

**ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»**

**ІНЖИНІРИНГ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ГІРНИЧИХ І
МЕТАЛУРГІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ
методичні вказівки до виконання
практичних робіт**

Запоріжжя 2025

mip metinvest
polytechnic

УДК 621.313+622+669 (072)

М54

*Рекомендовано Науково-методичною радою
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
(протокол № від « » 2025 р.)*

Укладач

Шрамко Ю.Ю. канд. техн. наук,

М54 Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Інжиніринг електромеханічних систем гірничих і металургійних комплексів» / уклад. Ю. Ю. Шрамко. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2025. 62 с.

Методичні вказівки розроблено для здобувачів освіти спеціальності «Інжиніринг електропостачання та електромеханічних систем у металургії та гірництві» і призначено для забезпечення вивчення навчальної дисципліни «Інжиніринг електромеханічних систем гірничих і металургійних комплексів».

Матеріал спрямований на формування у студентів професійних компетентностей у сфері проєктування, аналізу, експлуатації та оптимізації електромеханічних систем, що застосовуються у гірничій і металургійній промисловості.

У методичних вказівках подано основні теоретичні положення, приклади розрахунків, індивідуальні завдання, порядок виконання і оформлення практичних робіт, а також питання для самоконтролю й критерії оцінювання результатів.

Видання призначене для використання під час проведення практичних занять та самостійної роботи здобувачів освіти з метою закріплення знань і набуття навичок інженерного аналізу електромеханічних систем гірничих і металургійних комплексів.

УДК 621.313+622+669 (072)

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТИНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	5
ПРАКТИЧНА РОБОТА 1. ОСНОВНІ ЕТАПИ ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЦІ	6
1.1. Основи теоретичні відомості	6
1.2 Програма роботи.....	10
1.3. Завдання та вихідні данні.	11
1.4. Критерії оцінювання.....	11
1.5. Питання для перевірки	13
1.6. Перелік рекомендованої літератури.	13
ПРАКТИЧНА РОБОТА 2. РОЗРОБКА ТА ОФОРМЛЕННЯ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ	15
2.1. Основи теоретичні відомості	15
2.2 Програма роботи.....	16
2.3. Завдання та вихідні данні.	16
2.4. Критерії оцінювання.....	17
2.5. Питання для перевірки	18
2.6. Перелік рекомендованої літератури.	19
ПРАКТИЧНА РОБОТА 3. ПІДГОТОВКА ТЕКСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ПРОЄКТУ.	20
3.1. Основи теоретичні відомості	20
3.2 Програма роботи.....	21
3.3. Завдання та вихідні данні.	21
3.4. Критерії оцінювання.....	22
3.5. Питання для перевірки	22
3.6. Перелік рекомендованої літератури.	23
ПРАКТИЧНА РОБОТА 4. АНАЛІЗ І ВИБІР ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДЛЯ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ	24
4.1. Основи теоретичні відомості	24
4.2 Програма роботи.....	27
4.3. Завдання та вихідні данні.	27
4.4. Критерії оцінювання.....	32
4.5. Питання для перевірки	33
4.6. Перелік рекомендованої літератури.	34
ПРАКТИЧНА РОБОТА 5. РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯТОРА	35
5.1. Основи теоретичні відомості	35
5.2 Програма роботи.....	36
5.3. Завдання та вихідні данні.	37
5.4. Критерії оцінювання.....	37
5.5. Питання для перевірки	38
5.6. Перелік рекомендованої літератури.	39
ПРАКТИЧНА РОБОТА 6. РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ КОМПРЕСОРНОЇ УСТАНОВКИ	40
6.1. Основи теоретичні відомості	40

6.2 Програма роботи.....	41
6.3. Завдання та вихідні данні.	42
6.4. Критерії оцінювання.....	43
6.5. Питання для перевірки	45
6.6. Перелік рекомендованої літератури.	46
ПРАКТИЧНА РОБОТА 7. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ	
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ СТРИЧКОВОГО КОНВЕЄРА	47
7.1. Основі теоретичні відомості	47
7.2 Програма роботи.....	48
7.3. Завдання та вихідні данні.	49
7.4. Критерії оцінювання.....	50
7.5. Питання для перевірки	51
7.6. Перелік рекомендованої літератури.	52
ПРАКТИЧНА РОБОТА 8. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ	
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВАНТАЖОПІДІЙМАЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ	53
8.1. Основі теоретичні відомості	53
8.2 Програма роботи.....	58
8.3. Завдання та вихідні данні.	58
8.4. Критерії оцінювання.....	60
8.5. Питання для перевірки	61
8.6. Перелік рекомендованої літератури.	62

ВСТУП

Практичні роботи з дисципліни «Інжиніринг електромеханічних систем гірничих і металургійних комплексів» є невід'ємною складовою навчального процесу та відіграють ключову роль у підготовці майбутніх фахівців. Вони спрямовані на закріплення й поглиблення теоретичних знань, отриманих під час лекцій, а також на формування практичних умінь і навичок, необхідних для аналізу, проєктування, експлуатації та діагностики електромеханічних систем, що застосовуються у гірничо-металургійній галузі.

Основними завданнями практичних занять є:

- формування вмінь аналізувати електричні схеми, характеристики та параметри обладнання;
- відпрацювання навичок розрахунку навантажень, вибору апаратів керування та захисту;
- використання спеціалізованого програмного забезпечення для моделювання та перевірки технічних рішень;
- набуття досвіду пошуку та усунення несправностей у системах електроприводу й електропостачання;
- формування здатності аргументовано обґрунтовувати технічні рішення та працювати в команді.

Виконання практичних робіт передбачає:

- попередню самостійну підготовку студента (опрацювання конспекту лекцій, довідкової та нормативної літератури);
- роботу з реальними технічними завданнями та прикладами виробничих ситуацій;
- оформлення результатів розрахунків, висновків і відповідей на контрольні питання у письмовому вигляді;
- дотримання правил техніки безпеки та культури оформлення технічної документації.

Підсумки виконання практичних завдань обговорюються на заняттях, що сприяє розвитку критичного мислення, комунікативних навичок, здатності до дискусії й самостійного прийняття рішень у професійній діяльності.

Результатом кожної практичної роботи є звіт, оформлений згідно з встановленими вимогами та поданий у систему Moodle. Оцінювання здійснюється відповідно до критеріїв, наведених у методичних рекомендаціях.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 1. ОСНОВНІ ЕТАПИ ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЦІ

Мета роботи. Закріпити знання про принципи та завдання інженерного проєктування електроприводів, навчитися формулювати вихідні дані, визначати вимоги до сучасних електроприводів і обґрунтовувати вибір технічних рішень.

1.1. Основи теоретичні відомості

Найпоширеніші завдання з проєктування електроприводів формулюються так: необхідно замінити застарілий електропривод установки на сучасний із покращеними технічними та економічними характеристиками; впровадити регульований електропривод замість нерегульованого; розробити вітчизняний аналог електроприводу для заміни імпортного, що не забезпечується запасними частинами; створити спеціальний електропривод для унікальної установки — випробувального стенду, транспортера чи іншого обладнання.

Водночас такі завдання не можна вважати простими, оскільки вони мають кілька можливих варіантів розв'язання, які в багатьох випадках є технічно рівноцінними. Вибір єдиного рішення, що підлягатиме реалізації, здійснюється на основі системи критеріїв з урахуванням технічних, економічних та експлуатаційних обмежень.

Формулювання задачі є початковим і надзвичайно важливим етапом проєктування електроприводу. На цьому кроці необхідно чітко визначити: що існує в даний момент, чому наявний стан не відповідає вимогам та яких якісних змін очікують після реалізації проєкту. При цьому не потрібні технічні деталі — достатньо лише окреслити ключові характеристики об'єкта «до» і «після» проєктування. Неправильне або неточне формулювання задачі створює високий ризик марної витрати ресурсів та часу на подальших етапах роботи.

Аналіз задачі є другим етапом проєктування. На цьому етапі здійснюється виявлення всіх суттєвих якісних і кількісних характеристик об'єкта як у вихідному стані (до проєктування), так і в кінцевому (після реалізації проєкту). Важливо визначити наявні обмеження — технічні, економічні, технологічні чи експлуатаційні — а також сформулювати критерії, за якими буде оцінюватися ефективність і якість створеного електроприводу.

Пошук можливих рішень є третім етапом проєктування. Він передбачає не лише застосування наявних знань, але й прояв креативного, нестандартного мислення. Важливо уникати як надмірного консерватизму, так і необґрунтованої поспішності у виборі напрямів. Значну допомогу на цьому етапі можуть надати аналіз аналогічних рішень (за умови критичної їх оцінки), проведення технічного пошуку, консультації з фахівцями та використання інноваційних підходів.

Навіть у найпростішому випадку доцільно сформулювати кілька можливих варіантів рішень, які в загальних рисах відповідають поставленому завданню. Чим ширшим є спектр запропонованих рішень, тим менша ймовірність упустити найкращий варіант. Такий підхід створює передумови для обґрунтованого вибору оптимального рішення на наступному етапі проектування.

Детальна розробка вибраного технічного рішення є п'ятим етапом проектування. На цьому кроці здійснюється остаточний вибір обладнання, проводяться необхідні розрахунки характеристик, розробляються алгоритми керування, виконується конструктивне компонування вузлів, а також оцінюються основні технічні та економічні показники. Цей етап є обов'язковим як у серйозних інженерних проєктах, так і в навчальних завданнях. Водночас, якщо попередні етапи були пропущені або виконані поверхово й без творчого підходу, то навіть найдетальніші розрахунки і рішення можуть виявитися неефективними.

Варто підкреслити, що процес проектування, як і будь-яка творча діяльність, не розвивається рівномірно та безперервно у прямолінійному напрямі. Навіть за умов жорстких обмежень у часі неминучими є повернення до попередніх кроків, уточнення та повтори. Типовий характер цього процесу подано на рис. 1.1. У якісних проєктах саме перші чотири етапи займають не менше 50 % загального часу. Саме на цьому етапі формується нове, обґрунтоване й оптимальне рішення, що перевершує вихідний стан системи.

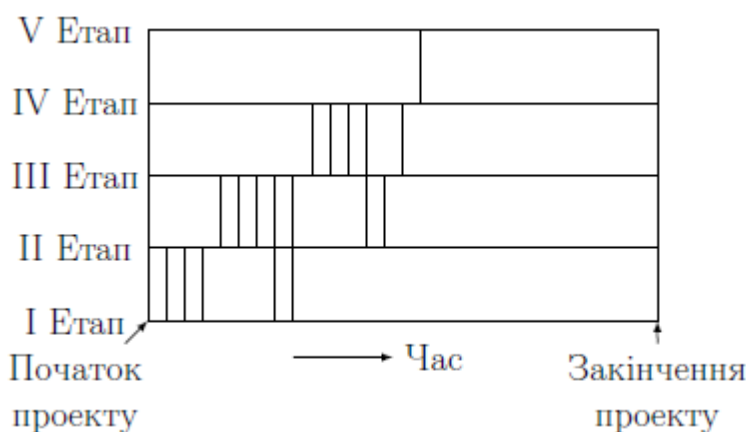



Рисунок 1.1 - Типовий графік проектування

Вибір двигуна є одним із найвідповідальніших етапів проектування електроприводу, оскільки саме двигун виконує електромеханічне перетворення енергії та значною мірою визначає технічні й економічні характеристики всієї системи. У межах даного завдання зосередимо увагу лише на виборі потужності двигуна, припускаючи, що його тип і спосіб керування вже визначені на попередніх етапах проектування.



Однією з ключових вимог до електродвигуна є забезпечення його надійної роботи при мінімальних капітальних та експлуатаційних витратах. Виконати цю вимогу можливо лише за умови правильного вибору потужності двигуна. Використання двигуна із завищеною потужністю призводить до необґрунтованого зростання капітальних вкладень, зниження коефіцієнта корисної дії, а для асинхронних машин — ще й до погіршення коефіцієнта потужності. Застосування двигуна недостатньої потужності, навпаки, може викликати порушення нормальної роботи механізму, підвищити ризик аварійних ситуацій і скоротити термін служби двигуна. Робота двигуна обмежується його нагріванням при тривалому навантаженні, а при короткочасних режимах — перевантажувальною здатністю.

Перевантажувальна здатність являє собою відношення максимального моменту, який здатний розвинути двигун хоча б короткочасно, до його номінального моменту

$$\lambda = \frac{M_{max}}{M_H}$$

Для різних типів електродвигунів існують специфічні обмеження їх максимального моменту.

Асинхронні двигуни: граничним є критичний момент, перевищення якого призводить до втрати стійкості роботи.

Синхронні двигуни: максимальний момент визначається умовою збереження стійкої роботи у синхронному режимі.

Двигуни постійного струму: обмеженням є та величина моменту, за якої процес комутації відбувається без небезпечного іскріння на колекторі.

Таким чином, під час вибору електродвигуна важливо враховувати не лише його номінальні параметри, але й граничні умови експлуатації, що визначають надійність і довговічність роботи приводу. Одним із основних обмежувальних факторів є нагрівання машини, яке пов'язане з теплостійкістю ізоляції її обмоток. За умови дотримання встановлених заводом-виробником температурних меж термін служби ізоляції електричних машин становить близько 10 років, що вважається нормальним строком експлуатації. Перевищення допустимих температур неприпустиме, оскільки воно різко скорочує ресурс ізоляції та, відповідно, термін служби електродвигуна.

Граничні температури обмоток двигунів з різними класами ізоляції відповідають номінальному навантаженні двигунів і температурі навколишнього середовища $t_{окр} + 40^{\circ}C$. Якщо діюче значення температури $t_{окр} < +40^{\circ}C$, то двигун без небезпеки перегріву може бути навантажений дещо більше номінального навантаження; при $t_{окр} > +40^{\circ}C$ навантаження двигуна повинна бути зменшена відносно номінальної.

При визначенні необхідної потужності електродвигуна основними вихідними даними є значення моментів, що мають передаватися на вал

механізму, а також необхідні швидкості та прискорення робочого органу. Ці параметри задаються вимогами конкретного технологічного процесу.

При визначенні необхідної потужності електродвигуна основними вихідними даними є значення моментів, що мають передаватися на вал механізму, а також необхідні швидкості та прискорення робочого органу. Ці параметри задаються вимогами конкретного технологічного процесу.

Завдання ускладнюється тим, що в динамічному режимі момент, який розвиває двигун, відрізняється від статичного моменту навантаження. Різниця між ними становить так званий динамічний момент, величина якого залежить від сумарного моменту інерції приводу, включно з власним моментом інерції двигуна. Саме тому при розрахунках необхідно враховувати не лише статичні, а й динамічні характеристики системи.

