}667 + 0{,}35\cdot0{,}583 + 0{,}2\cdot0{,}833 = 0{,}704 \approx 0{,}70$ (умовні дані).

(Б) Рівні сформованості: початковий – $K < 0{,}55$; достатній – $0{,}55 \le K \le 0{,}79$; високий – $K \ge 0{,}80$.

(В) Контрольний тест (ключ у дужках).

1) $T = 9550P/n$ при $P = 7{,}5$ кВт, $n = 960$ хв$^{-1}$: а) 7,5; б) 74,6; в) 746 Н·м (б).

2) *d* зросло з 30 до 36 мм; у скільки разів зросте $W \sim d^3$: а) 1,2; б) 1,44; в) 1,73 (в).
3) Параметрична модель дає: а) лише вигляд; б) перебудову зміною розміру; в) друк (б).
4) Із розрахунком ШІ слід: а) прийняти; б) перерахувати, перевірити одиниці; в) переслати учням (б).
5) Масу деталі дає: а) каркас; б) тверде тіло; в) растр (б).
6) У запит до ШІ не вводять: а) умову; б) прізвища й оцінки; в) тему (б).

(Г) Лист спостереження за мікровикладанням (0 – ні, 1 – частково, 2 – так; сума з 8).

Таблиця И.2 – Лист спостереження

Критерій	Бал	Коментар
Мету подано зрозуміло для учня		
Пояснення відповідає учням ПТНЗ		
Інструмент застосовано коректно, є перевірка		
Є запитання й зворотний зв’язок		

ДОДАТОК К. Приклади запитів до ШІ для викладача та майбутнього інженера

Значення в [квадратних дужках] замініть власними; відповідь ШІ – чернетка.

> **Запит 1. Варіанти вихідних даних**
> Створи [5] варіантів даних до задачі на міцність вала ([P] кВт, [n] хв^-1, [d] мм) і відповіді для самоперевірки.

> **Запит 2. Рубрика оцінювання**
> Створи рубрику для «[завдання]»: [4] критерії, [3] рівні, таблиця.

> **Запит 3. Результати навчання за Блумом**
> Сформулюй [4] результати навчання за Блумом для «[тема]» з дієсловами дії.

> **Запит 4. Тестові завдання**
> Створи [6] тестових завдань із «[тема]»; дистрактори – типові помилки; дай ключ.

> **Запит 5. Адаптація**
> Перепиши «[текст]» для здобувачів вищої освіти ([спеціальність]): просто, з прикладом, до [150] слів.

> **Запит 6. Сценарій відеоінструкції**
> Склади сценарій відео на [5] хв «[тема]»: таблиця «час – екран – текст».

> **Запит 7. Зворотний зв’язок**
> За рубрикою оціни знеособлену роботу [текст]: що добре – що виправити – крок.

> **Запит 8. Перевірка власної відповіді**
> Знайди помилки в розв’язку [текст] умови [умова], не переписуючи його.

Чого не слід передавати ШІ: персональні дані здобувачів; оцінки конкретних осіб; конфіденційні матеріали закладу, паролі.

П’ять правил верифікації: 1) перерахувати числа й одиниці незалежно; 2) звірити формули з підручником; 3) видалити вигадані джерела й функції; 4) узгодити зміст із рівнем здобувачів; 5) зафіксувати використання ШІ й відповідати за результат.

Таблиця К.1 – Ризики та способи їх зниження

Ризик	Спосіб зниження
Хибні або вигадані факти	Незалежна перевірка, звірка з джерелами
Витік даних	Знеособлення, правила закладу
Порушення доброчесності	Явне зазначення використання ШІ

Список використаних джерел:

1. Online optimization of adjustable settings for agricultural machinery assisted by digital twin / D. Guo et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 227. Art. 109504. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109504

2. Rud A. Design and analysis of hydraulic systems for automated agricultural machinery. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*. 2024. Vol. 20, No. 6. P. 121–137. DOI: 10.31548/forest/4.2024.56.

3. Construction method and case study of digital twin system for combine harvester / Y. Yin et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 226. Art. 109395. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109395

4. A comprehensive review of recent approaches and Hardware-Software technologies for digitalisation and intellectualisation of Open-Field crop Production: Ukrainian case study in the global context / I. Laktionov et al. *Computers and Electronics in Agriculture.* 2024. Vol. 225. Art. 109326. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109326.