Методика вибору потужності електродвигуна

1. Визначення характеру навантаження

- Проаналізувати робочий механізм: чи є навантаження постійним, змінним, ударним, періодичним.
- Встановити вид моменту: сталий, зростаючий із швидкістю, обернено пропорційний швидкості тощо.
- Скласти графік навантаження за часом (момент $M(t)$, швидкість $n(t)$).

2. Обчислення еквівалентних параметрів

Для порівняння з потужністю двигуна розраховують:

- Еквівалентний момент

$$M_{eq} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T M^2(t) dt}$$

- Еквівалентну потужність

$$P_{eq} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt$$

де T — тривалість циклу роботи.

3. Вибір номінальної потужності двигуна

Потужність двигуна повинна задовольняти умову:

$$P_n \geq P_{eq} \cdot K_3$$

де K_3 — коефіцієнт запасу (залежно від типу навантаження).

4. Перевірка за нагрівом і перевантажувальною здатністю

- Порівняти розрахований еквівалентний момент з допустимим для вибраного двигуна.

- Перевірити можливість двигуна витримувати короточасні пікові моменти:

$$M_{max.д} \geq M_{max.н}$$

де $M_{max.д}$ — допустимий максимальний момент двигуна,
 $M_{max.н}$ — найбільший момент навантаження.

5. Коригування вибору

У випадку невідповідності необхідно:

- збільшити номінальну потужність двигуна;
- змінити систему керування (наприклад, застосувати частотний перетворювач);
- оптимізувати механічні параметри робочого механізму.

Серед основних етапів проектування електромеханічних систем (систем автоматизації та електроприводу) слід виділити такі:

- Дослідження об'єкта автоматизації, збір вихідних даних, проведення випробувань.
- Складання ТЗ. Техніко-економічна пропозиція. Моделювання.
- Розробка технічної документації.
- Виготовлення дослідних зразків.
- Дослідна експлуатація.
- Доопрацювання та виправлення.
- Попередній монтаж. Транспортування. Збірка і монтаж. Наладка.
- Перевірка і випробування ЕМС.

1.2 Програма роботи

Методика виконання проектних робіт в електромеханіці.

Методика виконання проектних робіт (документування) при розробці електроприводу в більшості випадків зводиться до вирішення типових інженерних задач, серед яких слід відзначити такі:

- Розрахунок і побудова кінематичної схеми механізму, навантажувальних діаграм.
- Розрахунок потужності електроприводу і режиму роботи двигуна.
- Вибір типу двигуна. (постійний (ДПС НЗ, ДПС ПЗ, ДПТ ЗЗ) / змінний струм (АКЗ, АКЗФ, СД, КД))
- Перевірка обраного електроприводу по нагріванню, перевантажувальній здатності.
- Вибір і розрахунок параметрів перетворювальної техніки. (Частотні перетворювачі, трансформатори)

- Вибір способу подачі електроенергії в установку. (Шини, система генераторів)
- Вибір і розрахунок елементів захисту, сигналізації та управління приводом. (захисту по струму, по нагріву, по КЗ)
- Побудова структурної електричної схеми об'єкта.
- Розробка електричної принципової схеми. Схеми живлення установки.
- Складання специфікації обладнання.
- Розробка схем з'єднань внутрішніх і зовнішніх.
- Розробка схем підключень пристроїв.
- Розробка схем монтажу пристроїв та розташування.

1.3. Завдання та вихідні данні

Варіанти:

- ЕП стрічкового транспортера
- шнекового транспортера
- подачі металообробного верстата
- відцентрового компресора
- вентилятора
- відцентрового насоса
- лебідки
- кругорізального верстата
- обертає шарової печі
- барабанної сушарки
- перемішувального пристрою
- механізм пересування візка мостового крана
- Механізм з теми дипломного проєкту.

1.4. Критерії оцінювання

Зміст звіту про виконання роботи

1. Титульна сторінка — назва дисципліни, тема практичної роботи, П.І.Б. студента, група, дата виконання.
2. Мета роботи — коротко зазначити навчальну мету, сформульовану у методичних вказівках.
3. Основні теоретичні відомості — короткий виклад суті етапів проєктування технічних систем, принципів вибору потужності електродвигуна, факторів, що впливають на надійність і довговічність роботи електроприводу.
4. Вихідні дані та завдання — вказати варіант (тип механізму або установки) та необхідні початкові параметри.

5. Хід виконання роботи — опис основних етапів розрахунків, аналіз навантаження, визначення еквівалентного моменту, вибір потужності двигуна, перевірка за нагрівом і перевантажувальною здатністю.

6. Результати розрахунків — зведені таблиці, формули, графіки навантаження або характеристики.

7. Висновки — узагальнення отриманих результатів, оцінка правильності вибору потужності та рекомендації щодо покращення параметрів електроприводу.

8. Відповіді на контрольні питання — короткі письмові відповіді на запитання, подані у методичних вказівках.

Підготовлена згідно методичних вказівок робота у форматі файлу *.docx або *.pdf розміщується у відповідному розділі дисципліни в Moodle та перевіряється протягом тижня після здачі. Оскарження оцінки може бути здійснене не пізніше двох тижнів з моменту оцінювання роботи.

Критерії оцінювання виконання практичних робіт (максимум балів за роботу 5).

Розподіл балів за контрольними точками та графік їх виконання:

- 81-100 % від макс. балів – повна відповідність попередньому критерію, також ініціативність студента у роботі над проблемою, логічність та структурованість вербальної відповіді під час навчальної дискусії, здатність комунікувати у команді та під впливом негативних факторів, у т.ч. під тиском викладача та/або групи, вміння вести дискусію та бути критичним та самокритичним;

- 61-80 % від макс. балів – всі досліді/розрахунки виконані релевантно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно;

- 41-60 % від макс. балів – досліді/розрахунки виконані релевантно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно;

Участь у дискусії під час захисту практичних робіт (20 % від макс. балів).


Оцінюється ініціативність студента у роботі над проблемою, логічність і структурованість вербальної відповіді, здатність ефективно комунікувати в команді, збереження конструктивної позиції під впливом негативних факторів (у тому числі під тиском викладача та/або групи), вміння аргументовано вести дискусію, проявляти критичність і самокритичність.

1.5. Питання для перевірки

1. Які завдання найчастіше ставляться при проектуванні електроприводів?
2. Чому формулювання задачі є ключовим етапом проектування?
3. Що передбачає другий етап — аналіз задачі?
4. Яку роль відіграє пошук можливих рішень і чому важливо мати кілька варіантів?
5. У чому полягає сутність етапу детальної розробки технічного рішення?
6. Чому процес проектування не є прямолінійним і які фактори зумовлюють повернення до попередніх етапів?
7. Чому вибір двигуна вважається одним з найвідповідальніших етапів проектування електроприводу?
8. Які наслідки може мати застосування двигуна завищеної потужності?
9. Які ризики виникають при використанні двигуна недостатньої потужності?
10. Що таке перевантажувальна здатність двигуна і як вона визначається?
11. Які обмеження максимального моменту існують для асинхронних двигунів?
12. Які обмеження максимального моменту існують для синхронних двигунів?
13. Які обмеження максимального моменту існують для двигунів постійного струму?
14. Чому теплостійкість ізоляції є важливим фактором довговічності електродвигуна?
15. Які вихідні дані необхідні для визначення потрібної потужності електродвигуна?
16. Чим відрізняються статичний і динамічний моменти навантаження?

1.6. Перелік рекомендованої літератури

1. Інжиніринг електротехнічних та мехатронних систем : конспект лекцій / О. В. Чермалих, О. В. Данілін, А. В. Босак, Л. В. Торопова. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 77 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/8b65a8e0-5c0e-4a09-b23b-b303d62ac722/content>
2. Васи́лега П. О., Мури́ков, Д. В. Електропривод робочих машин : навч. посіб. Суми : Університетська книга, 2006. 228 с.
3. Трегуб В. Г. Проектування систем автоматизації : навч. посібник. Київ : Видавництво Ліра-К. 2019. 344 с.



4. Інжиніринг електротехнічних та мехатронних систем: підруч. для здобувачів ступеня магістра за спец. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / А. В. Босак, А. В. Торопов, Л. В. Торопова. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 251 с.

5. Енергозберігаючі режими роботи насосних і вентиляторних установок з автоматизованим електроприводом : навчальний посібник. 2-ге видання, перероблене і доповнене / Т. В. Коренькова, О. О. Сердюк, В. Г. Ковальчук, С. А. Сергієнко. Кременчук : Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2023. 194 с.

6. Транспортні системи електромеханічних комплексів: Конспект лекцій : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад.: С. В. Зайченко, В. А. Побігайло, В. Г. Дубовик. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 136 с.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 2. РОЗРОБКА ТА ОФОРМЛЕННЯ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

Мета роботи. Набуття практичних навичок у розробленні технічного завдання на створення або модернізацію електромеханічної системи відповідно до вимог чинних стандартів ДСТУ та ІЕС.

2.1. Основи теоретичні відомості

Технічне завдання (ТЗ) є вихідним документом, який визначає вимоги до створення системи, пристрою або інформаційного продукту. Воно слугує базою для розроблення, узгодження та подальшої перевірки відповідності кінцевого результату початковим вимогам замовника.

Підготовка технічного завдання здійснюється після проведення аналізу предметної області, збору вихідних даних і розроблення аналітичного звіту. У звіті визначаються потреби замовника, основні функції майбутньої системи, умови експлуатації, вимоги до надійності, безпеки, енергоспоживання, сумісності та ергономіки.

Структура технічного завдання повинна забезпечувати повне розкриття характеристик системи. Відповідно до вимог ДСТУ 3973-2000 та міжнародних стандартів ІЕС 81346-1, ISO/ІЕС 15288, типовими розділами ТЗ є:

- Загальні відомості про систему: найменування, скорочення, учасники проєкту (замовник, виконавець).
- Підстави для розроблення: нормативні документи, накази, контракти, інвестиційні плани.
- Призначення та мета системи: визначення функціонального призначення, ролі в технологічному процесі.
- Вимоги до системи: функціональні, технічні, експлуатаційні, вимоги безпеки, надійності та сумісності.
- Вимоги до забезпечення: інформаційного, математичного, програмного, технічного, організаційного.
- Вимоги до документації: склад і зміст проєктних, експлуатаційних та супровідних документів (згідно з ДСТУ EN 62023:2019).
- Стадії та етапи розроблення: послідовність проєктних робіт і терміни виконання.
- Порядок контролю та приймання: методи випробувань, критерії відповідності системи вимогам ТЗ.

Чим точніше складене технічне завдання, тим ефективніше забезпечується взаєморозуміння між замовником і виконавцем, зменшуються витрати часу на погодження та усунення недоліків у процесі приймання проєкту.

2.2 Програма роботи

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями про зміст і структуру технічного завдання.
2. Вивчити вимоги нормативних документів (ДСТУ 3973-2000, ISO/IEC 15288, IEC 81346-1).
3. Визначити призначення, склад і функції електромеханічної системи згідно з індивідуальним варіантом завдання.
4. Розробити проєкт технічного завдання на створення або модернізацію електромеханічної системи керування (EMC).
5. Оформити документ відповідно до вимог стандартів ЄСКД та корпоративного шаблону оформлення проєктної документації.
6. Подати результати у вигляді оформленого тексту технічного завдання з усіма основними розділами.

2.3. Завдання та вихідні дані

Завдання:

Розробити технічне завдання на створення або модернізацію електромеханічної системи.

Вихідні дані:

- Об'єкт проектування — електромеханічна система або вузол, наведений у варіанті завдання.
- У складі системи передбачити електропривід, контрольно-вимірювальні та комутаційні пристрої, елементи керування, захисту й сигналізації.
- Результат роботи — документ «Технічне завдання на електромеханічну систему (EMC)» з такими розділами:
 1. Загальні відомості.
 2. Призначення та мета системи.
 3. Вимоги до системи.
 4. Вимоги до забезпечення.
 5. Вимоги до документації.
 6. Стадії та етапи розроблення.
 7. Порядок контролю та приймання.

Варіанти об'єктів для індивідуального виконання

1. Розробити технічне завдання на електропривід стрічкового конвеєра з частотним регулюванням швидкості.
2. Технічне завдання на електропривід візка мостового крану з перетворювачем частоти.
3. Розробити ТЗ на електропривід підйомного механізму шахтної кліті з контролем навантаження на канаті.
4. ТЗ на електропривід насосної установки для рециркуляції технічної води з автоматичним регулюванням тиску.

5. Розробити ТЗ на електропривід подачі металорізального верстата з позиційним керуванням.
6. ТЗ на електропривід барабанної сушарки з підтриманням температурного режиму.
7. Розробити ТЗ на електропривід вентилятора димовидалення доменної печі.
8. ТЗ на електропривід обертання шарової печі з контролем частоти та моменту навантаження.
9. Розробити ТЗ на електропривід транспортування концентрату в агломераційному виробництві.
10. ТЗ на електропривід дозатора сипких матеріалів з ваговим контролем.

2.4. Критерії оцінювання

Звіт має бути виконаний у письмовій формі та містити такі розділи:

1. Титульна сторінка — за встановленим зразком.
2. Мета роботи — коротко зазначити навчальну та практичну ціль.
3. Короткі теоретичні відомості — основні поняття про технічне завдання, його призначення та структуру.
4. Хід виконання роботи — послідовність дій під час розроблення ТЗ.
5. Індивідуальне завдання — тема (об'єкт), обрана за варіантом.
6. Результати виконання — оформлений текст “Технічного завдання” із зазначенням усіх його розділів.
7. Висновки — стислий аналіз результатів, набуті навички.
8. Список використаних джерел — оформлений за ДСТУ 8302:2015.
9. Додатки (за потреби) — схеми, таблиці, креслення.

Підготовлена згідно методичних вказівок робота у форматі файлу *.docx або *.pdf розміщується у відповідному розділі дисципліни в Moodle та перевіряється протягом тижня після здачі. Оскарження оцінки може бути здійснене не пізніше двох тижнів з моменту оцінювання роботи.

Критерії оцінювання виконання практичних робіт (максимум балів за роботу 5).

Розподіл балів за контрольними точками та графік їх виконання:

- 81-100 % від макс. балів – повна відповідність попередньому критерію, також ініціативність студента у роботі над проблемою, логічність та структурованість вербальної відповіді під час навчальної дискусії, здатність комунікувати у команді та під впливом негативних факторів, у т.ч. під тиском викладача та/або групи, вміння вести дискусію та бути критичним та самокритичним;

• 61-80 % від макс. балів – всі досліді/розрахунки виконані релевантно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно;

• 41-60 % від макс. балів – досліді/розрахунки виконані релевантно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно;

Участь у дискусії під час захисту практичних робіт (20 % від макс. балів).

Оцінюється ініціативність студента у роботі над проблемою, логічність і структурованість вербальної відповіді, здатність ефективно комунікувати в команді, збереження конструктивної позиції під впливом негативних факторів (у тому числі під тиском викладача та/або групи), уміння аргументовано вести дискусію, проявляти критичність і самокритичність.

2.5. Питання для перевірки

1. Що таке технічне завдання і яку роль воно відіграє в процесі проектування?

2. Які основні розділи повинен містити документ технічного завдання?

3. Які нормативні документи регламентують зміст і оформлення ТЗ в Україні?

4. Чим відрізняються функціональні вимоги від технічних вимог у ТЗ?

5. Які відомості зазначаються у розділі «Загальні відомості» технічного завдання?

6. Для чого визначаються вимоги до видів забезпечення (програмного, технічного, інформаційного)?

7. Які основні етапи розроблення електромеханічної системи зазначаються в ТЗ?

8. Які вимоги пред'являються до надійності та безпеки системи?

9. Що повинно міститися у розділі «Порядок контролю та приймання системи»?


10. Яким чином визначаються умови експлуатації в технічному завданні?

11. Які відмінності між технічним завданням і пояснювальною запискою до проєкту?

12. Як здійснюється узгодження ТЗ між замовником і виконавцем?

13. Які помилки найчастіше виникають під час складання технічного завдання?

14. Як у ТЗ відображаються вимоги до метрологічного та енергетичного забезпечення системи?



15. Які переваги надає чітке структурування ТЗ для подальших етапів проєктування?

2.6. Перелік рекомендованої літератури

1. ДСТУ 3973-2000. Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Правила виконання науково-дослідних робіт. Загальні положення. [Чинний від 2001-07-01]. Вид. офіц. Київ, 2000.

2. ДСТУ EN 81346-1:2022 Промислові системи, установки, обладнання та промислові вироби. Принципи структурування та посилення позначення. Частина 1. Основні правила (EN 81346-1:2009, IDT; IEC 81346-1:2009, IDT). [Чинний від 2023-12-31]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 84 с.

3. ДСТУ ISO/IEC/IEEE 15288:2016 Інженерія систем і програмного забезпечення. Процеси життєвого циклу систем (ISO/IEC/IEEE 15288:2015, IDT). [Чинний від 2018-01-01]. Вид. офіц. Київ, 2016. 89 с.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 3. ПІДГОТОВКА ТЕКСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ПРОЄКТУ

Мета роботи. Набуття практичних навичок підготовки, структурування та оформлення текстових матеріалів проєкту (пояснювальної записки, специфікації обладнання, відомості потреби в матеріалах) відповідно до вимог чинних стандартів — ДСТУ 3008:2015, ДСТУ 8302:2015 та ЄСКД. Закріплення знань щодо принципів документування результатів інженерного проєктування в електромеханіці та формування компетентностей зі створення повного пакета технічної документації для електромеханічних систем.

3.1. Основі теоретичні відомості

Підготовка текстових матеріалів проєкту є одним із ключових етапів інженерної діяльності, що забезпечує узгодженість технічних рішень, зрозумілість для всіх учасників проєкту та можливість подальшого впровадження результатів у виробництво. Текстова частина проєкту відображає логіку розробки, описує прийняті рішення, технічні характеристики, методи розрахунків і вимоги до експлуатації обладнання.

До основних складових текстових матеріалів належать:

- титульний аркуш, завдання на проєктування, зміст;
- вступ, який обґрунтовує актуальність та мету розробки;
- аналітична частина з аналізом об'єкта або системи;
- розрахунково-технологічна частина з методами і формулами розрахунків;
- конструкторська частина з описом принципів роботи вузлів або схем;
- охорона праці, екологічна безпека, енергозбереження;
- висновки та список використаних джерел.

Оформлення текстових матеріалів виконується відповідно до вимог стандартів:

- ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання;
- ДСТУ 8302:2015 Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання;
- ЄСКД (Єдина система конструкторської документації) – для опису технічних рішень;
- ПУЕ, ДБН, ДСТУ EN – для технічних і експлуатаційних вимог.

Якість текстової частини визначається логічністю викладення, науковою точністю, структурованістю, відсутністю орфографічних і стилістичних помилок, а також наявністю посилань на використані джерела.

3.2 Програма роботи

1. Ознайомитись із вимогами до структури і оформлення пояснювальної записки проекту.
2. Визначити перелік основних розділів і підрозділів відповідно до теми проекту.
3. Розробити вступну частину (актуальність, мета, завдання).
4. Підготувати аналітичну або теоретичну частину з описом об'єкта чи системи.
5. Сформулювати розрахунково-технічну частину з прикладами розрахунків.
6. Підготувати висновки і пропозиції щодо подальшої реалізації проекту.
7. Оформити список використаної літератури згідно з ДСТУ 8302:2015.
8. Перевірити правильність нумерації, таблиць, рисунків, формул і посилань.

3.3. Завдання та вихідні данні

1. На основі отриманих вихідних технічних даних (з практичної роботи №2 або індивідуального завдання) підготувати текстову частину пояснювальної записки.
2. Оформити документ відповідно до структури:
 - титульна сторінка;
 - зміст;
 - вступ;
 - основна частина (аналітична, розрахункова, конструкторська тощо);
 - висновки;
 - список джерел.
3. Використати єдиний стиль нумерації (трирівнева: 1, 1.1, 1.1.1).
4. Обсяг тексту – 10–15 сторінок друкованого тексту.
Варіанти індивідуальних завдань:
 - Підготувати текстову частину проекту системи електроприводу конкретного механізму.
 - Описати алгоритм роботи автоматизованої установки.
 - Розробити опис системи керування електромеханічним комплексом.
 - Сформулювати пояснювальну записку до модернізації електротехнічного обладнання.

3.4. Критерії оцінювання

Звіт повинен містити:

- мету та короткий опис роботи;
- зміст виконаної текстової частини;
- висновки про виконання завдання;
- оформлений список використаних джерел.

Підготовлена згідно методичних вказівок робота у форматі файлу *docx або *pdf розміщується у відповідному розділі дисципліни в Moodle та перевіряється протягом тижня після здачі. Оскарження оцінки може бути здійснене не пізніше двох тижнів з моменту оцінювання роботи.

Критерії оцінювання виконання практичних робіт (максимум балів за роботу 5).

Розподіл балів за контрольними точками та графік їх виконання:

- 81-100 % від макс. балів – повна відповідність попередньому критерію, також ініціативність студента у роботі над проблемою, логічність та структурованість вербальної відповіді під час навчальної дискусії, здатність комунікувати у команді та під впливом негативних факторів, у т.ч. під тиском викладача та/або групи, вміння вести дискусію та бути критичним та самокритичним;

- 61-80 % від макс. балів – всі досліді/розрахунки виконані релевантно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно;


- 41-60 % від макс. балів – досліді/розрахунки виконані релевантно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно;

Участь у дискусії під час захисту практичних робіт (20 % від макс. балів).

Оцінюється ініціативність студента у роботі над проблемою, логічність і структурованість вербальної відповіді, здатність ефективно комунікувати в команді, збереження конструктивної позиції під впливом негативних факторів (у тому числі під тиском викладача та/або групи), вміння аргументовано вести дискусію, проявляти критичність і самокритичність.

3.5. Питання для перевірки

1. Які основні структурні елементи має текстова частина проєкту?
2. Яке призначення вступної частини пояснювальної записки?
3. Які нормативні документи регламентують оформлення текстових матеріалів?
4. Які вимоги висуваються до бібліографічних посилань?
5. Які відмінності між аналітичною та розрахунковою частиною проєкту?

- 
6. Як правильно нумеруються таблиці, рисунки та формули?
 7. Які особливості оформлення технічних розрахунків?
 8. Які типові помилки допускаються при підготовці текстових матеріалів?
 9. Що включають висновки та які вимоги до їх оформлення?
 10. Які критерії визначають якість текстової частини інженерного проекту?

3.6. Перелік рекомендованої літератури

1. ДСТУ 3008-2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. [На заміну ДСТУ 3008-95 ; чинний від 2017-07-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 31 с. URL: http://www.knmu.kharkov.ua/attachments/3659_3008-2015.PDF
2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. [Чинний від 2016-07-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
3. ДСТУ ГОСТ 2.001:2006. Єдина система конструкторської документації. Загальні положення. Зі зміною № 1 (ГОСТ 2.001-93, IDT). [На заміну [ГОСТ 2.001-70](#) ; чинний від 2007-01-01]. Вид. офіц. ДП «УкрНДНЦ», 2006.
4. ПУЕ Правила улаштування електроустановок. [На заміну ПУЕ-86; чинні від 2017-08-21]. Вид. офіц. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 4. АНАЛІЗ І ВИБІР ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДЛЯ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

Мета роботи. Ознайомитись із принципами побудови та аналізу насосних електроприводів; набути практичних навичок розрахунку гідравлічних параметрів системи, визначення статичного напору, втрат у трубопроводах та побудови характеристик «насос – система»; навчитись визначати робочу точку насосної установки, розраховувати необхідну потужність і крутний момент електродвигуна, здійснювати вибір типу й номінальної потужності електроприводу; оцінити вплив способу регулювання швидкості (дросельного, частотного) на енергетичну ефективність роботи насосної установки.

4.1. Основі теоретичні відомості

Насосні установки є ключовими елементами систем транспортування рідин у промисловості, комунальному господарстві, гірничій та металургійній галузях. Основне завдання насосної установки полягає у забезпеченні необхідного об'єму рідини (подачі) при заданому тиску (напорі) для підтримання технологічних або експлуатаційних процесів.

Ефективність роботи насосної системи визначається взаємним узгодженням гідравлічних характеристик насоса, трубопровідної мережі та електроприводу. Саме електропривод забезпечує перетворення електричної енергії у механічну і визначає стабільність, точність та економічність функціонування всієї установки.

Насоси класифікуються за принципом дії на такі основні типи:

- Динамічні насоси (гідродинамічні) – відцентрові, осьові, діагональні; забезпечують безперервний рух рідини завдяки передачі їй енергії робочим колесом.
- Об'ємні насоси – поршневі, плунжерні, шестеренні, мембранні; створюють напір за рахунок періодичного зміщення об'єму робочої камери.
- Спеціальні типи – вихрові, струминні, багатоступеневі насоси.

У системах промислового електропривода переважно застосовуються відцентрові насоси, які характеризуються плавністю подачі, простотою конструкції та можливістю регулювання параметрів за допомогою зміни частоти обертання вала.

Для відцентрового насоса існує залежність між напором H , подачею Q , споживаною потужністю P і ККД η :

$$H = H_0 - kQ^2, \quad P = \frac{\rho g H Q}{\eta},$$

де H_0 – максимальний напір при нульовій подачі (закритій засувці); k – коефіцієнт пропорційності, який залежить від типу насоса; ρ – густина рідини, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с²; η – коефіцієнт корисної дії установки.

Характеристика системи трубопроводів визначається втратами напору на тертя і місцевими опорами:

$$H_c = H_{\text{стат}} + KQ^2,$$

де $H_{\text{стат}}$ – статичний напір (різниця рівнів між джерелом і споживачем), K – коефіцієнт гідравлічних втрат, що залежить від довжини трубопроводу, діаметра труб і коефіцієнта шорсткості.

Робоча точка насоса визначається як точка перетину характеристик насоса і системи $H(Q)$. У цій точці рівноважні витрата і напір забезпечують сталий режим роботи.

Енергетичні співвідношення

Потужність, необхідна для приводу насоса, визначається за формулою:

$$P_{\text{вх}} = \frac{\rho g Q H}{\eta_{\text{нас}} \cdot \eta_{\text{дв}}},$$

де $\eta_{\text{дв}}$ – ККД електродвигуна.

Повний ККД системи «насос–двигун» становить:

$$\eta_{\text{заг}} = \eta_{\text{нас}} \cdot \eta_{\text{дв}}.$$

Для промислових систем цей показник зазвичай становить 0,6–0,8. Підвищення ефективності можливе за рахунок оптимального підбору потужності електродвигуна та впровадження автоматизованих систем керування швидкістю.

Регулювання продуктивності насосних установок

Існують три основні методи регулювання подачі насоса:

1. Дросельне регулювання – зміна опору в трубопроводі (засувкою або клапаном). Призводить до збільшення втрат напору та зниження ККД, тому економічно неефективне.

2. Байпасне регулювання – частина потоку рідини повертається у всмоктувальний патрубок. Метод енергозатратний і застосовується лише для короткочасних або аварійних режимів.

3. Частотне регулювання – зміна швидкості обертання електродвигуна за допомогою перетворювача частоти. Це найефективніший

спосіб, що забезпечує до 40–60 % економії електроенергії при змінних навантаженнях.

При частотному керуванні зберігаються пропорції:

$$Q \sim n, \quad H \sim n^2, \quad P \sim n^3,$$

де n – частота обертання вала насоса. Таким чином, навіть невелике зниження швидкості суттєво зменшує споживану потужність.

Вибір електродвигуна для насосної установки

Для приводу відцентрових насосів найчастіше використовують асинхронні короткозамкнені двигуни, які характеризуються:

- простою конструкцією та надійністю в експлуатації;
- можливістю плавного пуску та регулювання швидкості за допомогою ПЧ;
- високим ККД (до 93 %) і коефіцієнтом потужності.

Потужність двигуна вибирають за умови:

$$P_{\text{дв}} \geq \frac{P_{\text{нас}}}{\eta_{\text{передачі}}},$$

де $\eta_{\text{передачі}}$ – ККД муфти або редуктора (для прямого з'єднання приймають $\eta_{\text{передачі}} = 1$).

Крім того, необхідно перевірити двигун на пусковий момент і термічну стійкість, особливо при частих пусках і зупинках насоса.

Автоматизація роботи насосних установок

Сучасні системи насосних електроприводів оснащуються:

- датчиками тиску, витрати, температури;
- контролерами та перетворювачами частоти (Altivar Process, ABB ACS, Siemens Sinamics);
- інтерфейсами обміну даними (Modbus, CANopen, Profibus);
- засобами діагностики і захисту (від перевантаження, перегріву, сухого ходу, асиметрії фаз тощо).

Такі системи дозволяють реалізувати:

- автоматичне підтримання постійного тиску в мережі;
- адаптивне регулювання залежно від витрати;
- зниження пускових струмів;
- моніторинг стану обладнання в реальному часі.

Практичне значення вибору електроприводу

Правильно підібраний електропривод забезпечує:

- стабільність параметрів насосної установки при змінних навантаженнях;
- енергоефективність і мінімізацію експлуатаційних витрат;
- збільшення ресурсу роботи насоса і двигуна;
- можливість інтеграції у системи автоматизованого керування технологічними процесами (SCADA, PLC);

- екологічні переваги за рахунок зниження енергоспоживання і викидів CO₂.