5. Economic and environmental benefits of digital agricultural technologies in crop production: A review / G. Papadopoulos et al. *Smart Agricultural Technology*. 2024. Vol. 8. Art. 100441. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100441

6. Precision agriculture management based on a surrogate model assisted multiobjective algorithmic framework / D. Cheng et al. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Art. 1142. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-023-27990-w.

7. Lösch M., Schmidhalter U. Improving the congruency of satellite-based fertilizer maps with field-operable units using pneumatic spreaders. *Precision Agriculture*. 2023. Vol. 24. P. 1312–1332. DOI: 10.1007/s11119-023-09991-x.

8. A combined control method of traction and ballast for an electric tractor in ploughing based on load transfer / S. Zhang et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 207. Art. 107750. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107750

9. Improving path-tracking performance of an articulated tractor-trailer system using a non-linear kinematic model / M. Murillo et al.

Computers and Electronics in Agriculture. 2022. Vol. 196. Art. 106826. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106826

10. Task assignment of multiple agricultural machinery cooperation based on improved ant colony algorithm / R. Cao et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 182. Art. 105993. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.105993.

11. Тріщ Р. М., Грінченко Г. С. Сертифікація та підтвердження відповідності : навч. посіб. Харків : Друкарня Мадрид, 2021. 226 с.

12. Грінченко Г. С., Тріщ Р. М., Даниленко Ю. А. Науково-дослідні основи стандартизації : навч. посіб. Харків : Міськдрук, 2023. 254 с.

13. Управління якістю в системі технічного регулювання : навч. посіб. / Р. М. Тріщ, Г. С. Грінченко, В. М. Бурдейна, С. М. Артюх ; Укр. інж.-пед. акад. Харків : Укр. інж.-пед. акад., 2022. 219 с.

14. Models for Reducing the Duration and Cost of the Aviation Equipment Diagnostics Process Using the Decomposition of the Component Architecture of a Complex Product / O. Fedorovich et al. Information *Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2024. Vol. 221. P. 108–125. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_9.

15. Adaptive Algorithms for Quantization Error Normalization of Digital Encoder-Based Tachometers / V. Kukharchuk et al. *Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2024. Vol. 221. P. 259–269. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_19

16. Бабенко Д. В., Доценко Н. А., Горбенко О. А. Дослідження конструктивних і кінематичних характеристик енергоефективного олійного пресу. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science.* 2024. Вип. 28(3). С. 41-54. DOI: 10.56407/bs.agrarian/3.2024.41.

17. Бабенко Д. В., Доценко Н. А., Горбенко О. А., Бацуровська І. В. Дослідження характеру руху подрібненої маси по поверхні решіт сепаратора насіння овочевих та баштанних культур. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science.* 2023. Вип. 27(4). С. 18-35. DOI: https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/4.2023.18.

18. Babenko, D., Dotsenko, N., Gorbenko, O. Justification of the design parameters of improved equipment for tomato processing. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*. 2025. Vol. 29, No. 3. P. 9–22. DOI: https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/3.2025.09

19. Babenko, D., Dotsenko, N., Baczurovskaya, I. et al. Determination of the parameters of the use of water-lifting equipment in the conditions of livestock farms. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science.* 2022. Vol. 26, No. 3. P. 32–46. DOI: https://doi.org/10.56407/2313-092X/2022-26(3)-3.

20. Зубко В. М. Агроінжиніринг : навчальний посібник для здобувачів вищої освіти спеціальностей 208 «Агроінженерія», 202 «Агрономія». Суми : СНАУ, 2022. 468 с.

Навчальне видання

Використання цифрових інструментів для розрахунку, аналізу та оптимізації конструктивних параметрів машин і обладнання в агроінженерії

Методичні рекомендації

Укладач: **Доценко** Наталія Андріївна

Редактор: Н. А. Доценко

Комп'ютерний набір: Н. А.Доценко

Дизайн і верстка: Н. А. Доценко

Формат 60х84/16. Ум. друк. арк. 10,25
Тираж 15 прим. Зам. №_

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного аграрного університету.
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9