4.2 Програма роботи

1. Ознайомитись із принципом роботи насосної установки та її основними характеристиками.
2. Розрахувати гідравлічні параметри системи (подачу, напір, потужність).
3. Побудувати характеристики насоса $H = f(Q)$ та системи $H_c = f(Q)$.
4. Визначити робочу точку насоса.
5. Розрахувати споживану потужність і ККД електроприводу.
6. Виконати вибір типу електродвигуна за заданими умовами роботи.
7. Провести аналіз енергоефективності при різних способах регулювання (дросельному, частотному).
8. Оформити результати у вигляді таблиць, графіків і висновків.

4.3. Завдання та вихідні данні

Кожен студент виконує розрахунок гідравлічних параметрів насосної установки, вибір типу електроприводу та аналіз енергоефективності згідно з варіантом, визначеним викладачем або номером у журналі групи.

Для кожного варіанта задано вихідні параметри:

- подача Q , м³/год;
- напір H , м;
- довжина всмоктувального трубопроводу L_1 , мм;
- довжина напірного трубопроводу L_2 , мм;
- кут нахилу трубопроводу α , °;
- ККД насоса η_n ;
- частота обертання вала n , об/хв.

Таблиця 4.1 - Варіанти індивідуальних задань.

№ вар.	Q, м ³ /год	H, м	L ₁ , мм	L ₂ , мм	α , °	η_n	n, об/хв
1	300	20	1200	1000	10	0.70	1460
2	350	24	1500	1200	12	0.72	1475
3	400	25	1800	1300	15	0.74	1480
4	450	27	2000	1500	15	0.76	1480
5	500	30	2200	1700	18	0.78	1470
6	550	32	2300	1800	20	0.80	1475
7	600	35	2500	2000	18	0.78	1480
8	650	38	2600	2200	17	0.79	1480

9	700	40	2700	2400	16	0.80	1470
10	750	45	2800	2600	20	0.82	1475
11	800	48	2900	2800	22	0.82	1480
12	850	50	3000	3000	24	0.83	1475
13	900	52	3200	3200	25	0.84	1470
14	950	55	3300	3400	26	0.84	1480
15	1000	60	3500	3600	28	0.85	1475
16	1100	65	3700	3800	30	0.86	1475
17	1200	70	4000	4000	30	0.87	1480
18	1300	75	4200	4200	32	0.87	1480
19	1400	80	4400	4400	35	0.88	1475
20	1500	85	4600	4600	35	0.88	1470

1. Побудувати графік залежності $H = f(Q)$ для заданого насоса і визначити робочу точку.
2. Провести порівняльний аналіз енерговитрат при дросельному та частотному регулюванні.
3. Розрахувати повний ККД системи «насос – електродвигун» при зміні навантаження від 50 до 100 %.
4. Виконати вибір електродвигуна типу AIP за каталогом (з урахуванням ККД, частоти обертання, класу енергоефективності IE3/IE4).
5. Розрахувати економію електроенергії при переході з дросельного на частотне регулювання (припустити зниження середньої швидкості на 20 %).
6. Побудувати залежність потужності $P = f(n)$ і пояснити фізичний зміст співвідношення $P \sim n^3$.
7. Визначити вплив кута нахилу трубопроводу на статичний напір і загальні втрати системи.
8. Розробити схему автоматизованої насосної станції з частотним приводом (у вигляді структурної блок-схеми).
9. Визначити критичну частоту обертання, при якій насос переходить у кавітаційний режим.
10. Підготувати короткий аналітичний звіт щодо доцільності застосування перетворювача частоти у промислових насосних системах.

Розрахункові формули.

Переведення одиниць та базові співвідношення

Переведення подачі:

$$Q = \frac{Q_{\text{м}^3/\text{год}}}{3600} [\text{м}^3/\text{с}]$$

Переведення довжин:

$$L_1 = \frac{L_{1,MM}}{1000}, \quad L_2 = \frac{L_{2,MM}}{1000} \text{ [м]}$$

Швидкості у трубах (за відомих діаметрів)

$$v_1 = \frac{4Q}{\pi D_1^2}, \quad v_2 = \frac{4Q}{\pi D_2^2} \text{ [м/с]}$$

Кінематична в'язкість ν (вода при 20 °С): $\nu \approx 1.0 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Числа Рейнольдса:

$$Re_1 = \frac{v_1 D_1}{\nu}, \quad Re_2 = \frac{v_2 D_2}{\nu}$$

Коефіцієнти тертя (Дарсі) λ_1, λ_2 (виберіть метод — довідник, діаграма Мудді, або аналітична апроксимація Свамі–Джейна)

$$\lambda \approx \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

де ε — еквівалентна шорсткість, м.

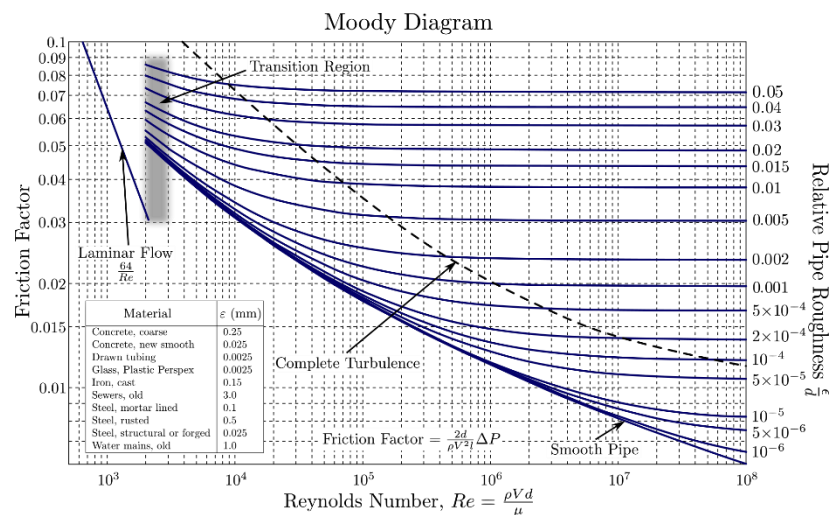


Рисунок 4.1- Діаграма Мудді

Статичний напір системи

Якщо різниця геометричних рівнів не задана окремо, а напірна лінія має кут α до горизонту, приймаємо:

$$H_{\text{стат}} = L_2 \sin \alpha \text{ [м]}$$

За наявності конкретних відміток рівнів використовуйте загальніше:

$$H_{\text{стат}} = \Delta z + \Delta p / (\rho g)$$

де Δz — різниця геометричних рівнів (підпір/підсмоктування), Δp — перепад тиску (якщо є).

Гідравлічні втрати

1. Лінійні втрати (Дарсі–Вейсбаха)

$$H_{f1} = \lambda_1 \frac{L_1 v_1^2}{D_1 2g}, \quad H_{f2} = \lambda_2 \frac{L_2 v_2^2}{D_2 2g}$$

2. Місцеві втрати

$$H_{\text{loc1}} = \left(\sum \zeta_{1i} \right) \frac{v_1^2}{2g}, \quad H_{\text{loc2}} = \left(\sum \zeta_{2j} \right) \frac{v_2^2}{2g}$$

3. Сумарні втрати та характеристика системи

$$H_{\text{втр}} = H_{f1} + H_{f2} + H_{\text{loc1}} + H_{\text{loc2}}$$
$$H_c(Q) = H_{\text{стат}} + H_{\text{втр}}$$

4. Зведення до вигляду $H_c = H_{\text{стат}} + KQ^2$

Підставляючи $v = \frac{4Q}{\pi D^2}$ отримуємо квадратичну форму:

$$H_c(Q) = H_{\text{стат}} + KQ^2, \quad K = K_{f1} + K_{f2} + K_{\text{loc1}} + K_{\text{loc2}}$$

де

$$K_{f1} = \lambda_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{8}{\pi^2 g D_1^4}, \quad K_{f2} = \lambda_2 \frac{L_2}{D_2} \frac{8}{\pi^2 g D_2^4}$$
$$K_{\text{loc1}} = \left(\sum \zeta_{1i} \right) \frac{8}{\pi^2 g D_1^4}, \quad K_{\text{loc2}} = \left(\sum \zeta_{2j} \right) \frac{8}{\pi^2 g D_2^4}$$

Таким чином, саме L_1, L_2 , визначають $H_{\text{стат}}$ і K — тобто зсувають/змінюють нахил системної характеристики.

Характеристика насоса та робоча точка

Апроксимація кривої насоса (паспорт/експеримент):

$$H_p(Q) = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2 \quad (\text{інколи } H_p = H_0 - kQ^2)$$

Робоча точка (Q^*, H^*) — розв'язок:

$$H_p(Q^*) = H_c(Q^*) = H_{\text{стат}} + KQ^{*2}$$

При квадратичній формі:

$$(a_2 - K)Q^{*2} + a_1Q^* + (a_0 - H_{\text{стат}}) = 0$$
$$Q^* = \frac{-a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4(a_2 - K)(a_0 - H_{\text{стат}})}}{2(a_2 - K)} \text{ (додатний корінь),}$$
$$H^* = H_{\text{стат}} + KQ^{*2}$$

Перевірка кавітаційної стійкості (за наявності даних)

$$\text{NPSH}_a = \frac{p_{\text{атм}}}{\rho g} + z_{\text{всм}} - \frac{p_{\text{парі}}}{\rho g} - H_{f1} - H_{\text{loc1}} \Rightarrow \text{NPSH}_a \geq \text{NPSH}_r(Q^*)$$

Потужності та вибір електродвигуна
Гідравлічна потужність у робочій точці:

$$P_H = \rho g Q^* H^* \text{ [Вт]}$$

На валу насоса:

$$P_{\text{вал}} = \frac{P_H}{\eta_n}$$

Оціночна електрична потужність:

$$P_{el} = \frac{P_{\text{вал}}}{\eta_{\text{дв}}}$$

Струм мережі (3-ф, оцінка):

$$I \approx \frac{P_{el}}{\sqrt{3} U_1 \cos \varphi \eta_{\text{ПЧ}}}$$

Крутний момент:

$$M = \frac{9550 P_{\text{вал}} [\text{кВт}]}{n_{\text{об/хв}}} \text{ [Н}\cdot\text{м]}$$

Вибір номінальної потужності двигуна:

$$P_{\text{дв,ном}} \geq \frac{P_{\text{вал}}}{\eta_{\text{дв}}} \cdot S_F \quad (S_F \approx 1.1 \dots 1.2)$$

Закони подібності (частотне регулювання)
За переходу з n_1 на n_2 (геометрична подібність):

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1}, \quad \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2, \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3.$$

Рекомендований порядок застосування (коротко)

1. Перевести Q, L_1, L_2 у SI; задати $D_1, D_2, \varepsilon, \nu$.
2. Обчислити $\nu_1, \nu_2, Re_1, Re_2 \Rightarrow \lambda_1, \lambda_2$.
3. Знайти $H_{\text{стат}} = L_2 \sin \alpha$.
4. Обчислити $H_{f1}, H_{f2}, H_{\text{loc1}}, H_{\text{loc2}} \rightarrow$ коефіцієнт K , сформулювати $H_c(Q)$.
5. Взяти $H_p(Q)$ (паспорт/апроксимація), розв'язати $H_p(Q) = H_c(Q) \rightarrow Q^*, H^*$.
6. Обчислити $P_H, P_{\text{вал}}, P_{\text{ел}}, I, M$ підібрати $P_{\text{дв, ном}}$.
7. (За потреби) перевірити NPSH оцінити ефект ПЧ законами подібності.

4.4. Критерії оцінювання

Зміст звіту.

Титульний аркуш

Мета роботи

Вихідні дані

Таблиця з параметрами варіанта:

$$Q, H, L_1, L_2, \alpha, \eta_n, n, \rho.$$

Хід роботи

Коротко і послідовно:

1. Переведення даних у SI.
2. Розрахунок статичного напору $H_{\text{ст}} = L_2 \sin \alpha$.
3. Розрахунок втрат у трубопроводі й коефіцієнта K .
4. Побудова характеристик $H_c(Q)$ і $H_p(Q)$.
5. Визначення робочої точки Q^*, H^* .
6. Розрахунок потужностей $P_H, P_{\text{вал}}, P_{\text{ел}}$ і моменту M .
7. Вибір електродвигуна (тип, потужність, швидкість).
8. Аналіз енергоефективності при частотному регулюванні.

Таблиці та результати

Таблиця вихідних даних.

Таблиця розрахункових формул.

Таблиця результатів $Q^*, H^*, P_H, P_{\text{вал}}, P_{\text{ел}}, M$.

Графіки

$H = f(Q)$ — насосна та системна характеристики з робочою точкою.

$P = f(n)$ — зміна потужності при частотному керуванні.

Висновки

Короткий підсумок:

- Отримані параметри насосної установки;
- Обраний двигун і його потужність;
- Показано, що частотне регулювання підвищує енергоефективність.

8. Контрольні питання

5–10 запитань із короткими відповідями для самоперевірки.

Підготовлена згідно методичних вказівок робота у форматі файлу *.docx або *.pdf розміщується у відповідному розділі дисципліни в Moodle та перевіряється протягом тижня після здачі. Оскарження оцінки може бути здійснене не пізніше двох тижнів з моменту оцінювання роботи.

Критерії оцінювання виконання практичних робіт (максимум балів за роботу 5).

Розподіл балів за контрольними точками та графік їх виконання:

- 81-100 % від макс. балів – повна відповідність попередньому критерію, також ініціативність студента у роботі над проблемою, логічність та структурованість вербальної відповіді під час навчальної дискусії, здатність комунікувати у команді та під впливом негативних факторів, у т.ч. під тиском викладача та/або групи, вміння вести дискусію та бути критичним та самокритичним;

- 61-80 % від макс. балів – всі досліді/розрахунки виконані релевантно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно;


- 41-60 % від макс. балів – досліді/розрахунки виконані релевантно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно;

Участь у дискусії під час захисту практичних робіт (20 % від макс. балів).

Оцінюється ініціативність студента у роботі над проблемою, логічність і структурованість вербальної відповіді, здатність ефективно комунікувати в команді, збереження конструктивної позиції під впливом негативних факторів (у тому числі під тиском викладача та/або групи), вміння аргументовано вести дискусію, проявляти критичність і самокритичність.

4.5. Питання для перевірки

1. Які основні типи насосних установок використовуються у промисловості?
2. Що визначає робочу точку насоса?
3. Як впливають втрати у трубопроводі на роботу насоса?
4. Як визначається потужність, споживана насосом?
5. Які способи регулювання продуктивності насосів ви знаєте?

- 
6. У чому полягає перевага частотного регулювання перед дросельним?
 7. Як вибрати електродвигун для насосної установки?
 8. Як визначається ККД системи «насос – електродвигун»?
 9. Які параметри впливають на енергетичну ефективність насосного приводу?
 10. Які типи асинхронних двигунів застосовуються для насосних агрегатів?

4.6. Перелік рекомендованої літератури

1. Енергоефективні технології споживання електричної енергії. Практикум за темою «Силкові споживачі»: навч. посіб. / А. В. Чернявський, Ю. А. Веремійчук, О. О. Закладний, Г. І. Черкашина. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 90 с.
2. Енергозберігаючі режими роботи насосних і вентиляторних установок з автоматизованим електроприводом : навч. посіб. / Т. В. Коренькова, О. О. Сердюк, В. Г. Ковальчук, С. А. Сергієнко. 2-ге вид., переробл. і допов. Кременчук : Кременчуцький нац. ун-т ім. Михайла Остроградського, 2023. 194 с.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 5. РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯТОРА

Мета роботи. Ознайомитися з принципами побудови та розрахунку електромеханічних систем вентиляторів; набути практичних навичок визначення потужності, крутних моментів, передавального числа, моментів інерції та вибору електродвигуна для забезпечення ефективної й надійної роботи вентиляційного агрегату.

5.1. Основи теоретичні відомості

Електромеханічна система промислового вентилятора складається з електродвигуна, механічної передачі (муфта, ремінна або редукторна передача), робочого колеса вентилятора та допоміжних елементів (опори, підшипники, система пуску та керування). Основним завданням розрахунку є визначення потужності електродвигуна, моментів інерції, передавальних чисел, а також побудова механічних характеристик системи.

Робота вентилятора характеризується залежністю витрати повітря Q , тиску p та споживаної потужності P від частоти обертання n :

$$Q \sim n, \quad p \sim n^2, P \sim n^3.$$

Тому при зміні швидкості обертання електродвигуна за допомогою частотного перетворювача змінюються всі параметри повітряного потоку. Це забезпечує енергозбереження при регулюванні продуктивності вентиляційних систем.

Потужність, яку повинен забезпечити електродвигун, визначається за формулою:

$$P_{дв} = \frac{P_B}{\eta_{\Sigma}}$$

де P_B – потужність, споживана вентилятором; η_{Σ} – загальний ККД системи (враховує втрати в передачах і муфтах).

Крутний момент на валу вентилятора:

$$M_B = \frac{9550 \cdot P_B}{n_B}$$

де n_B — частота обертання робочого колеса (об/хв).

З урахуванням передавального числа:

$$M_{дв} = \frac{M_B}{i \cdot \eta_{п}}, \quad n_{дв} = i \cdot n_B$$

де i — передавальне число; η — ККД передачі.

Сумарний момент інерції системи:

$$J_{\Sigma} = J_{дв} + J_{п} + J_B$$

де $J_{дв}$ — момент інерції ротора двигуна, $J_{п}$ — приведений момент інерції передачі, J_B — момент інерції вентилятора.

Динамічний момент, що діє під час пуску:

$$M_d = M_{дв} - M_c$$

де M_c — момент опору вентилятора, який приблизно пропорційний квадрату швидкості:

$$M_c = M_H \left(\frac{n}{n_H} \right)^2$$

Для забезпечення стійкої роботи та пуску двигуна виконується умова:

$$M_{пуск} \geq 1.2 \div 1.5 M_{c_H}$$

5.2 Програма роботи

1. Ознайомитися з принципом роботи промислового вентилятора та структурою його електромеханічної системи.
2. Записати вихідні дані: тип вентилятора, необхідну продуктивність, тиск, частоту обертання, тип передачі.
3. Виконати розрахунок потужності вентилятора та електродвигуна.
4. Визначити крутні моменти на валу двигуна та вентилятора.
5. Провести розрахунок передавального числа механічної передачі.
6. Визначити сумарний момент інерції електромеханічної системи.
7. Побудувати механічну характеристику електроприводу вентилятора.
8. Зробити висновки про відповідність обраного двигуна умовам роботи вентилятора.

5.3. Завдання та вихідні данні

Індивідуальні завдання

1. Розрахувати споживану потужність вентилятора.
2. Визначити потужність електродвигуна з урахуванням втрат.
3. Обчислити крутний момент на валах вентилятора та двигуна.
4. Знайти момент інерції системи.
5. Побудувати механічну характеристику системи у координатах $M = f(n)$.
6. Обґрунтувати вибір типу електродвигуна (асинхронний, синхронний, з ПЧ тощо).

Таблиця 5.1 - Варіанти завдань.

№ варіанта	Q, м ³ /с	p, Па	η_s	n_n , об/хв	η_p	i	J_n , кг·м ²
1	12	900	0.85	1450	0.95	2.0	0.15
2	10	1000	0.83	960	0.94	2.5	0.20
3	8	700	0.80	1500	0.93	1.8	0.10
4	6	500	0.88	960	0.95	2.2	0.12
5	15	1200	0.82	1450	0.92	2.0	0.18

5.4. Критерії оцінювання

Зміст звіту

Титульний аркуш.

Мета роботи.

Вихідні дані.

Розрахункова частина

- Визначення потужності повітряного потоку;
- Розрахунок потужності вентилятора та двигуна;
- Обчислення крутних моментів;
- Визначення передавального числа;
- Розрахунок моментів інерції;
- Побудова механічної характеристики $M = f(n)$.

Результати розрахунків. Зведена таблиця з усіма проміжними та кінцевими значеннями.

Висновки. Короткий аналіз результатів: вибір двигуна, ефективність системи, відповідність умовам експлуатації.

Додатки (за потреби). Графіки, схеми, каталожні дані двигуна або вентилятора.

Підготовлена згідно методичних вказівок робота у форматі файлу *.docx або *.pdf розміщується у відповідному розділі дисципліни в Moodle та перевіряється протягом тижня після здачі. Оскарження оцінки може бути здійснене не пізніше двох тижнів з моменту оцінювання роботи.

Критерії оцінювання виконання практичних робіт (максимум балів за роботу 5).

Розподіл балів за контрольними точками та графік їх виконання:

- 81-100 % від макс. балів – повна відповідність попередньому критерію, також ініціативність студента у роботі над проблемою, логічність та структурованість вербальної відповіді під час навчальної дискусії, здатність комунікувати у команді та під впливом негативних факторів, у т.ч. під тиском викладача та/або групи, вміння вести дискусію та бути критичним та самокритичним;

- 61-80 % від макс. балів – всі досліді/розрахунки виконані релевантно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно;

- 41-60 % від макс. балів – досліді/розрахунки виконані релевантно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно;

Участь у дискусії під час захисту практичних робіт (20 % від макс. балів).

Оцінюється ініціативність студента у роботі над проблемою, логічність і структурованість вербальної відповіді, здатність ефективно комунікувати в команді, збереження конструктивної позиції під впливом негативних факторів (у тому числі під тиском викладача та/або групи), вміння аргументовано вести дискусію, проявляти критичність і самокритичність.

5.5. Питання для перевірки

1. З яких основних елементів складається електромеханічна система вентилятора?

2. Які фізичні параметри характеризують роботу вентилятора?

3. Як змінюються витрата повітря, тиск і споживана потужність при зміні частоти обертання?

4. Що таке аеродинамічна потужність і як вона визначається?

5. Як розраховується потужність, яку повинен забезпечити електродвигун вентилятора?

6. Яким чином визначається крутний момент на валу вентилятора?


7. Як розрахувати крутний момент на валу електродвигуна при заданому передавальному числі?

8. Які фактори впливають на вибір типу електродвигуна для вентилятора?

9. Як обчислюється момент інерції електромеханічної системи?

10. Яким чином впливає передавальне число на швидкість обертання та крутний момент?

11. Що таке динамічний момент і як він визначається під час пуску?

- 
12. Які умови необхідні для забезпечення надійного пуску вентилятора?
 13. Як будують механічну характеристику системи $M = f(n)$?
 14. Яке практичне значення має аналіз механічної характеристики?
 15. Які заходи дозволяють підвищити енергоефективність електроприводу вентилятора?

5.6. Перелік рекомендованої літератури

1. Енергозберігаючі режими роботи насосних і вентиляторних установок з автоматизованим електроприводом : навч. посіб. / Т. В. Коренькова, О. О. Сердюк, В. Г. Ковальчук, С. А. Сергієнко. 2-ге вид., переробл. і допов. Кременчук : Кременчуцький нац. ун-т ім. Михайла Остроградського, 2023. 194 с.
2. Шевчук С. П., Ворфоломеев А. В., Осадчук М. П. Енерго- та ресурсоефективні установки. Лабораторний практикум : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 106 с.
3. Шевчук С. П., Мейта О. В. Енерго- та ресурсоефективні установки : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 59 с.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 6. РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ КОМПРЕСОРНОЇ УСТАНОВКИ

Мета роботи. Набути практичних навичок інженерного розрахунку поршневої електромеханічної компресорної установки: визначити ступінь стискання та об'ємну ефективність η_v (з урахуванням мертвого простору C), розрахувати подачу та переміщений об'єм, потужність стискання P_c і потрібну потужність приводу $N_{дв}$, крутні моменти M_d , M_k передавальне число i ; виконати вибір електродвигуна й способу пуску, обґрунтувати обсяг ресивера та сформулювати висновки щодо енергоефективності й надійності роботи установки.

6.1. Основи теоретичні відомості

Компресорні установки є важливим елементом енергетичної інфраструктури гірничих і металургійних підприємств, забезпечуючи подачу стисненого повітря для пневматичного інструменту, транспорту, автоматики та технологічних процесів. Основним приводом компресора є електродвигун, який через механічну передачу (муфту або ремінну передачу) обертає ротор компресора.

Для ефективної роботи системи необхідно правильно підібрати потужність електродвигуна, передавальне число приводу, момент на валу, а також перевірити узгодженість характеристик електродвигуна та компресора.

Основні розрахункові співвідношення:

1. Необхідна потужність на валу компресора:

$$N_k = \frac{P_2}{\eta_m}$$

де P_2 – корисна потужність, необхідна для компримування повітря, кВт; η_m – механічний ККД передачі (0,95...0,98).

Об'ємна ефективність

$$\eta_v = 1 + C - C \cdot r^{1/k}, \quad r = \frac{p_2}{p_1}$$

Подача/переміщення

- задана FAD: V (м³/хв) $\rightarrow V_{\text{переміщ}} = \frac{V}{\eta_v}$
- прив'язка до обертів і кінематики (хід/діаметр/циліндри) — у звіті.

2. Потужність компресора визначається за рівнянням:

$$P_2 = \frac{k}{k-1} \frac{p_2 V}{\eta_k} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \text{ Вт}$$

де p_1 – тиск на вході, Па; p_2 – тиск на виході, Па; V – подача компресора, м³/с; η_k – коефіцієнт корисної дії компресора; k – показник політропи стиснення (для повітря $\approx 1,4$).

3. Момент на валу електродвигуна:

$$M = \frac{9550 \cdot N}{n}$$

де N – потужність, кВт; n – частота обертання, об/хв.

4. Передавальне число приводу:

$$i = \frac{n_d}{n_k}$$

де n_d – частота обертання двигуна; n_k – частота обертання компресора.

Для перевірки правильності вибору електродвигуна розглядається його механічна характеристика та порівнюється пусковий момент із моментом навантаження компресора.

У компресорних установках важливо забезпечити:

- плавний пуск двигуна (через ПЧ або пускачі);
- стабільність тиску в системі;
- енергетичну ефективність при часткових навантаженнях.

6.2 Програма роботи

1. Ознайомитися з конструкцією електромеханічної компресорної установки.
2. Визначити вихідні дані для розрахунку (тиск, подача, ККД, швидкість обертання).
3. Розрахувати потужність, необхідну для стиснення повітря.
4. Розрахувати потужність на валу електродвигуна та перевірити її відповідність стандартному ряду.
5. Визначити крутний момент двигуна і компресора.
6. Розрахувати передавальне число механічної передачі.
7. Побудувати узагальнену енергетичну схему установки.
8. Зробити висновки щодо ефективності роботи системи.

6.3. Завдання та вихідні данні

Прийняти: $k = 1,4$, $t_{\text{всм}} = 20^{\circ}\text{C}$, $\rho \approx 1,2 \text{ кг/м}^3$

V — потрібна подача на вході (FAD), $\text{м}^3/\text{хв}$.

Для розміру циліндра: $V_{\text{переміщ}} = \frac{V}{\eta_v}$, де $\eta_v = 1 + C - C \cdot r^{1/k}$, $r = \frac{p_2}{p_1}$.

Якщо $n=2$, вважаємо міжступеневе охолодження до $t_{\text{всм}}$ і оптимальний розподіл стискання $r_{\text{opt}} = (p_2/p_1)^{1/2}$.

Типові значення

- Промислові поршневі компресори: $C \approx 0.03 \dots 0.10$ (3–10%).
- Високообертові — ближче до 5–8%; великі низькообертові — може бути 2–12% залежно від конструкції головки та клапанів.
- Більше ступенів зі штучним охолодженням не змінює C на пряму, але підвищує загальну η_v завдяки кращим термодинамічним умовам.

Таблиця 6.1- Варіанти індивідуальних завдань

Вар.	V , $\text{м}^3/\text{хв}$	p_2 , МПа	p_1 , МПа	η_k	η_m	n_k , об/хв	n (ступ.)	C (мертв. простір)
1	3.0	0.80	0.10	0.82	0.96	900	1	0.06
2	5.0	0.90	0.10	0.80	0.97	750	1	0.08
3	2.5	0.70	0.10	0.85	0.95	1000	1	0.05
4	6.0	1.00	0.10	0.83	0.98	720	2	0.08
5	4.5	0.75	0.10	0.81	0.96	680	1	0.07
6	7.0	0.85	0.10	0.84	0.97	900	2	0.09
7	8.0	1.10	0.10	0.79	0.96	740	2	0.10
8	3.8	0.65	0.10	0.86	0.95	950	1	0.04
9	9.0	1.20	0.10	0.78	0.97	700	2	0.10
10	2.2	0.60	0.10	0.87	0.96	1050	1	0.03

Таблиця 6.2 -Додаткові умови для вибору двигуна

Вар.	Пуск/керування	Режим роботи	Довкілля	Пневмосистема	Обмеження/вимоги
1	DOL (прямий)	S1	+5...+35 °C	Ресивер 0.5 м^3	≤4 пуск/год, шум ≤80 дБА
2	ATS (плавний пуск)	S3 60%	0...+30 °C	Ресивер 1.0 м^3	≤6 пуск/год, фільтр вологості
3	DOL	S1	+10...+40 °C	Ресивер 0.3 м^3	Кабель ≤60 А
4	ATS	S1	+5...+35 °C	Ресивер 1.5 м^3	Падіння тиску в мережі ≤0.05 МПа
5	DOL	S3 40%	+15...+45 °C	Ресивер 0.8 м^3	Змазування ISO VG68
6	ATS	S1	-5...+30 °C	Ресивер 1.2 м^3	Пуски «під тиском» допустимі
7	ATS	S1	+5...+35 °C	Ресивер 2.0 м^3	≤5 пуск/год, IP55
8	DOL	S1	+10...+35 °C	Ресивер 0.4 м^3	Віброізоляція обов'язкова
9	ATS	S1	0...+30 °C	Ресивер 2.5 м^3	Ліміт по КЗ шин, перевірити I_n
10	DOL	S1	+15...+40 °C	Ресивер 0.25 м^3	Заборона ПЧ (технологічно)

11	ATS	S1	+5...+35 °C	Ресивер 2.0 м³	Нічний шум ≤75 дБА
12	ATS	S3 50%	-10...+25 °C	Ресивер 1.0 м³	≤10 пуск/добу
13	DOL	S1	+5...+40 °C	Ресивер 0.6 м³	ККД системи ≥0.9 (перевірка)
14	ATS	S1	+10...+35 °C	Ресивер 0.7 м³	Резерв продуктивності +10%
15	ATS	S1	0...+30 °C	Ресивер 1.8 м³	ТНД по мережі <8% (якщо ПЧ з'явиться)
16	ATS	S1	-5...+25 °C	Ресивер 1.5 м³	Редуктор із маховиком (зменш пульсації)
17	ATS	S1	+5...+35 °C	Ресивер 3.0 м³	Дистанційний тиск-датчик (PID у SCADA)
18	DOL	S1	+10...+40 °C	Ресивер 0.5 м³	Перевірити нагрів ременів
19	ATS	S1	-5...+30 °C	Ресивер 2.2 м³	Фільтр/сепаратор обов'язкові
20	ATS	S1	+5...+35 °C	Ресивер 1.0 м³	COSφ ≥0.85, компенсація реактиву

6.4. Критерії оцінювання

Звіт повинен містити:

1. Титульна сторінка
2. Мета роботи
3. Вихідні дані (таблиця)
 - 3 варіанта: V (FAD, м³/хв), p_1, p_2 (МПа), k, η_k, η_m, n_k (об/хв), кількість ступенів n, C .
 - Додаткові умови (DOL/ATS, S1/S3, ресивер, вимоги).
 - Одиниці та переведення: м³/хв → м³/с; МПа → Па.
4. Теоретичні відомості (коротко)
 - Які формули застосовано (без довгих виводів):

$$\eta_v = 1 + C - C r^{1/k}, V_{\text{переміщ}} = V/\eta_v;$$

$$P_c = \frac{k}{k-1} \frac{p_2 V}{\eta_k} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \text{ Вт}$$

для 2-ступ.: $r_1 = r_2 = \sqrt{r}, p^* = \sqrt{p_1 p_2}, P_c = P_{c1} + P_{c2};$

$$N_{\text{дв}} = P_c/\eta_m; M = \frac{9550N}{n}; i = \frac{n_d}{n_k}.$$

5. Розрахункова частина (з проміжними кроками)

Ступінь стискання: $r = p_2/p_1$

Об'ємна ефективність: η_v та переміщений об'єм $V_{\text{переміщ}}$.

Потужність стискання:

- 1-ступ.: P_c за формулою вище.
- 2-ступ.: P_{c1}, P_{c2} з міжступеневим охолодженням; підсумок P_c .

Потужність на валу двигуна: $N_{дв} = P_c / \eta_m$; вибір стандартної потужності (із зазначенням запасу).

Моменти: M_k (на валу компресора при n_k) та M_d (на валу двигуна при n_d).

Передавальне число: $i = n_d / n_k$ (обраний полюсний ряд АД), перевірка моменту з урахуванням ККД передачі.

Пуск та режим: перевірка DOL/ATS (кратність струму, пусковий момент відносно навантажувального), частота пусків, S1/S3.

Ресивер / стабільність тиску: коротке обґрунтування заданого об'єму або потрібної ємності (оцінка).

Чутливість результатів: коротко — як зміняться $N_{\text{дв}}$ при $\pm 5 - 10\%$ зміни C або r .

6. Вибір обладнання

Електродвигун: тип (АД), потужність, напруга, частота, швидкість, клас ізоляції, ступінь захисту, режим (S1/S3).

Передача: тип (ремінна/муфта/редуктор), i , розрахункова/паспортна η .

Пуск/керування: DOL або ATS (обґрунтування за умовою).

Арматура/пневмо: ресивер (об'єм), захист по тиску, фільтри/осушення (якщо задано).

7. Схеми та графіки (мінімум 2 рисунки)

Енергетична/функціональна схема установки (двигун → передача → компресор → охолоджувач → ресивер → мережа).

P–V-діаграма (ескіз) або графік «крутний момент–швидкість» з робочою точкою.

За можливості — діаграма балансу потужностей/втрат.

8. Підсумкові таблиці

«Зведена таблиця результатів»

«Перевірки/умови»: пуск, S1/S3, ресивер, вимоги (шум, IP, тощо).

9. Висновки

5–7 пунктів: чи досягнута мета; коректність вибору двигуна; вплив C та двоступеневості; запас потужності; рекомендації (ATS, ресивер, обслуговування).

10. Перелік позначень та одиниць (коротко)

11. Джерела (за потреби)

- 2–5 позицій (стандарти, довідники, паспортні дані). Форматування за ДСТУ 8302:2015, якщо потрібно.

12. Додатки (необов'язково)

- Розширені проміжні обчислення, розкадровка формул, довідкові таблиці, ескізи геометрії циліндрів.

Підготовлена згідно методичних вказівок робота у форматі файлу *.docx або *.pdf розміщується у відповідному розділі дисципліни в Moodle та перевіряється протягом тижня після здачі. Оскарження оцінки може бути здійснене не пізніше двох тижнів з моменту оцінювання роботи.

Критерії оцінювання виконання практичних робіт (максимум балів за роботу 5).

Розподіл балів за контрольними точками та графік їх виконання:

- 81-100 % від макс. балів – повна відповідність попередньому критерію, також ініціативність студента у роботі над проблемою, логічність та структурованість вербальної відповіді під час навчальної дискусії, здатність комунікувати у команді та під впливом негативних факторів, у т.ч. під тиском викладача та/або групи, вміння вести дискусію та бути критичним та самокритичним;

- 61-80 % від макс. балів – всі досліді/розрахунки виконані релевантно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно;

- 41-60 % від макс. балів – досліді/розрахунки виконані релевантно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно;

Участь у дискусії під час захисту практичних робіт (20 % від макс. балів).

Оцінюється ініціативність студента у роботі над проблемою, логічність і структурованість вербальної відповіді, здатність ефективно комунікувати в команді, збереження конструктивної позиції під впливом негативних факторів (у тому числі під тиском викладача та/або групи), вміння аргументовано вести дискусію, проявляти критичність і самокритичність.

6.5. Питання для перевірки

1. Які основні вузли поршневої компресорної установки та їх призначення?

2. Як визначається ступінь стискання r і як він впливає на роботу компресора?

3. Що таке «мертвий простір» C і як він входить у формулу об'ємної ефективності η_v ?

4. Запишіть формулу для η_v та поясніть фізичний зміст кожного члена.

5. Чому при зростанні C або r фактична подача на вході зменшується?

6. Як пов'язати потрібну подачу V (FAD) з переміщуваним об'ємом $V_{\text{переміщ}}$?

7. Наведіть формулу потужності стискання P_c для політропного процесу та поясніть, чому у ній використовується саме p_1 та V .

8. Чим відрізняються одноступеневе та двоступеневе стискання за роботою/потужністю? Коли доцільно застосовувати 2 ступені?

9. Як обчислити оптимальний проміжний тиск p^* і розподіл стискання по ступенях при двоступеневості?

10. Як враховується механічний ККД η_m і як із P_c отримати потрібну потужність електродвигуна?
11. Запишіть формулу для крутного моменту на валу та поясніть, які оберти слід підставляти для валу двигуна і валу компресора.
12. Як визначити передавальне число i і чому воно важливе для узгодження приводу з компресором?
13. Які ризики прямого пуску (DOL) для поршневого компресора й коли краще застосувати плавний пуск (ATS)?
14. Навіщо потрібен ресивер? Як він впливає на пульсації тиску та частоту пусків?
15. Назвіть мінімальні обов'язкові перевірки/обґрунтування у звіті (подача, η_v , потужності, моменти, пуск, режим).
16. Які одиниці слід використовувати в розрахунках та які типові помилки конвертації ($\text{м}^3/\text{хв} \rightarrow \text{м}^3/\text{с}$, МПа \rightarrow Па)?
17. Як впливає зміна ССС на вибір габариту/потужності приводу? Наведіть коротке пояснення.
18. Які заходи підвищують енергоефективність поршневої установки (2-ступеневість, охолодження, оптимізація C , керування тиском, ресивер)?

6.6. Перелік рекомендованої літератури

1. Енергозберігаючі режими роботи насосних і вентиляторних установок з автоматизованим електроприводом : навч. посіб. / Т. В. Коренькова, О. О. Сердюк, В. Г. Ковальчук, С. А. Сергієнко. 2-ге вид., переробл. і допов. Кременчук : Кременчуцький нац. ун-т ім. Михайла Остроградського, 2023. 194 с.
2. Шевчук С. П., Ворфоломєєв А. В., Осадчук М. П. Енерго- та ресурсоефективні установки. Лабораторний практикум : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 106 с.
3. Шевчук С. П., Мейта О. В. Енерго- та ресурсоефективні установки : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 59 с.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 7. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

Мета роботи. Опанування методики розрахунку основних параметрів електроприводу стрічкового конвеєра, визначення сили тяги, потужності на приводному барабані, вибору електродвигуна відповідно до умов експлуатації та визначення передавального числа редуктора. Формування практичних навичок техніко-економічного обґрунтування вибору електродвигуна, оцінки енергоефективності приводу та побудови кінематичної схеми електромеханічної системи транспортування матеріалів.

7.1. Основи теоретичні відомості

Стрічкові конвеєри широко застосовуються у гірничій та металургійній промисловості для транспортування сипучих і кускових матеріалів. Основними елементами електромеханічної системи такого конвеєра є: приводний електродвигун, редуктор, барабани, стрічка, роликкоопори, натяжний пристрій і системи керування.

Електропривод стрічкового конвеєра повинен забезпечувати:

- плавний пуск і зупинку без перевищення динамічних навантажень у стрічці;
- стабільну роботу при змінному навантаженні;
- можливість реверсу (за потреби);
- надійний захист від перевантажень та аварійних ситуацій.

Основні параметри, що визначаються при розрахунку електроприводу:

1. Продуктивність конвеєра:

$$Q = 3600 \cdot A \cdot v \cdot \gamma$$

де Q — продуктивність, т/год; A — площа поперечного перерізу шару матеріалу на стрічці, м²; v — швидкість руху стрічки, м/с; γ — густина матеріалу, т/м³.

2. Потужність на валу приводу:

$$P = \frac{F_T \cdot v}{1000}$$

де F_T — сила тяги стрічки, Н.

3. Сила тяги стрічки:

$$F_T = (q_{\text{стр}} + q_{\text{мат}}) \cdot L \cdot f + H \cdot g \cdot q_{\text{мат}}$$

де $q_{\text{стр}}$ — маса стрічки на 1 м, кг/м; $q_{\text{мат}}$ — маса вантажу на 1 м, кг/м; L — довжина конвеєра, м; f — коефіцієнт опору руху (0,02–0,04); H — висота підйому, м; g — прискорення вільного падіння, 9,81 м/с².

4. Потужність електродвигуна з урахуванням втрат у редукторі:

$$P_{\text{дв}} = \frac{P}{\eta_p}$$

де η_p — ККД редуктора (0,9–0,96).

5. Вибір електродвигуна:

- тип двигуна — трифазний асинхронний з короткозамкненим ротором;
- номінальна потужність — не менше розрахованої $P_{\text{дв}}$;
- номінальна швидкість — відповідно до редуктора і діаметра барабана.

6. Передавальне число редуктора:

$$i = \frac{n_{\text{дв}}}{n_{\text{бр}}}$$

де $n_{\text{дв}}$ — оберти електродвигуна, об/хв; $n_{\text{бр}}$ — оберти барабана.

Оберти барабана:

$$n_{\text{бр}} = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot D}$$

де D — діаметр барабана, м.

7.2 Програма роботи

1. Ознайомитись із будовою та принципом дії стрічкового конвеєра.
2. Визначити вихідні дані для розрахунку (довжина, висота підйому, маса вантажу, швидкість стрічки тощо).
3. Виконати розрахунок сили тяги стрічки та потужності на барабані.
4. Визначити потужність і тип електродвигуна.
5. Розрахувати передавальне число редуктора.
6. Виконати кінематичну схему приводу.
7. Побудувати енергетичний баланс системи приводу.
8. Зробити висновок щодо відповідності вибраного двигуна вимогам технологічного процесу.

7.3. Завдання та вихідні данні

Завдання:

Для заданих параметрів стрічкового конвеєра розрахувати потужність електродвигуна, вибрати тип двигуна та визначити передавальне число редуктора.

Таблиця 7.1 - Варіанти індивідуальних завдань.

Варіант	L, м	H, м	$q_{\text{мат}}$, кг/м	$q_{\text{стр}}$, кг/м	v , м/с	D, м	f	η_p
1	50	5	80	25	1.5	0.4	0.030	0.92
2	75	8	60	20	2.0	0.5	0.025	0.94
3	100	10	100	30	2.5	0.5	0.035	0.93
4	60	4	70	25	1.8	0.45	0.030	0.95
5	80	6	90	28	2.2	0.5	0.040	0.92
6	120	12	110	35	2.8	0.55	0.036	0.94
7	40	3	55	22	1.4	0.35	0.028	0.93
8	90	7	85	27	2.0	0.45	0.033	0.95
9	150	15	120	38	3.0	0.55	0.040	0.93
10	65	5	75	24	1.9	0.4	0.031	0.94

Таблиця 7.2 - Типові значення $q_{\text{мат}}$ (для довідки)

Матеріал	Густина γ , т/м ³	Орієнтовний $q_{\text{мат}}$, кг/м
Вугілля	0.9–1.3	50–80
Зерно	0.7–0.9	40–60
Залізна руда	2.5–3.5	100–150
Агломерат	1.8–2.2	80–100
Пісок	1.4–1.6	60–90
Шлак доменний	1.0–1.3	50–70

Таблиця 7.3 - Додаткові умови вибору електродвигуна

№ умови	Додаткова умова вибору електродвигуна	Коментар / рекомендації
1	Привід працює в умовах підвищеної запиленості шахтного середовища	Рекомендується виконання У5, ступінь захисту не менше IP55
2	Робота з нерівномірним навантаженням (завантаження-розвантаження, пуски до 10/год)	Вибрати двигун із запасом потужності 10–15%, перевірити нагрів
3	Часті пуски і реверси (дозування сировини)	Рекомендується двигун з підвищеним моментом пуску (категорія D) або частотно-регульований привід

4	Робота при підвищеній вологості (зрошувані конвеєри)	Виконання Тропічне УЗ, ізоляція класу F, антикорозійне покриття
5	Потрібна плавна зміна швидкості стрічки	Використати частотно-регульований електропривід (Altivar, SINAMICS)
6	Конвеєр працює безперервно (3 зміни)	Вибрати двигун у режимі S1 (тривалий), перевірити нагрів обмоток
7	Високий пусковий момент через велике навантаження при старті	Можливе використання асинхронного двигуна з фазним ротором
8	Обмеження по простору для монтажу	Використати короткий корпус (серія AIPL) або вертикальне виконання
9	Необхідно забезпечити енергозбереження та автоматичне регулювання	Використати електропривід із частотним перетворювачем Altivar Process ATV930
10	Робота при низьких температурах (-25...-40 °C)	Виконання ХЛ1, підшипники з низькотемпературним мастилом, підігрів обмоток

7.4. Критерії оцінювання

Звіт з виконання практичної роботи повинен містити такі розділи:

1. Титульний аркуш
2. Мета роботи
3. Теоретичні відомості — стислий опис принципу роботи стрічкового конвеєра, ролі електроприводу, основних формул і залежностей.
4. Вихідні дані — таблиця параметрів для обраного варіанту.
5. Розрахункова частина:
 - обчислення сили тяги стрічки;
 - розрахунок потужності на барабані;
 - визначення потужності електродвигуна з урахуванням ККД;
 - підбір типу електродвигуна за каталогом;
 - визначення передавального числа редуктора;
 - побудова кінематичної схеми;
 - визначення загального ККД системи.
6. Енергетичний баланс приводу — таблиця або діаграма втрат потужності.
7. Висновки — оцінити правильність вибору двигуна, енергоефективність і можливість подальшого вдосконалення приводу.
8. Додатки (за наявності): креслення, схеми, каталожні листи, результати з ПЗ (якщо застосовувались MATLAB, Multisim, AutoCAD Electrical тощо).

Підготовлена згідно методичних вказівок робота у форматі файлу *.docx або *.pdf розміщується у відповідному розділі дисципліни в Moodle та перевіряється протягом тижня після здачі. Оскарження оцінки може бути здійснене не пізніше двох тижнів з моменту оцінювання роботи.

Критерії оцінювання виконання практичних робіт (максимум балів за роботу 5).

Розподіл балів за контрольними точками та графік їх виконання:

- 81-100 % від макс. балів – повна відповідність попередньому критерію, також ініціативність студента у роботі над проблемою, логічність та структурованість вербальної відповіді під час навчальної дискусії, здатність комунікувати у команді та під впливом негативних факторів, у т.ч. під тиском викладача та/або групи, вміння вести дискусію та бути критичним та самокритичним;

- 61-80 % від макс. балів – всі досліді/розрахунки виконані релевантно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно;


- 41-60 % від макс. балів – досліді/розрахунки виконані релевантно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно;

Участь у дискусії під час захисту практичних робіт (20 % від макс. балів).

Оцінюється ініціативність студента у роботі над проблемою, логічність і структурованість вербальної відповіді, здатність ефективно комунікувати в команді, збереження конструктивної позиції під впливом негативних факторів (у тому числі під тиском викладача та/або групи), вміння аргументовано вести дискусію, проявляти критичність і самокритичність.

7.5. Питання для перевірки

1. Які основні елементи входять до складу електромеханічної системи стрічкового конвеєра?
2. Які параметри впливають на силу тяги стрічки?
3. Як визначається потужність, необхідна для руху стрічки?
4. Що враховується при розрахунку потужності електродвигуна?
5. Як визначається передавальне число редуктора?
6. Який тип електродвигуна найчастіше використовується у приводах конвеєрів і чому?
7. Що впливає на вибір швидкості руху стрічки?
8. Як зміниться потужність електроприводу при збільшенні довжини або висоти підйому конвеєра?
9. Які переваги мають частотно-регульовані приводи у системах транспортування?
10. Як визначається ККД приводу і які основні джерела втрат?

- 
11. Яке призначення має натяжний пристрій у конвеєрі?
 12. Яким чином забезпечується плавний пуск конвеєра?
 13. Чому важливо враховувати динамічні навантаження під час пуску і зупинки?
 14. Які заходи підвищують енергоефективність приводу конвеєра?
 15. Як вибір типу редуктора впливає на кінематичну та енергетичну схему приводу?

7.6. Перелік рекомендованої літератури

1. Транспортні системи електромеханічних комплексів: Конспект лекцій : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад.: С. В. Зайченко, В. А. Побігало, В. Г. Дубовик. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 136 с.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 8. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВАНТАЖОПІДЙМАЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ

Мета роботи. Ознайомитися з методикою розрахунку параметрів електроприводів вантажопідіймальних механізмів; навчитися визначати статичні, динамічні та еквівалентні моменти; виконувати вибір електродвигуна за умовами навантаження та нагріву; побудувати тахограму руху і навантажувальні діаграми для механізмів підйому та переміщення вантажів.

8.1. Основі теоретичні відомості

Електроприводи вантажопідіймальних механізмів призначені для підйому та транспортування вантажів у гірничих і металургійних виробництвах. До таких систем належать приводи підйомних механізмів кранів, лебідок, елеваторів тощо. Вони працюють у повторно-короткочасному режимі з частими пусками, гальмуванням і зміною напрямку обертання. Тому при їхньому проектуванні важливе значення має точне визначення потужності, моментів і навантажувальної діаграми.

Типові механізми:

- Механізм переміщення — горизонтальний рух візка або моста крана.

- Механізм підйому — вертикальний рух вантажу.

Для розрахунку параметрів електроприводу визначають:

1. Статичну потужність та момент з урахуванням сили тяжіння вантажу, ККД механізму та коефіцієнтів тертя.

2. Динамічні моменти при пуску, гальмуванні, зміні напрямку.

3. Приведені моменти інерції ланок до вала двигуна.

4. Середню потужність та еквівалентний момент для вибору двигуна.

5. Перевірку за нагрівом і перевантажувальною здатністю.

Для різних механізмів використовують різні кінематичні схеми:

- Переміщення — редуктор і ходові колеса з тертям кочення.

- Підйом — барабан, поліспаст, канатна передача.

Побудова діаграм електромеханічних процесів

Призначення діаграм

- Під час проектування електроприводу вантажопідіймального механізму необхідно побудувати низку характеристик, які дозволяють оцінити динаміку його роботи:

- тахограма руху (діаграма швидкості) — показує зміну швидкості у часі під час пуску, сталого руху, гальмування;

- діаграма статичного моменту — відображає момент, який створює статичне навантаження на валу двигуна;

- діаграма динамічного моменту — показує момент, що виникає внаслідок прискорення або уповільнення мас системи;
- сумарна навантажувальна діаграма — результат складання статичного та динамічного моментів; використовується для визначення еквівалентного моменту $M_{\text{екв}}$.

Тахограма руху

- Для механізму переміщення

Тахограма описує зміну швидкості ходового колеса або моста крана при пуску, сталому русі, гальмуванні і паузі. Типовий цикл включає такі етапи:

Пуск з вантажем — швидкість зростає від 0 до номінальної за час $t_{\text{п1}}$.

Сталий рух з вантажем — швидкість постійна протягом $t_{\text{ц1}}$.

Гальмування з вантажем — швидкість зменшується до 0 за час $t_{\text{т1}}$.

Пуск без вантажу — аналогічно, але з меншими моментами і часом

$t_{\text{п2}}$.

Сталий рух без вантажу — протягом $t_{\text{ц2}}$.

Гальмування без вантажу — за час $t_{\text{т2}}$.

Пауза — час очікування або зміни напрямку.

Графічно:

На осі абсцис відкладають час t , на осі ординат — швидкість ω або відносну швидкість $\omega / \omega_{\text{ном}}$.

Крива має вигляд трапеції або симетричної ламаної з рівними ділянками прискорення і гальмування.

Таблиця 8.1 - Приклад значень для побудови

Етап	$t, \text{с}$	$\omega, \text{с}^{-1}$	Примітка
0	0	0	Початок руху
1	$t_{\text{п1}}$	$\omega_{\text{ном}}$	Кінець пуску
2	$t_{\text{п1}} + t_{\text{ц1}}$	$\omega_{\text{ном}}$	Сталий рух
3	$t_{\text{п1}} + t_{\text{ц1}} + t_{\text{т1}}$	0	Гальмування
...	Наступні ділянки циклу

- Для механізму підйому

Тахограма має два характерні цикли:

- підйом вантажу (з вантажем $G + G_0$);
- опускання гака (без вантажу, маса G_0).

Графік симетричний, але ділянки часу можуть бути різні, оскільки при русі з вантажем інерція більша.

Під час опускання можливий генераторний режим двигуна (від'ємна швидкість).

Діаграма статичного моменту $M_c(t)$

Відображає момент, необхідний для подолання сил тяжіння і тертя.

Для кожної ділянки руху він визначається за формулами:

- при русі з вантажем:

$$M_c = \frac{k_p(G + G_0)(\mu r + f)}{Z_p \eta}$$

при русі без вантажу (або з порожнім гаком):

$$M_{c0} = \frac{k_p G_0 (\mu r + f)}{Z_p \eta_0}$$

На графіку (вісь t – час, вісь M_c – момент) цей момент має сталу величину протягом фаз руху, відмінну для кожного етапу циклу.

Діаграма динамічного моменту $M_d(t)$

Динамічний момент виникає при прискоренні або уповільненні мас системи.

Розраховується за формулою:

$$M_d = \frac{J_{\Sigma} \omega_d}{t_{\text{пуск}}}$$

Під час пуску M_d має знак «+», при гальмуванні — «-». На графіку він зображається короткими імпульсами на початку та наприкінці кожної фази руху.

Сумарна навантажувальна діаграма $M_{\Sigma}(t)$

Вона є сумою статичного та динамічного моментів:

$$M_{\Sigma} = M_c \pm M_d$$

- При пуску: $M_{\Sigma} = M_c + M_d$;
- При сталому русі: $M_{\Sigma} = M_c$;
- При гальмуванні: $M_{\Sigma} = M_c - M_d$.

Ця діаграма є основою для визначення еквівалентного моменту:

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum (M_i^2 \cdot t_i)}{\sum t_i}}$$

- або, при урахуванні погіршення охолодження:

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_{\text{п1}} + M_2^2 t_{\text{ц1}} + M_3^2 t_{\text{т1}} + M_4^2 t_{\text{п2}} + M_5^2 t_{\text{ц2}} + M_6^2 t_{\text{т2}}}{(t_{\text{п1}} + t_{\text{т1}})\beta + t_{\text{ц1}} + (t_{\text{п2}} + t_{\text{т2}})\beta + t_{\text{ц2}}}}$$

де $\beta = (\beta_0 + 1)/2$ – коефіцієнт, що враховує режим охолодження.

Приклад інтерпретації діаграм

На одному аркуші можна розмістити три графіки:

1. Швидкість $\omega(t)$ — трапецієподібна форма (рис. 8.1)
2. Статичний момент $M_c(t)$ — дві сходинки (з вантажем / без вантажу) (рис. 8.2).
3. Динамічний момент $M_d(t)$ — імпульси позитивного та негативного знаку (рис. 8.3).
4. Сумарний момент $M_\Sigma(t)$ — комбінація двох попередніх кривих, що змінюється за фазами руху (рис.8.4).
 - Для механізму переміщення: графік симетричний — пуск, рух, гальмування, пауза, пуск у зворотному напрямку.
 - Для механізму підйому: верхня частина циклу — підйом вантажу (вищі значення M_c), нижня — опускання гака (менші значення моментів, можлива рекуперація енергії).

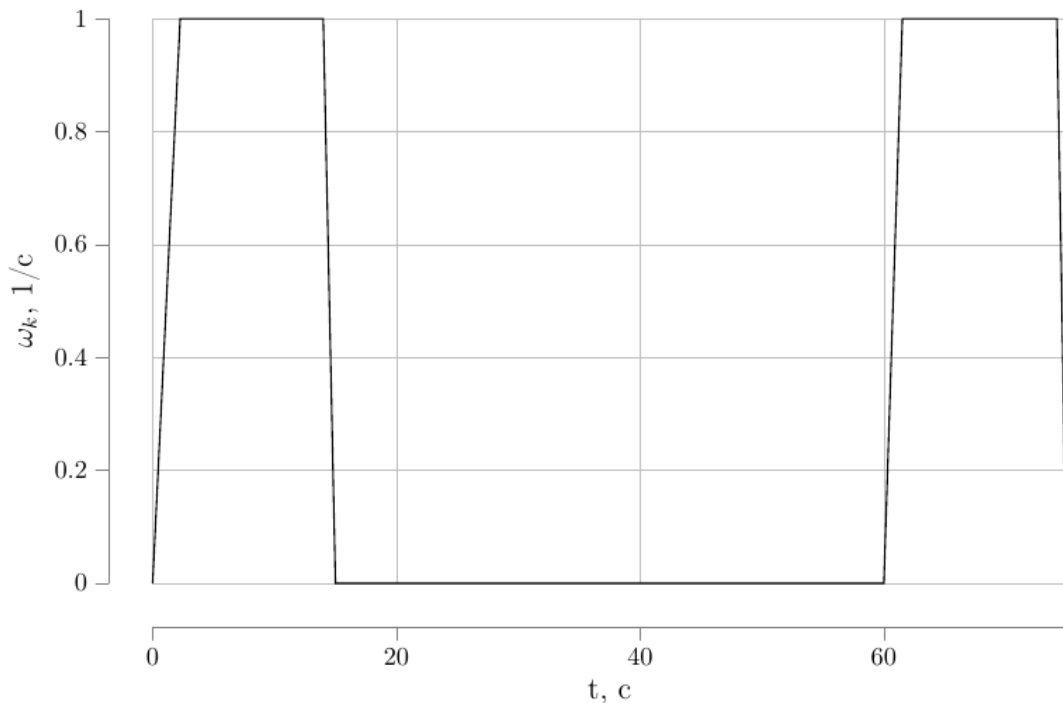


Рисунок 8.1 - Приклад діаграми швидкості.

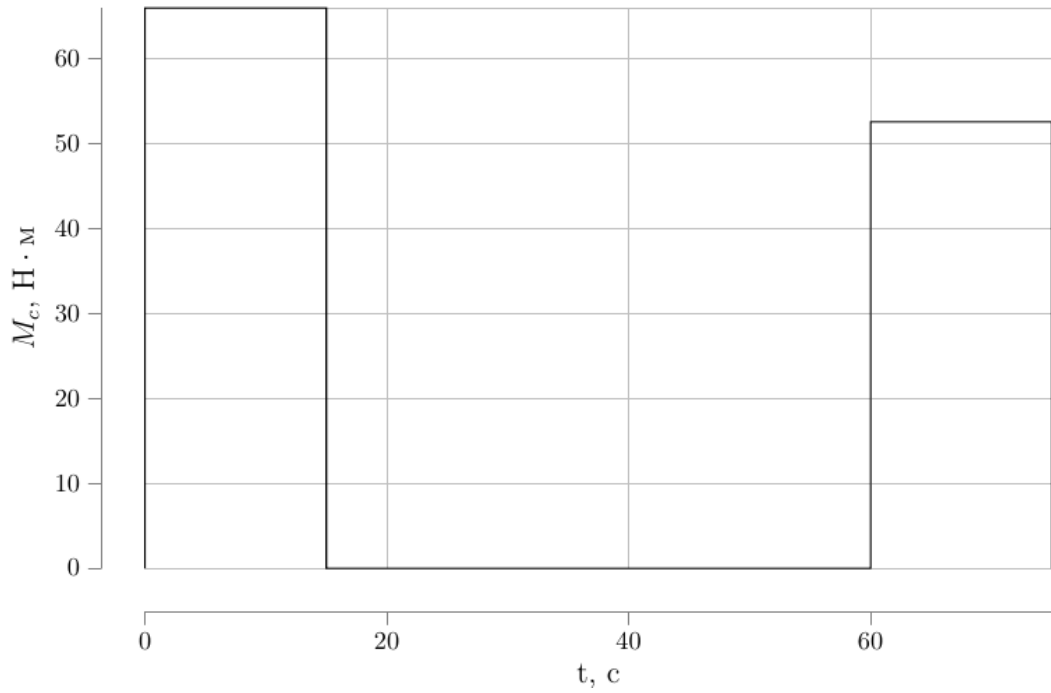


Рисунок 8.2 - Приклад діаграми статичного моменту.

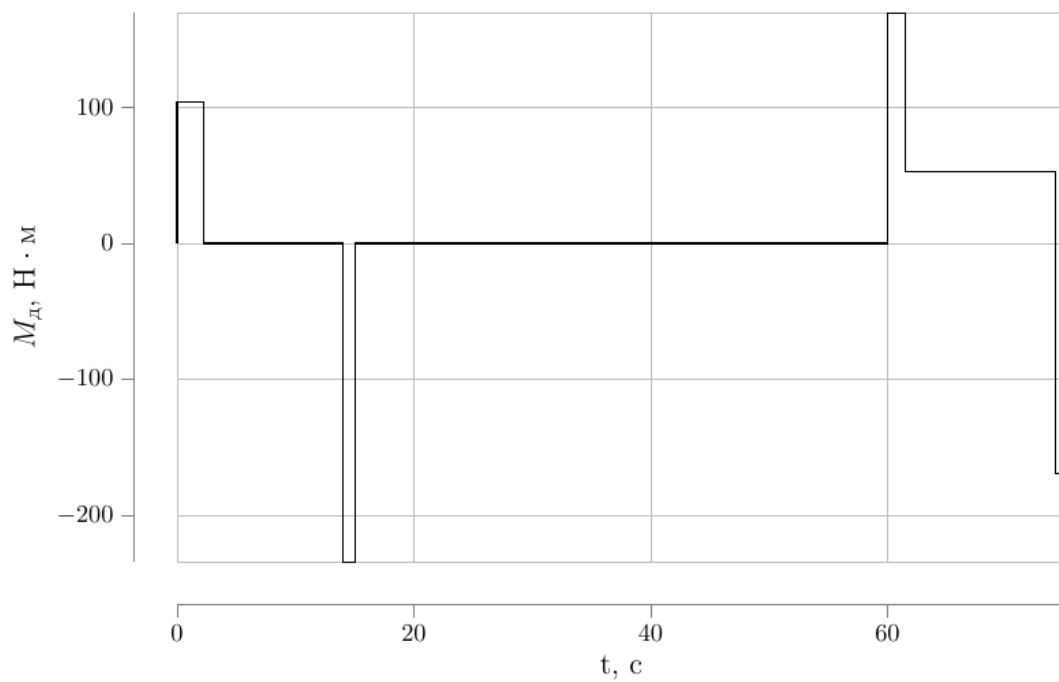


Рисунок 8.3 - Приклад діаграми динамічного моменту.

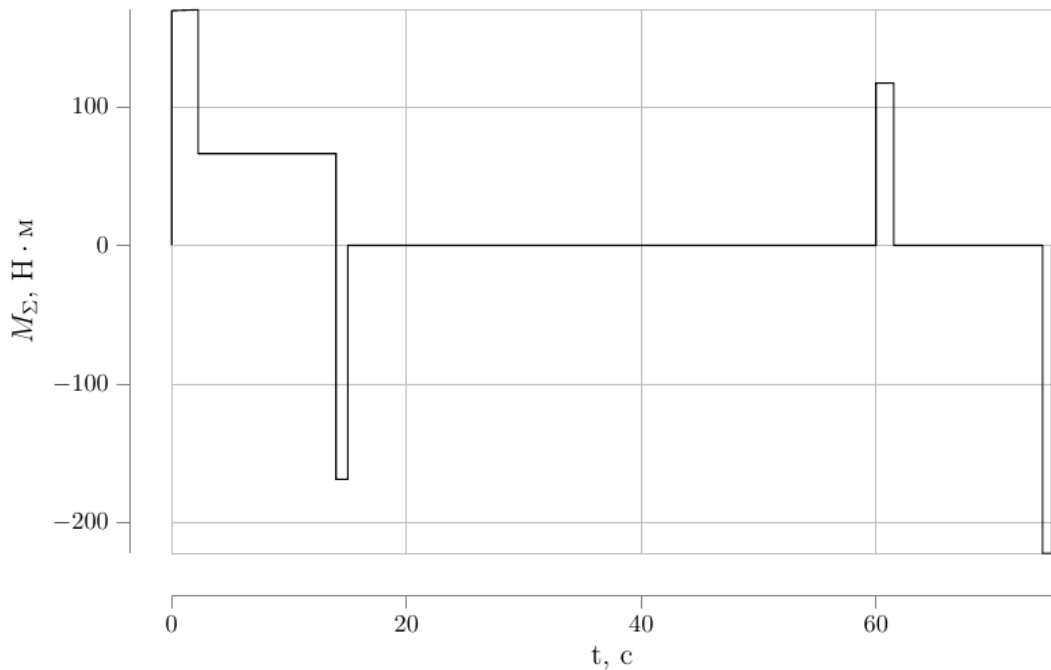


Рисунок 8.4 - Приклад діаграми сумарного моменту.

8.2 Програма роботи

1. Ознайомитись з кінематичними схемами обох типів механізмів.
2. Задати вихідні дані для обох механізмів (маса вантажу, швидкість, передавальне число, ККД, ТВ).
3. Розрахувати для кожного механізму:
 4. статичну потужність і момент;
 5. приведений момент інерції;
 6. динамічні моменти при пуску й гальмуванні;
 7. еквівалентний момент і середню потужність;
 8. вибрати двигун за потужністю та перевірити за нагрівом.
9. Побудувати для обох механізмів:
 - тахограму руху;
 - графіки моментів (статичних, динамічних, сумарних).
10. Зробити висновки щодо вибору типу двигуна та доцільності застосування частотного регулювання.

8.3. Завдання та вихідні данні.

Завдання А. Механізм переміщення вантажу (візок крана)

Кінематична схема: двигун муфта редуктор ходове колесо рейка.

Основні формули:

$$P_c = \frac{k_p(G + G_0)(\mu r + f)V}{10^3 R_k \eta}, \quad M_c = \frac{k_p(G + G_0)(\mu r + f)}{Z_p \eta}$$

Таблиця 8.2 - Індивідуальне завдання механізм переміщення

№	Маса вантажу, кг	Маса візка, кг	Швидкість, м/с	Z_p	η	ТВ, %	R_k , м	$f \cdot 10^{-3}$	μ
1	8000	25000	0.5	28	0.85	25	0.25	0.4	0.1
2	10000	30000	0.6	34.5	0.85	25	0.3	0.4	0.1
3	12000	32000	0.7	30	0.8	40	0.35	0.6	0.1
4	15000	40000	0.8	25	0.9	30	0.3	1.0	0.1
5	20000	50000	1.0	36	0.8	40	0.35	0.8	0.1

Додаткові умови

- коефіцієнти тертя: $f = (0.4 \dots 1.2) \cdot 10^{-3}$, $\mu = 0.1$;
- коефіцієнт реборд $k_p = 1.4 \dots 1.5$;
- коефіцієнт інерційності передач $\delta = 1.1 \dots 1.3$.
- Вибрати двигун з урахуванням $P_{\text{НОМ}} \geq P_{\text{СР}}$.

Результати:

- Розрахувати $P_c, M_c, J_{\Sigma}, t_p, M_d, M_{\text{екв}}$.
- Побудувати графіки моментів і тахограму.

Приклад розрахунку.

Завдання Б. Механізм підйому вантажу

Кінематична схема: двигун редуктор барабан канат → вантаж.

Основні формули:

1. Потужність підйому:

$$P_c = \frac{GV}{10^3 \eta}$$

2. Момент на валу двигуна:

$$M_c = \frac{GD_b}{2Z_p \eta}$$

3. Приведений момент інерції:

$$J_{\Sigma} = J_d + J_p + \frac{(G/g)R_b^2}{Z_p^2}$$

4. Динамічні моменти:

$$M_d = \frac{J_{\Sigma} \omega_d}{t_{\text{пуск}}}$$

5. Перевірка за нагрівом:

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 t_i}{\sum t_i}} \leq M_{\text{НОМ}}$$

Таблиця 8.3. - Індивідуальне завдання механізм підйому

№	Маса ван-тажу, кг	Маса гака, кг	Швид-кість під-йому, м/с	Діаметр бара-бана, м	Zp	η	ТВ, %	δ	K _{max}
1	8000	1200	0.3	0.5	40	0.85	25	1.2	1.7
2	10000	1500	0.4	0.4	36	0.85	30	1.2	1.7
3	15000	1800	0.5	0.45	30	0.8	40	1.3	1.8
4	20000	2000	0.6	0.5	25	0.8	25	1.3	1.8
5	25000	2500	0.7	0.6	20	0.9	40	1.2	1.7

Результати, які потрібно визначити:

- $P_c, P_{c0}, M_c, M_{c0}, J_{\Sigma}, t_{\text{пуск}}, M_d, M_{\text{екв}};$
- побудувати графіки моментів і швидкості;
- вибрати двигун, провести перевірку за нагрівом та перевантажувальною здатністю.

8.4. Критерії оцінювання

Звіт повинен містити:

Титульний аркуш.

Мета роботи

Вихідні дані

Розрахункова частина:

- обчислення статичної потужності та моментів (з вантажем і без вантажу);
- приведений момент інерції;
- динамічні та сумарні моменти;
- еквівалентний момент і середня потужність;
- вибір електродвигуна та перевірка за нагрівом.

Графічна частина:

- кінематична схема
- тахограма руху;
- діаграма статичних, динамічних і сумарних моментів.

Висновки.

Підготовлена згідно методичних вказівок робота у форматі файлу *.docx або *.pdf розміщується у відповідному розділі дисципліни в Moodle та перевіряється протягом тижня після здачі. Оскарження оцінки може бути здійснене не пізніше двох тижнів з моменту оцінювання роботи.

Критерії оцінювання виконання практичних робіт (максимум балів за роботу 5).

Розподіл балів за контрольними точками та графік їх виконання:

- 81-100 % від макс. балів – повна відповідність попередньому критерію, також ініціативність студента у роботі над проблемою, логічність та структурованість вербальної відповіді під час навчальної дискусії, здатність комунікувати у команді та під впливом негативних факторів, у т.ч. під тиском викладача та/або групи, вміння вести дискусію та бути критичним та самокритичним;

- 61-80 % від макс. балів – всі досліді/розрахунки виконані релевантно, аналіз отриманих результатів повний та обґрунтований, звіт оформлений акуратно;

- 41-60 % від макс. балів – досліді/розрахунки виконані релевантно, аналіз отриманих результатів неповний, або звіт оформлений неохайно;

Участь у дискусії під час захисту практичних робіт (20 % від макс. балів).

Оцінюється ініціативність студента у роботі над проблемою, логічність і структурованість вербальної відповіді, здатність ефективно комунікувати в команді, збереження конструктивної позиції під впливом негативних факторів (у тому числі під тиском викладача та/або групи), вміння аргументовано вести дискусію, проявляти критичність і самокритичність.

8.5. Питання для перевірки

1. Які основні типи вантажопідіймальних механізмів застосовуються в гірничо-металургійних комплексах?

2. Чим відрізняється електропривод механізму підйому від механізму переміщення?


3. У чому полягає особливість режиму роботи вантажопідіймальних електроприводів?

4. Які сили враховуються при визначенні статичної потужності приводу?

5. Як обчислюється статична потужність при роботі з вантажем і без вантажу?

6. Для чого враховується маса порожнього гака при розрахунках?

7. Як визначити приведений момент інерції механічної системи до вала двигуна?

- 
8. Як розраховуються динамічні моменти при пуску та гальмуванні?
 9. Що таке еквівалентний момент і як його використовують при перевірці двигуна за нагрівом?
 10. Як визначається тривалість вмикання (ТВ) і яку роль вона відіграє у виборі двигуна?
 11. Які параметри використовуються при побудові тахограми руху?
 12. У чому різниця між статичною, динамічною та сумарною діаграмами моментів?
 13. Які умови правильного вибору потужності електродвигуна вантажопідіймального механізму?
 14. Які переваги застосування частотно-регульованого електроприводу у підйомних механізмах?
 15. Як можна зменшити енергоспоживання електроприводу підйому без зниження продуктивності?

8.6. Перелік рекомендованої літератури

1. Транспортні системи електромеханічних комплексів: Конспект лекцій: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад.: С. В. Зайченко, В. А. Побігало, В. Г. Дубовик. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 136 с.



Навчально-методичне видання

Шрамко Юрій Юрійович

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Інжиніринг електромеханічних систем гірничих і металургійних комплексів»

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції