

**Міністерство освіти і науки України  
Західноукраїнський національний університет  
Навчально-науковий інститут інноватики, природокористування та  
інфраструктури  
Кафедра бізнес-аналітики та інноваційного інжинірингу**

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до виконання комплексного курсового проєкту  
з освітньо-професійної програми “Енергетичний аудит”  
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»  
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти**

**Тернопіль  
ЗУНУ  
2024**

Методичні вказівки до виконання комплексного курсового проєкту з освітньо-професійної програми «Енергетичний аудит» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти / В. Камишлов, М. Федірко, О. Завитій. Тернопіль: ЗУНУ, 2024. 46 с.

**Укладачі:**

к.т.н., доцент **Віталій Камишлов**  
к.е.н., доцент **Михайло Федірко**,  
к.е.н., доцент **Ольга Завитій**

**Рецензенти:**

**Михайлова Людмила Миколаївна**, кандидат технічних наук, професор, ЗВО Подільський державний технічний університет.

**Синявський Олександр Юрійович**, кандидат технічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України

**Відповідальний за випуск:**

**Руслан Бруханський**, доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри бізнес-аналітики та інноваційного інжинірингу, ЗУНУ

Методичні рекомендації розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри бізнес-аналітики та інноваційного інжинірингу (протокол № 1 від 26 серпня 2024 р.)

Розглянуто та схвалено групою забезпечення спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (протокол № 2 від 30 серпня 2024 р.)

## ЗМІСТ

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ .....                                                                                        | 4  |
| 2. ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ .....                                                                                          | 5  |
| 3. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ВИБОРУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА .....                                                                   | 7  |
| 4. ПОПЕРЕДНІЙ ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЗА<br>ПОТУЖНІСТЮ І ЧАСТОТОЮ ОБЕРТАННЯ .....                                     | 12 |
| 5. ПЕРЕВІРКА ВИБРАНОГО ДВИГУНА .....                                                                               | 17 |
| 5.1. Перевірка вибраного електродвигуна за тепловим режимом<br>під час пуску .....                                 | 17 |
| 5.2. Перевірка вибраного електродвигуна на пусковий момент ....                                                    | 24 |
| 5.3. Перевірка вибраного двигуна на перевантажувальну<br>здатність .....                                           | 24 |
| 6. АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ<br>ЕЛЕКТРОПРИВОДА .....                                                  | 26 |
| 6.1. Побудова функціональної схеми системи автоматичного<br>регулювання .....                                      | 26 |
| 6.2. Визначення передаточної функції елементів системи .....                                                       | 27 |
| 6.3. Побудова структурно-алгоритмічної схеми САУ .....                                                             | 27 |
| 6.4. Визначення передаточної функції САУ:<br>розімкненої системи за заданною дією, за збуренням, за похибкою ..... | 28 |
| ДОДАТКИ .....                                                                                                      | 37 |
| СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....                                                                             | 45 |

## **1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ**

Метою комплексного курсового проєкту є закріплення та поглиблення знань, отриманих студентами при вивченні фахових дисциплін за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Графічна частина складається з листа, що містить, механічні характеристики, функціональні та структурні схеми і графіки перехідних процесів.

Для виконання комплексного курсового проєкту видається завдання кафедри, яке визначає перелік питань, які потрібно вирішити, та визначає терміни їх виконання. Бланк завдання розміщується на першій сторінці розрахунково- пояснювальної записки.

Обсяг комплексного курсового проєкту складає 20 – 25 сторінок основного тексту.

Курсовий проєкт виконується відповідно з індивідуальним завданням та повинний бути переданий викладачеві для перевірки не пізніше, ніж за тиждень до строку захисту. Проєкт, що задовольняє висунутим вимогам відносно вірності виконаних розрахунків та якості оформлення, може бути допущений до захисту.

Розрахунково-пояснювальну записку потрібно друкувати на одному боці сторінок стандартного білого паперу формату А4 (210x297 мм). При комп'ютерному наборі слід застосовувати шрифт Times New Roman, його розмір – 14 пт, міжрядковий інтервал – полуторний.

Всі елементи технічного супроводу треба виконувати згідно з вимогами діючих Державних стандартів.

## 2. ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ

Кожен студент обирає один варіант із запропонованих видів завдання:

**Варіант I.** Розрахунок електроприводу відцентрового насосного агрегату установки на базі асинхронного електродвигуна з короткозамкнутим ротором (вихідні дані у додатку А, таблиця 1).

| № варіанта | Подача, м <sup>3</sup> /год | Напір, м | Частота обертання (об/хв) | ККД, % |
|------------|-----------------------------|----------|---------------------------|--------|
|            |                             |          |                           |        |

Режим роботи агрегату тривалий, з постійним навантаженням S1.

**Варіант II.** Розрахунок електроприводу відцентрової вентиляційної установки на базі асинхронного електродвигуна з короткозамкнутим ротором (вихідні дані у додатку А, таблиця 2).

| № варіанта | Продуктивність (м <sup>3</sup> /год) | Тиск (Па) | Частота обертання (об/хв) | ККД |
|------------|--------------------------------------|-----------|---------------------------|-----|
|            |                                      |           |                           |     |

Режим роботи агрегату тривалий, з постійним навантаженням S1

### Розрахунково-пояснювальна записка:

1. Короткий опис структури установки.
  - 1.1. Класифікація типів асинхронних двигунів та їх конструктивне виконання.
  - 1.2. Класифікація типів насосів (вентиляторів).
  - 1.3. Короткий опис функціональної та кінематичної схеми насосного агрегату (вентиляційної установки).
2. Класифікація режимів роботи та типів навантажувальних діаграм насосних агрегатів (вентиляційних установок) та їх обробка.
3. Попередній вибір параметрів електродвигуна за потужністю та частотою обертання.
4. Перевірка попередньо вибраного електродвигуна.

5. Вибір електродвигуна за електричною модифікацією, конструктивним та кліматичним виконанням, ступенем захисту від дії навколишнього середовища.

6. Аналіз системи автоматичного керування електропривода

6.1. Побудувати функціональну схему системи автоматичного регулювання

6.2. Визначити передаточні функції елементів системи

6.3. Побудувати структурно-алгоритмічну схему САУ

6.4. Визначити передаточні функції САУ: розімкнутої системи за заданною дією, за збуренням, за похибкою

6.5. Побудова перехідного процесу САУ та визначення показників якості.

### **3. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ВИБОРУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА**

Електродвигун, потрібний для привода робочої машини, вибирають за такими основними ознаками: родом струму; напругою; режимом роботи; частотою обертання; потужністю; електричною модифікацією; конструктивним виконанням і способом монтажу; кліматичним виконанням і категорією розміщення; ступенем захисту персоналу від доторкання до струмоведучих або рухомих частин, що знаходяться всередині його корпусу, та від потрапляння всередину корпусу твердих сторонніх тіл і води.

За родом струму електродвигун вибирають відповідно до роду струму електричної мережі, від якої він буде живитись, та вимог робочої машини до механічних характеристик двигуна. У різних видах виробництв використовують мережі змінного струму, тому і електродвигуни, як правило, вибирають змінного струму. Двигун постійного струму застосовують лише тоді, коли робоча машина потребує плавного і в широких межах регулювання швидкості або спеціальних механічних характеристик двигуна, які не можуть бути забезпечені при використанні двигунів змінного струму. Живлення такого двигуна здійснюють від електромережі змінного струму через відповідний перетворювальний пристрій.

За напругою електродвигун вибирають так, щоб його номінальна напруга відповідала напрузі електромережі, в яку він буде вмикатися.

За режимом роботи (тривалий, короткочасний, повторно- короткочасний та ін.) двигун вибирають відповідно до режиму роботи машини, для привода якої він призначений. В окремих випадках для короткочасного режиму роботи можна вибрати двигун, розрахований на тривалий режим роботи.

За номінальною потужністю електродвигун вибирають згідно з навантажувальною діаграмою робочої машини за методикою, наведеною нижче.

За частотою обертання двигун вибирають залежно від потрібної частоти

обертання приводного вала робочої машини. Якщо ця частота не дорівнює жодній із каталожних номінальних частот обертання електродвигунів і пряме з'єднання двигуна з машиною за допомогою муфти неможливе, то вибирають двигун з більшою частотою обертання і застосовують пасову, зубчасту чи будь-яку іншу передачу. При цьому треба пам'ятати, що тихохідні двигуни порівняно з швидкохідними більш металомісткі, мають нижчі енергетичні показники. Тому, їх слід застосовувати лише при безпосередньому з'єднанні з машиною або тоді, коли застосування двигуна з більшою частотою обертання ускладнює конструкцію привода. При відомій кінематичній схемі привода частоту обертання двигуна вибирають відповідно до неї.

За електричною модифікацією (з підвищеним пусковим моментом, з підвищеним ковзанням, багатошвидкісний, з фазним ротором, для короткочасного режиму роботи, однофазний) асинхронний двигун вибирають залежно від моменту зрушення робочої машини, характеру навантаження двигуна і величини махових мас системи „електродвигун – робоча машина”, потреби в регулюванні швидкості та гальмуванні системи. Двигуни з підвищеним пусковим моментом вибирають для привода машин з великими моментами зрушення та маховими масами (скребкові конвеєри для прибирання гною, дробарки кормів, поршневі насоси тощо); двигуни з підвищеним ковзанням – для привода машин з різко змінним (ударним) навантаженням (сіно-соломопреси, компресори тощо), а також машин, які працюють у повторно-короткочасному режимі; багатошвидкісні – для привода машин, які потребують ступінчастого регулювання швидкості; двигуни з фазним ротором – для привода машин, що потребують плавного регулювання швидкості (наприклад, у стендах для випробування та обкатування автотракторних двигунів), а також машин, що мають особливо важкі умови пуску (сепаратори, центрифуги); двигуни для короткочасного режиму роботи – для привода робочих машин, які працюють у короткочасному режимі роботи.

За конструктивним виконанням і способом монтажу електродвигун вибирають залежно від конструктивних особливостей робочої машини і

передавального пристрою та їх розташування на місці встановлення.

Класифікація конструктивних виконань двигунів за способом монтажу наведена в ГОСТ 2479-79. Структура умовного позначення містить дві букви (ІМ) та чотири цифри.

Перша цифра визначає конструктивне виконання: 1 – двигуни на лапах з підшипниковими щитами; 2 – двигуни на лапах, з підшипниковими щитами та з фланцем на підшипниковому щиті; 3 – двигуни без лап, з підшипниковими щитами, з фланцем на одному щиті; 4 – двигуни без підшипникових щитів.

Цифри 6–9 до двигунів основного виконання не застосовуються. Спеціальні серії двигунів можуть мати цифри 7 – двигуни з двома стояковими підшипниками (обкатувально-гальмівний стенд), 9 – машини спеціальної групи (заглибні електродвигуни, двигуни серій 4АПА, АІРП для привода осьових вентиляторів, двигуни для ручних електричних машин тощо).

Друга та третя цифри означають спосіб монтажу і вказують на положення двигуна в просторі: горизонтально лапами вниз, вертикально валом вгору або вниз, на стінці, на стелі тощо. Цифри 08 у деяких виконаннях означають, що двигун може працювати при будь-якому положенні вала в просторі (ІМ1081).

Четверта цифра означає виконання вихідного кінця вала двигуна: 0 – без вихідного кінця вала; 1 – з одним циліндричним; 2 – з двома циліндричними; 3 – з одним конічним; 4 – з двома конічними. Виконання валів з позначенням цифрами 5–9 в асинхронних двигунах основного виконання не передбачено. Основним виконанням валів у двигунів серії АІР загального призначення є 1 – з одним циліндричним кінцем.

За кліматичним виконанням і категорією розміщення двигун вибирають відповідно до кліматичних умов району, в якому він буде експлуатуватися, та характеристики місця його розташування.

Кліматичне виконання електрообладнання позначають буквами: У – для районів з помірним кліматом; ХЛ – холодним кліматом; ТВ – тропічним вологим; ТС – тропічним сухим; Т – як з сухим, так із тропічним вологим кліматом, О – загальнокліматичне виконання.

Категорія розміщення електрообладнання позначається цифрою: 1 – для роботи на відкритому повітрі; 2 – для роботи у приміщеннях з порівняно вільним доступом зовнішнього повітря, де коливання температури і вологості повітря мало відрізняються від коливань на відкритому повітрі; 3 – для роботи у приміщеннях з природною вентиляцією без штучного мікроклімату; 4 – для роботи у приміщеннях із штучним мікрокліматом; 5 – для роботи у приміщеннях з підвищеною вологістю.

За кліматичним виконанням та категорією розміщення електродвигуни основного виконання мають такі позначення:

УЗ – для роботи в нормальному середовищі: температура навколишнього середовища від  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , відносна вологість повітря не більше 98%, запиленість повітря до  $2\text{ мг/м}^3$  (IP23) та до  $10\text{ мг/м}^3$  (IP44), навколишнє середовище вибухобезпечне, без струмопровідного пилу, висота над рівнем моря до 1000 м;

У2 – вологоморозостійке виконання (для роботи під навісом): температура від  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , відносна вологість до 100 %, двигун має подвійне просочування ізоляції, кращу герметизацію з боку ввідного пристрою та вала;

У1 – виконання двигуна, призначеного для роботи на відкритому повітрі з додатковим впливом атмосферних опадів, сонячної радіації, пилу та інших факторів при різких змінах температури повітря.

Для приміщень з підвищеною вологістю (теплиці, приміщення для переробки молока тощо) рекомендується застосовувати двигуни виконання У5.

Випускаються також спеціалізовані виконання двигунів за захистом від впливу навколишнього середовища. До них належать двигуни:

– хімоустійкого виконання (позначення Х1, Х2), які допускають наявність в навколишньому середовищі хімічно активного пару хлору до  $0,001\text{ г/м}^3$ , аміаку – до  $0,02\text{ г/м}^3$ , сірчистого ангідриду – до  $0,02\text{ г/м}^3$ ; пилозахисного виконання (позначення УПУЗ), призначені для експлуатації в приміщеннях, де можливе утворення вибухонебезпечних сумішей, а

запиленість приміщень може досягати  $100 \text{ г/м}^3$  (комбикормові заводи, деревообробні цехи, млини, елеватори, зерносклади);

– сільськогосподарського виконання (позначення СУ1, СУ2), призначені для роботи на відкритому повітрі та в приміщеннях з відотною вологістю до 100 % при температурі  $+25 \text{ }^\circ\text{C}$ , допускають наявність аміаку до  $0,03 \text{ г/м}^3$ , сірководню до  $0,03 \text{ г/м}^3$ , соломистого пилу до  $1,16 \text{ г/м}^3$  (тваринницькі та птахівничі приміщення). Наявність снігу та льоду не повинно заважати обертанню ротора. Двигуни морозостійкі, допускають обробку дезінфікуючими розчинами та аерозолями, ступінь захисту IP55.

За ступенем захисту персоналу від доторкання до струмоведучих або рухомих частин, що знаходяться всередині корпусу двигуна, і від потрапляння всередину корпусу твердих сторонніх тіл і води двигун вибирають відповідно до характеристики навколишнього середовища, в якому він буде працювати.

Електродвигуни основного виконання виготовляються зі ступенями захисту: IP23 (захищене виконання) – характеризує захист від випадкового дотику пальців до струмоведучих частин, що знаходяться під оболонкою та захист від проникнення твердих тіл діаметром більше 12,5 мм (перша цифра 2), захист від крапель води або дощу, який падає під кутом до  $60^\circ$  від вертикалі (друга цифра 3); IP44 (закрите виконання) – захист від проникнення під оболонку твердих тіл діаметром більше 1 мм, захист від бризок води будь-якого напрямку; IP54 (закрите виконання) – захист від пилу, який не може проникнути під оболонку в шкідливих кількостях; IP55 – крім того, захист від струменів води будь-якого напрямку.

#### 4. ПОПЕРЕДНІЙ ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЗА ПОТУЖНІСТЮ І ЧАСТОТОЮ ОБЕРТАННЯ

Вихідними даними для вибору електродвигуна за потужністю та подальших його перевірок є навантажувальна діаграма і механічна характеристика робочої машини, кінематична схема привода та моменти інерції системи електродвигун – робоча машина.

При виконанні комплексного курсового проєкту функціональну та кінематичну схеми установки та їх опис беруть із довідкової літератури. При цьому вказують технічну характеристику робочої машини.

Вибір потужності електродвигунів проводять за наявності навантажувальної діаграми. Навантажувальною діаграмою робочої машини називається залежність моменту або потужності статичних опорів робочої машини від часу, тобто  $M_c = f(t)$ ,  $P_c = f(t)$ . Навантажувальною діаграмою електродвигуна (привода) називають залежність струму, моменту або потужності електродвигуна від часу, тобто  $I = f(t)$ ,  $M = f(t)$ ,  $P = f(t)$ .

Навантажувальні діаграми робочих машин, у яких статичний момент або потужність у процесі роботи не змінюються (рис.1) або змінюються у часі періодично з певною закономірністю, можна з достатньою для практики точністю розрахувати аналітично.

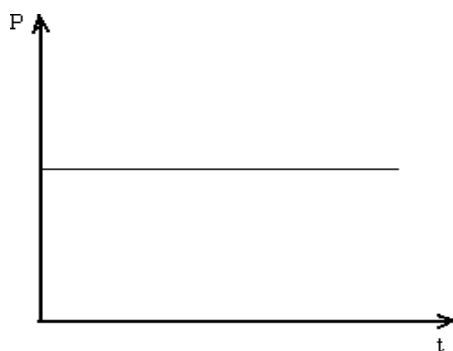


Рис.1. Навантажувальна діаграма насосів і вентиляторів

Так, потужність насоса розраховують за формулою:

$$P_{\text{нас}} = \frac{Q \rho H g 10^{-3}}{\eta_{\text{нас}}}, \quad (1)$$

де  $Q$  – подача насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\rho$  - густина рідини, що подається насосом,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $H$  – розрахунковий напір,  $\text{м}$ ;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $g =$

$9,81 \text{ м}/\text{с}^2$ ;  $\eta_{\text{нас}}$  – ККД насоса.

При побудові навантажувальних діаграм вентиляторів їх потужність розраховують за формулою:

$$P_e = \frac{L p 10^{-3}}{\eta_e}, \quad (2)$$

де  $L$  – подача вентилятора,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $p$  – напір вентилятора, Па;  $\eta_e$  – ККД вентилятора.

Навантажувальні діаграми робочих машин, у яких статичний момент або потужність змінюються у часі випадково, знімають експериментально за допомогою самописних приладів.

Обробку навантажувальної діаграми виконують методом еквівалентних величин. Для цього:

1) навантажувальну діаграму  $P=f(t)$ ,  $M=f(t)$  або  $I=f(t)$  будують на окремому аркуші в масштабі (рис.2);

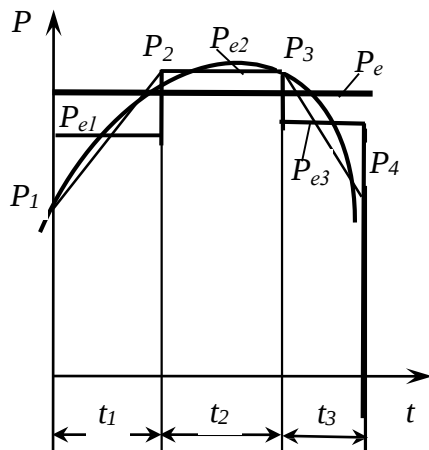


Рис.2. Навантажувальна діаграма та її обробка

2) плавну криву діаграми замінюють ламаною і поділяють її на окремі ділянки з тривалостями  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$  і т.д.;

3) визначають еквівалентні значення потужності, моменту або струму на кожній ділянці діаграми і будують ступінчастий графік. При трапецеїдальній формі ділянки

еквівалентна потужність визначиться так:

$$P_{e.д\ddot{u}л.} = \sqrt{\frac{P_1^2 + P_1 P_2 + P_2^2}{3}}, \quad (3)$$

при трикутній ділянці:

$$P_{e.д\ddot{u}л.} = \frac{P}{\sqrt{3}}, \quad (4)$$

при прямокутній ділянці:

$$P_e = P; \quad (5)$$

4) визначають еквівалентну за умовами нагрівання потужність електродвигуна за формулою:

$$P_e = \sqrt{\frac{P_{e1}^2 t_1 + P_{e2}^2 t_2 + P_{e3}^2 t_3 + P_{e4}^2 t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}}, \quad (6)$$

де  $P_{e1}, P_{e2}, P_{e3}, P_{e4}$  – еквівалентні потужності на ділянках графіка, кВт, у відповідні періоди роботи тривалістю  $t_1, t_2, t_3, t_4$ , хв.

За такою ж формулою визначають еквівалентні значення моменту і струму.

За навантажувальною діаграмою визначають режим роботи електродвигуна.

Номінальну потужність двигуна з умови допустимого нагрівання під час роботи для тривалого режиму роботи (S1) з постійним навантаженням визначають за умовою:

$$P_{\text{дв.ном}} \geq P_{\text{дв.розр}}, \quad (7)$$

де  $P_{\text{дв.розр}}$  – розрахункова потужність двигуна, яка визначається за формулою:

$$P_{\text{дв.розр}} = \frac{K_{\text{зан}} P_m}{\eta_{\text{пер}}}, \quad (8)$$

де  $K_{\text{зан}}$  – коефіцієнт запасу (табл.1 дод. А);  $\eta_{\text{пер}}$  – ККД механічного передавального пристрою.

Номінальну потужність двигуна з умови допустимого нагрівання під час роботи для тривалого режиму роботи (S1) зі змінним навантаженням визначають за умовами:

а) якщо потужність виміряна на валу двигуна:

$$P_{\text{дв.ном.}} \geq P_e; \quad (9)$$

б) якщо виміряна потужність, споживана двигуном з мережі  $P_1=f(t)$ :

$$P_{\text{дв.ном.}} \geq P_e \cdot \eta_{\text{дв}}, \quad (10)$$

де  $\eta_{\text{дв}}$  – номінальний ККД двигуна потужністю  $P_e$ ;

в) якщо навантажувальна діаграма задана у вигляді  $M=f(t)$ :

$$M_{\text{дв.ном.}} \geq M_e; \quad (11)$$

г) якщо навантажувальна діаграма задана у вигляді  $I=f(t)$ :

$$I_{\text{дв.ном.}} \geq I_e. \quad (12)$$

Для короткочасного режиму роботи (S2) випускаються спеціальні електродвигуни АИР...Кр1, АИР...Кр2, АИР...Кр3, потужність яких вибирають за умовами:

$$P_n \geq P_k, \quad t_{\text{к.кат}} \geq t_{\text{к.ф}}, \quad (13)$$

де  $P_k$  –

потужність, визначена за навантажувальною діаграмою;  $t_{\text{р.кат}}$  – каталогове значення тривалості роботи;  $t_{\text{р.ф}}$  – фактичне значення тривалості роботи.

Для короткочасного режиму роботи можна використовувати двигуни, призначені для тривалого режиму роботи, які вибирають за умовами:

$$I_n \geq \frac{I_e}{p_m}; \quad M_n \geq \frac{M_e}{p_m}; \quad P_n \geq \frac{P_e}{p_m}, \quad (14)$$

де  $I_e, M_e, P_e$  – еквівалентні величини, визначені за навантажувальними діаграмами;  $p_m$  – коефіцієнт механічного перевантаження:

$$p_m = \sqrt{\frac{1}{1 - e^{-\frac{t_{\text{к.ф}}}{T_n}}}}, \quad (15)$$

де  $t_{\text{к.ф}}$  – фактична тривалість короткочасної роботи, хв;  $T_n$  – стала часу нагрівання двигуна, хв.

Для повторно-короткочасного режиму роботи (S3) виготовляють електродвигуни з підвищеним ковзанням АИРС, які вибирають за умовою:

$$P_n \geq P_e; TB_{cm} \geq TB_\phi, \quad (16)$$

де  $P_e$  – еквівалентна потужність, визначена за навантажувальною діаграмою за час роботи двигуна  $t_p$ ;  $TB_{cm}$  – стандартна тривалість вмикання;  $TB_\phi$  – фактична тривалість вмикання.

Тривалість вмикання двигуна визначають за формулою:

$$TB \% = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100 \% = \frac{t_p}{t_u} \cdot 100 \%, \quad (17)$$

де  $t_0$  – тривалість паузи;  $t_u$  – тривалість циклу.

Для повторно-короткочасного режиму роботи можна вибрати двигун тривалого режиму роботи. Двигун тривалого режиму роботи, що працює в повторно-короткочасному режимі, вибирають за умовою:

$$P_n \geq P_e \sqrt{TB_\phi}. \quad (18)$$

За частотою обертання двигун вибирають, враховуючи рекомендації, наведені вище.

За визначеними значеннями потужності і частоти обертання з каталогу попередньо вибирають електродвигун і записують його паспортні дані:

$$U_n, P_n, n_n, I_n, \eta_n, \cos \varphi_n, \frac{M_n}{M_n}, \frac{M_{\min}}{M_n}, \frac{M_{\max}}{M_n}, \frac{I_n}{I_n}, j_{\text{рот}},$$

масу  $m$ , клас ізоляції, швидкість наростання температури обмотки  $v_t$ .

## 5. ПЕРЕВІРКА ВИБРАНОГО ДВИГУНА

### 5.1. Перевірка вибраного електродвигуна за тепловим режимом під час пуску

Електродвигун за тепловим режимом під час пуску перевіряють за умовою:

$$\tau_{доп} \geq \tau_{факт} = v_t \cdot t_n, \quad (19)$$

де  $\tau_{доп}$  – допустиме перевищення температури обмотки над температурою охолоджуючого середовища, °C (для класу ізоляції В – 80 °C, для класу F – 100 °C);  $\tau_{факт}$  – фактичне перевищення температури в кінці періоду пуску електродвигуна, °C;  $v_t$  – швидкість наростання температури обмотки при загальмованому роторі, °C/с;  $t_n$  – час пуску електродвигуна, с. Для двигунів АИР  $\tau_{доп}$  приймають 80 °C.

Час пуску електродвигуна визначають графоаналітичним методом. При цьому розв’язують рівняння руху електропривода в кінцевих приростах:

$$M_{дин} = M_{\delta} - M_c = j \frac{\Delta\omega}{\Delta t}, \quad (20)$$

де  $M_{дин}$  – динамічний момент, Н·м;  $M_{\delta}$  – момент електродвигуна, Н·м;  $M_c$  – момент статичних опорів робочої машини, зведений до вала електродвигуна, Н·м;  $j$  – момент інерції системи “електродвигун – робоча машина”, зведений до вала електродвигуна, кг·м<sup>2</sup>;  $\Delta\omega$  – приріст кутової швидкості, рад/с;  $\Delta t$  – приріст часу пуску, с.

Розрахунок проводять у такій послідовності.

Користуючись каталоговими даними, розраховують механічну характеристику електродвигуна  $M_0$  і будують її в першому квадранті прямокутної системи координат (рис.3).

Механічну характеристику електродвигуна при номінальній напрузі живлення розраховують за координатами п'яти характерних точок:

1) точка синхронної швидкості:  $\omega = \omega_0, (s=0), M=0$ .

$$\omega = \frac{\pi n_0}{30}, \quad (21)$$

де  $n_0$  – синхронна частота обертання, об/хв;

2) точка номінальної швидкості:  $\omega = \omega_{ном}, (s=s_n), M=M_n$ .

$$s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0}, \quad (22)$$

де  $s_n$  – номінальне ковзання;  $n_n$  – номінальна частота обертання;

$$\omega_{ном} = \frac{\pi n_{ном}}{30}; \quad (23)$$

$$M_n = 9550 \frac{P_n}{n_n}, \quad (24)$$

де  $P_n$  – номінальна потужність двигуна, кВт;

3) точка критичного моменту:  $\omega = \omega_k, (s=s_k), M=M_k$ .

$$s_k = \frac{s_n + \sqrt{s_n \frac{\mu_k - 1}{\mu_1 - 1}}}{1 + \sqrt{s_n \frac{\mu_k - 1}{\mu_1 - 1}}}, \quad (25)$$

$$\mu = \frac{\mu_k}{\mu_n}, \quad (26)$$

$\mu_k$  – кратність максимального моменту двигуна;  $\mu_n$  – кратність пускового моменту двигуна;

$$\omega_k = \omega_0(1 - s_k); \quad (27)$$

$$M_k = \mu_k \cdot M_n. \quad (28)$$

Якщо каталожні значення кратностей моментів  $\mu_k$  і  $\mu_n$  рівні між собою, то розрахунок за формулою (25) неможливий і значення критичного ковзання  $s_k$  можна прийняти з таблиці для двигуна серії 4А відповідного типорозміру;

4) точка мінімального моменту:  $\omega = \omega_{\min}$ , ( $s_{\min} = 0,8$ ),  $M = M_{\min}$ .

$$\omega_{\min} = \omega_0(1 - s_{\min}); \quad (29)$$

$$M_{\min} = \mu_{\min} \cdot M_n; \quad (30)$$

5) точка пускового моменту:  $\omega = 0$ , ( $s = 1$ ),  $M = M_n$ .

$$M_n = \mu_n \cdot M_n. \quad (31)$$

Згідно з ГОСТ 183-84 допускається виготовляти електродвигуни, в яких критичний, мінімальний і пусковий моменти можуть бути меншими від каталогових значень відповідно на 10, 20 і 15 %. Із врахуванням цього слід визначити уточнені значення моментів:

$$M'_k = 0,9 M_k; \quad M'_{\min} = 0,8 M_{\min}; \quad M'_n = 0,85 M_n,$$

нанести їх на графік і через одержані точки та точки  $M'_n = M_n$  і  $M' = 0$  провести плавну криву.  $S = f(M'_\partial)$ .

Оскільки момент асинхронного електродвигуна змінюється пропорційно квадрату напруги, то необхідно розрахувати і побудувати штучну механічну характеристику електродвигуна з врахуванням допустимого зниження напруги від номінальної на 5 %. Розрахунок проводиться за формулою:

$$M'' = M'(1 - 0,05)^2 = 0,9 \cdot M'. \quad (32)$$

При цьому номінальний, критичний, мінімальний і пусковий моменти мають значення:

$$M'_n = 0,9 \cdot M'_{d.n.}; M''_k = 0,9 \cdot M'_{d.k.}; M''_{d.min} = 0,9 \cdot M'_{d.min}; M''_{d.n} = 0,9 \cdot M'_{d.n.}.$$

За даними розрахунку будують графік  $s = f(M'')$ .

Механічною характеристикою робочої машини називають залежність моменту статичних опорів, які вона створює, від кутової швидкості приводного вала.

Зведену до вала двигуна механічну характеристику робочої машини  $M_c = f(\omega)$  розраховують за рівнянням:

$$M_c = \frac{n}{n_n \cdot \eta_{пер}} \left[ M_{м.о.} + (M_{м.н.} - M_{м.о.}) \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^x \right], \quad (33)$$

де  $n_{м.н.}$  – номінальна частота обертання робочого органа машини, об/хв;  $n_n$  – номінальна частота обертання електродвигуна, об/хв;  $M_{м.о.}$  – початковий момент статичних опорів робочої машини, Н·м;  $M_{м.н.}$  – момент статичних опорів робочої машини при номінальній кутовій швидкості електродвигуна  $\omega_n$ , Н·м;  $\omega$  – кутова швидкість електродвигуна при моменті  $M_c$ , с<sup>-1</sup>;  $x$  – показник степеня, що характеризує зміну моменту статичних опорів робочої машини при зміні швидкості;  $\eta_{пер}$  – ККД передачі від двигуна до робочої машини.

Вихідні дані для розрахунку механічної характеристики робочої машини знаходять шляхом ретельного аналізу кінематичної схеми привода та технологічного процесу, який обслуговує машина.

Момент статичних опорів робочої машини при номінальній кутовій швидкості визначають за формулою:

$$M_{м.н.} = 9550 \frac{P_{м.н.}}{n_{м.н.}}. \quad (34)$$

Для заміни частоти обертання  $n$ , об/хв, на кутову швидкість  $\omega$ , рад/с, користуються виразом:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} . \quad (35)$$

Дані розрахунку механічної характеристики робочої машини заносять в табл. 2 і за ними на рис. 3 будують графік  $M_c = f(\omega)$ .

## 2. Результати розрахунку зведеного моменту статичних опорів робочої машини

|                  |          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |            |
|------------------|----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|------------|
| $\omega, c^{-1}$ | 0        |  |  |  |  |  |  |  |  |  | $\omega_c$ |
| $M_c, H \cdot m$ | $M_{co}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |            |

Для визначення часу пуску двигуна графічно знаходять різницю  $M_{дин} = M''_d - M_c$  і будують графік динамічного моменту  $\omega = f(M_{дин})$ .

Графік  $\omega = f(M_{дин})$  розділяють на окремі ділянки через довільні проміжки швидкості  $\Delta\omega$  і знаходять середнє значення динамічного моменту  $M_{дин.сер.}$  на кожній ділянці. Значення  $\Delta\omega$  вибирають такими, щоб забезпечити достатню точність визначення  $M_{дин.сер.}$

Зведений момент інерції електропривода і робочої машини з обертовими робочими органами до вала електродвигуна, кг/м<sup>2</sup>, визначають за формулою:

$$j_{зв} = j_{рот} + \frac{j_m}{i^2}, \quad (36)$$

де  $j_{рот}$  – момент інерції ротора електродвигуна, кг·м<sup>2</sup>;  $j_m$  – момент

інерції обертових частин робочої машини, кг·м<sup>2</sup>;  $i = \frac{n_n}{n_{м.н.}}$  –

передаточне число механічної передачі.

Якщо в механічній системі є елементи, що рухаються поступально, наприклад стрічки транспортерів, візки, то їх момент інерції до вала електродвигуна зводять за формулою:

$$J_{зв} = \frac{mv^2}{\omega_{дв}^2}, \quad (37)$$

де  $m$  – маса вузлів, що рухаються поступально, кг;  $v$  – швидкість руху, м/с;  $\omega_{дв}$  – кутова швидкість ротора двигуна, рад/с.

Час пуску електропривода на  $i$  ділянці графіка знаходять за виразом:

$$\Delta t_i = \frac{j \cdot \Delta \omega_i}{M_{дин.кр.i}}. \quad (38)$$

Визначивши час пуску на кожній ділянці, повний час пуску визначають за формулою:

$$t_n = \sum_{i=1}^n \Delta t_i. \quad (39)$$

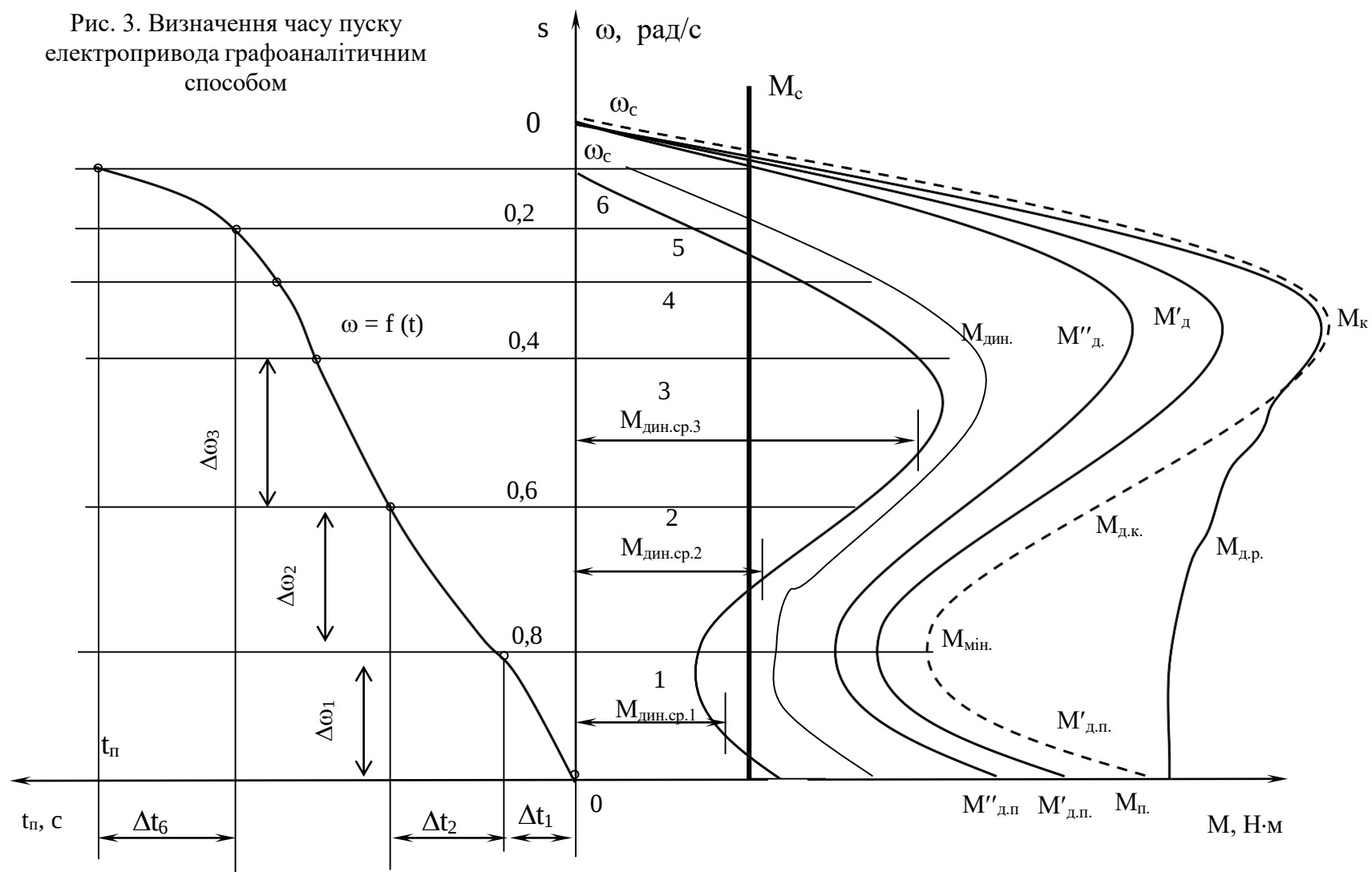
Результати розрахунків зводять в табл. 3.

### 3. Розрахунок часу пуску системи „електродвигун – робоча машина”

| №<br>ділянки | $\Delta \omega_i$ ,<br>рад/с | $M_{дин.кр.i}$ ,<br>Н·м | $\Delta t_i$ , с | $t_n$ , с                                                |
|--------------|------------------------------|-------------------------|------------------|----------------------------------------------------------|
| 1            | $\Delta \omega_1$            | $M_{дин.кр.1}$          | $\Delta t_1$     | $\Delta t_1$                                             |
| 2            | $\Delta \omega_2$            | $M_{дин.кр.2}$          | $\Delta t_2$     | $\Delta t_1 + \Delta t_2$                                |
| ..           | ..                           | ..                      | ..               |                                                          |
| $n$          | $\Delta \omega_n$            | $M_{дин.кр.n}$          | $\Delta t_n$     | $\Delta t_n = \Delta t_1 + \Delta t_2 + .. + \Delta t_n$ |

Графік зміни кутової швидкості в часі  $\omega = f(t)$  будують у другому квадранті (рис. 3). Для цього послідовно відкладають значення приросту часу і відповідні значення кутової швидкості.

Рис. 3. Визначення часу пуску електропривода графоаналітичним способом



Маючи залежності  $\omega = f(t)$  і  $\omega = f(M_o)$ , будують механічну навантажувальну характеристику електродвигуна  $M_o = f(t)$ .

Знаючи час пуску, за формулою (7) перевіряють вибраний двигун на нагрівання під час пуску.

## 5.2. Перевірка вибраного електродвигуна на пусковий момент

Умова перевірки:

$$0,95^2 \cdot 0,85 \cdot \mu_n \cdot M_{o.n.} \geq (1,2 \dots 1,3) M_{зр.р.м.}, \quad (40)$$

де  $\mu_n$  – кратність пускового моменту електродвигуна;  $M_n$  – номінальний момент двигуна, визначений за каталоговими даними, Н·м;  $M_{зр.р.м.}$  – момент зрушення робочої машини, зведений до вала електродвигуна.

Якщо умова (40) не виконується, вибирають двигун більшої потужності або з підвищеним пусковим моментом.

## 5.3. Перевірка вибраного двигуна на перевантажувальну здатність

Умова перевірки:

$$0,95^2 \cdot 0,9 \cdot \mu_k \cdot M_{o.n.} \geq M_{макс.н.д.}, \quad (41)$$

де  $\mu_k$  – кратність максимального моменту двигуна;  $M_{макс.н.д.}$  – максимальний статичний момент на валу електродвигуна при роботі, визначений за навантажувальною діаграмою, Н·м.

Якщо навантажувальна діаграма задана залежністю  $P_2 = f(t)$ , то  $M_{макс.н.д.}$  наближено визначається за формулою:

$$M_{макс.н.д.} = 9550 \frac{P_{2_{макс}}}{n_n}, \quad (42)$$

де  $P_{2_{макс}}$  – максимальна потужність на валу електродвигуна, визначена з навантажувальної діаграми, кВт.

Коли навантажувальна діаграма представлена потужністю, споживаною двигуном  $P_1 = f(t)$ , то максимальне навантаження на його валу визначають так:

$$M_{\text{макс.н.д.}} = 9550 \frac{P_{1\text{макс}} \cdot \eta_n}{n_n},$$

де  $P_{1\text{макс}}$  – максимальна потужність, споживана двигуном, кВт;  $\eta_n$  – номінальний ККД двигуна.

Якщо ж навантажувальна діаграма задана залежністю  $I = f(t)$ , то за даними табл.1 додатка Б будують залежності  $\eta_i$  і  $\cos\varphi_i$  від ступеня завантаження двигуна  $\beta_i = P_2/P_{\text{ном}}$ . Розраховують коефіцієнт завантаження двигуна

$$\beta = I_{\text{макс}}/I_{\text{ном}} \quad (43)$$

і за залежностями  $\eta_i = f(\beta_i)$  і  $\cos\varphi_i = f(\beta_i)$  визначають коефіцієнт корисної дії  $\eta$  і коефіцієнт потужності  $\cos\varphi$  при струмі  $I_{\text{макс}}$ .

Розраховують значення  $M_{\text{макс.н.д.}}$  за формулою:

$$M_{\text{макс.н.д.}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I_{\text{макс}} \cdot \cos\varphi \cdot \eta}{\omega_n}. \quad (44)$$

Якщо умова (41) не виконується, то потрібно вибрати електродвигун більшої потужності і знову зробити його перевірку.

## 6. АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

### 6.1. Побудова функціональної схеми системи автоматичного регулювання

Функціональною схемою САР називається схема, на якій зображенні функціональні елементи системи та зв'язки між ними. Функціональні елементи на схемі позначають у вигляді прямокутників, всередині яких великими буквами скорочено пишуть назву елемента. Зв'язки між елементами показують лініями, а їх напрямки - стрілками. Функціональна схема подає систему автоматичного регулювання у вигляді складових частин, розділених за функціональним призначенням. У загальному випадку функціональна схема САР складається з таких основних функціональних елементів: сприймаючого елемента (СЕ), елемента порівняння, підсилювального елемента (ПЕ) виконавчого механізму (ВМ) та об'єкту управління (ОУ). Крім функціональних елементів та зв'язків між ними, на схемі великими буквами над елементами вказують конкретні пристрої, які виконують відповідні функції в системі, а також конкретні фізичні величини на вході і виході кожного функціонального елемента. Загалом функціональна схема показує не тільки складові елементи системи та зв'язки між ними, але і процес перетворення й передачі сигналів в замкнутій системі автоматичного керування

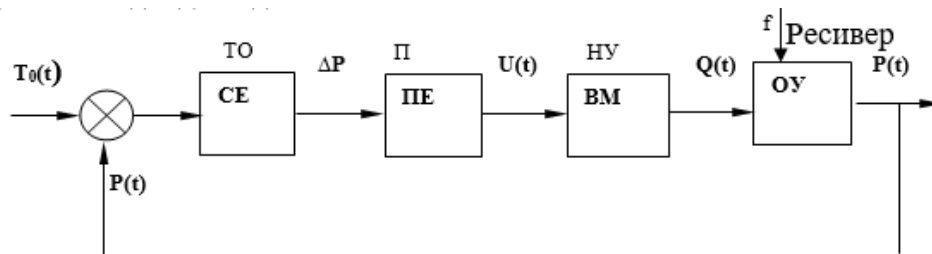


Рис. 4. Функціональна схема

## **6.2. Визначення передаточної функції елементів системи**

Передаточною функцією елемента називається відношення Лапласових зображень його вихідної величини до вхідної при нульових початкових умовах. Аналіз елементів системи автоматичного регулювання слід починати з передаточних функцій елементів системи.

Аналізуючи як проходить заданий технологічний процес і співставляючи задані параметри функціональних елементів з параметрами передаточних функцій елементарних ланок визначаємо передаточні функції елементів заданої системи.

Усі елементи автоматичних систем автоматичного регулювання в динамічних режимах описуються диференціальними рівняннями. Для визначення їх передаточних функцій необхідно перейти від диференціальних рівнянь до зображень використовуючи математичний метод, який одержав назву перетворення Лапласа. Перетворення Лапласа дає можливість виконати алгебраїзацію диференціальних рівнянь, тобто операції диференціювання і інтегрування замінити алгебраїчними операціями множення і ділення. Це дає можливість знайти характеристичне рівняння елементів САР з якого і визначають передаточні функції.

## **6.3. Побудова структурно-алгоритмічної схеми САУ**

Структурна алгоритмічна схема являє собою графічне зображення динамічних властивостей функціональних елементів системи, яке описує математичну модель процесу управління. Вона показує з яких динамічних типових ланок складається система і як вони з'єднанні між собою. Структурно – алгоритмічну схему САР складають, користуючись

функціональною схемою і передаточними функціями окремих елементів системи. Елементи системи, які на функціональній схемі, зображені у вигляді прямокутників, а зв'язки між ними - лініями зі стрілками у відповідному напрямку. У графічні зображення елементів системи записують їх передаточні функції.

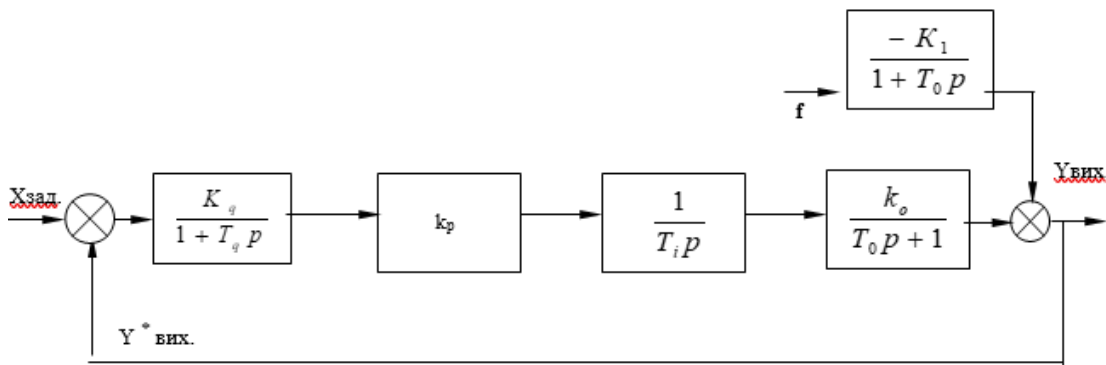


Рис. 5. Структурно-алгоритмічна схема САУ

#### 6.4. Визначення передаточної функції САУ: розімкнутої системи за заданною дією, за збуренням, за похибкою

Для визначення еквівалентних передаточних функцій з'єднань ланок використовують такі формули:

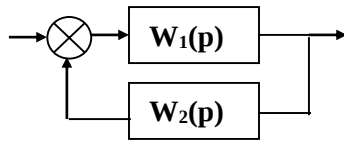
- для послідовно з'єднаних ланок

$$\begin{array}{c} \rightarrow \boxed{W_1(p)} \rightarrow \boxed{W_2(p)} \rightarrow \end{array} \quad W_{екв}(p) = W_1(p) \cdot W_2(p); \quad (45)$$

- для паралельно з'єднаних ланок

$$\begin{array}{c} \rightarrow \begin{array}{l} \boxed{W_1(p)} \\ \boxed{W_2(p)} \end{array} \rightarrow \otimes \rightarrow \end{array} \quad W_{екв}(p) = W_1(p) + W_2(p); \quad (46)$$

- для з'єднання з від'ємним зворотним зв'язком



$$W_{екв}(p) = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p)} \quad (47)$$

Передаточна функція розімкнутої САР визначається формулою для послідовно з'єднаних ланок. Передаточна функція розімкнутої САР буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} W(p) &= W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_o(p) = \frac{k_q k_o k_p}{(1 + T_q p)(1 + T_o p) T_i p} = \frac{1,4 \cdot 0,5}{(1 + 1,5 p)(1 + 10 p) 8 p} = \\ &= \frac{0,7}{(1 + 1,5 p)(1 + 10 p) 8 p} \end{aligned}$$

Передаточна функція замкнутої системи визначається формулою для з'єднання зі зворотнім зв'язком. Передаточна функція замкнутої системи відносно заданої дії  $T_o$  буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} W_q(p) &= \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{\frac{k_q k_o k_p}{(1 + T_q p)(1 + T_o p) T_i p}}{1 + \frac{k_q k_o k_p}{(1 + T_q p)(1 + T_o p) T_i p}} = \frac{\frac{k_q k_o k_p}{(1 + T_q p)(1 + T_o p) T_i p}}{\frac{(1 + T_q p)(1 + T_o p) T_i p}{(1 + T_q p)(1 + T_o p) T_i p} + \frac{k_q k_o k_p}{(1 + T_q p)(1 + T_o p) T_i p}} = \\ &= \frac{k_q k_o k_p}{(1 + T_q p)(1 + T_o p) T_i p + k_q k_o k_p} = \frac{0,5 \cdot 1,4}{(1 + 1,5 p)(1 + 10 p) \cdot 8 p + 0,5 \cdot 1,4} = \\ &= \frac{0,7}{120 p^3 + 12 p^2 + 88 p + 0,7} \end{aligned}$$

Передаточна функція замкнутої системи відносно збурювальної дії  $f$  запишеться:

$$\begin{aligned}
W_f(p) &= \frac{W_{of}(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{\frac{-k_1}{T_o p + 1}}{1 + \frac{k_q k_p k_0}{(T_q p + 1)(T_o p + 1)T_i p}} = \frac{\frac{-k_1}{T_o p + 1}}{\frac{(T_q p + 1)(T_o p + 1)T_i p + k_q k_p k_0}{(T_q p + 1)(T_o p + 1)T_i p}} \\
&= \frac{-k_1 (T_q p + 1)T_i p}{(T_q p + 1)(T_o p + 1)T_i p + k_q k_p k_0} = \frac{0,3(1,5 + 1)8 p}{120 p^3 + 12 p^2 + 88 p + 0,7} = \\
&= \frac{(1,5 + 1)2,4 p}{120 p^3 + 12 p^2 + 88 p + 0,7}
\end{aligned}$$

Передаточна функція замкнутої системи відносно похибки  $\Delta T$  запишеться:

$$\begin{aligned}
W_2(p) &= \frac{1}{1 + W_p(p)} = \frac{1}{1 + \frac{k_q k_p k_0}{(T_q p + 1)(T_o p + 1)T_i p}} = \frac{1}{\frac{(T_q p + 1)(T_o p + 1)T_i p + k_q k_p k_0}{(T_q p + 1)(T_o p + 1)T_i p}} = \\
&= \frac{(T_q p + 1)(T_o p + 1)T_i p}{(T_q p + 1)(T_o p + 1)T_i p + k_q k_p k_0} = \frac{120 p^3 + 12 p^2 + 88 p}{120 p^3 + 12 p^2 + 88 p + 0,7}
\end{aligned}$$

## 6.5. Побудова перехідного процесу САУ та визначення показників якості

Криву перехідного процесу будуюмо використовуючи передаточну функцію замкнутої системи відносно керуючої дії в прикладній програмі Scilab:

### Приклад

Вибрати електродвигун для привода вентилятора димогенератора продуктивністю  $L = 550 \text{ м}^3/\text{год}$  при тиску 10 Па, ККД вентилятора – 0,6, частота обертання 1400 об/хв., момент інерції робочого колеса  $J_b = 0,0035 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Робоче колесо насаджене на вал двигуна. Режим роботи тривалий S1.

Розрахункова потужність електродвигуна вентилятора, кВт, з урахуванням запасу потужності:

$$P_{роз.} = \frac{K_3 \cdot L_l \cdot p}{3600 \cdot \eta_B \cdot \eta_n} = \frac{1,2 \cdot 550 \cdot 10}{3600 \cdot 0,6 \cdot 1} = 0,52 \text{ кВт.}$$

де  $K_3$  – коефіцієнт запасу потужності на пусковий момент (табл.2 дод.А);  $p$  – повний тиск, Па;  $L_d$  – продуктивність вентилятора;  $\eta_B$  – ККД вентилятора;  $\eta_n$  – ККД передачі.

Номинальну потужність двигуна визначаємо з умови:

$$P_{ном} \geq P_{роз.}$$

Живлення електродвигуна передбачається трифазним змінним струмом напругою 380 В частотою 50 Гц.

Вибираємо електродвигун АИР71А4. Оскільки механічна передача між двигуном і вентилятором відсутня, то вибираємо 4-полюсний двигун загального призначення з синхронною частотою обертання 1500 об/хв.

Технічна характеристика двигуна АИР71А4:  $U_n = 380 \text{ В}$ ,  $f_n = 50 \text{ Гц}$ ;  $P_n = 0,55 \text{ кВт}$ ,  $n_n = 1360 \text{ об/хв}$ ,  $\eta_n = 70,5\%$ ;  $\cos \varphi_n = 0,7$ ;  $\mu_k = 2,2$ ;  $\mu_p = 2,0$ ;  $\mu_{\min} = 1,8$ ;  $J_{рот} = 0,0013 \text{ кг/м}^2$ ,  $\nu_t = 5,9 \text{ }^\circ\text{C/с}$ , схема з'єднання обмоток статора - «зірка», клас ізоляції В.

### **Перевірка вибраного електродвигуна**

#### *Перевірка за тепловим режимом під час пуску*

Механічну характеристику двигуна розраховуємо за його каталоговими даними, для чого знаходимо координати п'яти характерних точок.

Координати точки 1:  $M_1 = 0$ ;  $s_1 = 0$ .

Координати точки 2:

$$M_2 = M_n = 9550 \cdot \frac{P_n}{n_n} = 9550 \cdot \frac{0,55}{1360} = 3,86 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_2 = s_n = \frac{n_o - n_n}{n_o} = \frac{1500 - 1360}{1500} = 0,093 \cdot$$

Координати точки 3:  $M_3 = M_{кр}$ ;  $s_3 = s_{кр}$ ;  $M_{кр} = M_n \cdot \mu_{кр} = 3,86 \cdot 2,2 = 8,49 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;

$$s_{кр} = \frac{s_{ном} + \sqrt{s_{ном} \cdot \frac{\mu_{кр} - 1}{\mu_1 - 1}}}{1 + \sqrt{s_{ном} \cdot \frac{\mu_{кр} - 1}{\mu_1 - 1}}} = \frac{0,093 + \sqrt{0,093 \cdot \frac{2,2 - 1}{1,1 - 1}}}{1 + \sqrt{0,093 \cdot \frac{2,2 - 1}{1,1 - 1}}} = 0,56$$

$$\mu_1 = \mu_{кр} / \mu_{пуск} = 2,2 / 2 = 1,1.$$

Координати точки 4:

$$M_4 = M_n \cdot \mu_{min} = 3,86 \cdot 1,8 = 6,95 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad s_4 = s_{min} = 0,8.$$

Координати точки 5:

$$M_5 = M_n \cdot \mu_{пуску} = 3,86 \cdot 2 = 7,72 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad s_5 = 1.$$

Координати механічної характеристики  $s = f(M')$  з урахуванням допустимих відхилень моментів:

- 1)  $s = 0$ ;  $M' = 0 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;
- 2)  $s_n = 0,093$ ;  $M'_n = 3,86 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;
- 3)  $s_k = 0,56$ ;  $M'_k = 0,9 \cdot M_k = 0,9 \cdot 8,49 = 7,64 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;
- 4)  $s_{min} = 0,8$ ;  $M'_{min} = 0,8 \cdot M_{min} = 0,8 \cdot 6,95 = 5,56 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;
- 5)  $s_n = 1$ ;  $M'_n = 0,85 \cdot M_n = 0,85 \cdot 7,72 = 6,56 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Координати механічної характеристики  $s = f(M'')$  з урахуванням допустимих відхилень напруги ( $-5\%$ ):

- 1)  $s = 0$ ;  $M'' = 0 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;
- 2)  $s_n = 0,093$ ;  $M''_n = (0,95)^2 \cdot M'_n = (0,95)^2 \cdot 3,86 = 3,48 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;
- 3)  $s_k = 0,56$ ;  $M''_k = (0,95)^2 \cdot M'_k = (0,95)^2 \cdot 7,64 = 6,89 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;
- 4)  $s_{min} = 0,8$ ;  $M''_{min} = (0,95)^2 \cdot M'_{min} = (0,95)^2 \cdot 5,56 = 5,02 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;
- 5)  $s_n = 1$ ;  $M''_n = (0,95)^2 \cdot M'_n = (0,95)^2 \cdot 6,56 = 5,92 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Значення швидкості обертання при ковзаннях  $s=0$ ;  $s_n$ ;  $s_k$ ;  $s_{min}$  і  $s=1$  розраховуємо за формулами.

Результати розрахунків заносимо до табл. 5.

Розрахункові дані для побудови механічної характеристики  
електродвигуна

|                              |      |       |      |      |      |
|------------------------------|------|-------|------|------|------|
| $s$                          | 0    | 0,093 | 0,56 | 0,8  | 1    |
| $\omega, \text{рад/с}$       | 1500 | 1360  | 660  | 300  | 0    |
| $M, \text{Н}\cdot\text{м}$   | 0    | 3,86  | 8,49 | 6,95 | 7,72 |
| $M', \text{Н}\cdot\text{м}$  | 0    | 3,86  | 7,64 | 5,56 | 6,56 |
| $M'', \text{Н}\cdot\text{м}$ | 0    | 3,48  | 6,89 | 5,02 | 5,92 |

Механічні характеристики двигуна  $\omega=f(M)$ ,  $\omega=f(M')$   $\omega=f(M'')$  будуємо на рис.6.

Розраховуємо механічну характеристику вентилятора за формулою:

а) номінальний момент вентилятора:

$$M_{сн} = 9550 \cdot \frac{P_{роз.в.}}{n_n} = 9550 \cdot \frac{0,52}{1360} = 3,86 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

б) номінальна кутова швидкість вентилятора:

$$\omega_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1360}{60} = 142,35 \text{ рад/с.};$$

в) момент зрушення:

$$M_{co} = 0,15 \cdot M_{сн} = 0,15 \cdot 3,86 = 0,579 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Результати розрахунків заносимо до табл. 6.

Розрахункова механічна характеристика вентилятора

|                               |      |      |      |      |     |     |     |        |     |
|-------------------------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|--------|-----|
| $\omega_{р.м.}, \text{рад/с}$ | 0    | 20   | 40   | 60   | 80  | 100 | 120 | 142,35 | 157 |
| $M_c, \text{Н}\cdot\text{м}$  | 0,59 | 0,64 | 0,84 | 1,16 | 1,6 | 2,2 | 2,9 | 3,9    | 4,6 |

Механічну характеристику вентилятора  $\omega = f(M_c)$  будуємо на рис.

6.

Момент інерції, зведений до вала двигуна, визначаємо за формулою:

$$J_{зв} = 0,0013 + 0,0035 = 0,0048 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Вісь  $\omega$  розбиваємо на 7 ділянок з кроком  $\Delta\omega = 20 \text{ рад/с}$ .

в) момент зрушення:

$$M_{co} = 0,15 \cdot M_{сн} = 0,15 \cdot 3,86 = 0,579 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Результати розрахунків заносимо до табл. 6.

Розрахункова механічна характеристика вентилятора

|                              |      |      |      |      |     |     |     |        |     |
|------------------------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|--------|-----|
| $\omega_{р.м.},$<br>$рад/с$  | 0    | 20   | 40   | 60   | 80  | 100 | 120 | 142,35 | 157 |
| $M_c, \text{Н}\cdot\text{м}$ | 0,59 | 0,64 | 0,84 | 1,16 | 1,6 | 2,2 | 2,9 | 3,9    | 4,6 |

Механічну характеристику вентилятора  $\omega = f(M_c)$  будуємо на рис.

6.

Момент інерції, зведений до вала двигуна, визначаємо за формулою:

$$J_{зв} = 0,0013 + 0,0035 = 0,0048 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Вісь  $\omega$  розбиваємо на 7 ділянок з кроком  $\Delta\omega = 20 \text{ рад/с}$ .

На кожній ділянці визначаємо динамічний момент привода

$M_{дин}$  за формулою:  $M_{дин} = M_{дв} - M_c$  (табл. 7).

Розрахунок динамічного моменту привода вентилятора

|                                  |      |      |     |      |      |      |      |     |
|----------------------------------|------|------|-----|------|------|------|------|-----|
| $M_{дв}, \text{Н}\cdot\text{м}$  | 5,92 | 5,14 | 5,5 | 6,83 | 6,63 | 5,85 | 4,85 | 3,7 |
| $M_c, \text{Н}\cdot\text{м}$     | 0,58 | 0,62 | 0,8 | 1,15 | 1,6  | 2,2  | 2,9  | 3,7 |
| $M_{дин}, \text{Н}\cdot\text{м}$ | 5,34 | 4,52 | 4,7 | 5,68 | 5,03 | 3,65 | 1,95 | 0   |

Усереднюємо динамічний момент на ділянках за виразом:

$$M_{\text{дин.сер}} = \frac{M_{\text{дин1}} + M_{\text{дин2}}}{2} = \frac{5,34 + 4,52}{2} = 4,9 \text{ Нм.}$$

Результати заносимо в табл. 8.

Розрахунок часу пуску привода

|                               |      |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\Delta\omega$ , рад/с        | 20   | 20    | 20    | 20    | 20    | 20    | 19    |
| $M_{\text{дин.сер}}$ ,<br>Н·м | 4,9  | 4,55  | 5,2   | 5,45  | 4,35  | 2,8   | 1,0   |
| $\Delta t$ , с                | 0,02 | 0,021 | 0,018 | 0,017 | 0,022 | 0,034 | 0,096 |

Визначаємо приріст швидкості  $\Delta t$  на кожній ділянці:

$$\Delta t = j_{\text{зв}} \cdot \frac{\Delta\omega i}{M_{\text{дин}}} = \frac{0,0048 \cdot 20}{4,9} = 0,02 \text{ с.}$$

Результати заносимо в табл. 8.

Визначаємо час пуску електродвигуна:

$$t_{\text{пуску}} = \sum \Delta t_i = 0,02 + 0,021 + 0,018 + 0,017 + 0,022 + 0,034 + 0,096 = 0,228 \text{ с.}$$

Перевірку за тепловим режимом під час пуску виконуємо за формулою:

$$80 > 5,9 \cdot 0,228 = 1,35 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

Таким чином, двигун під час пуску не перегріватиметься. Перевірку двигуна на пусковий момент виконуємо за формулою:

$$0,8 \cdot 7,72 = 6,2 > M_{\text{зр. р.м.}} = 0,579 \text{ Н·м.}$$

Отже, двигун успішно запустить робочу машину.

Перевірку вибраного двигуна на перевантажувальну здатність не проводимо, оскільки двигун працює з постійним навантаженням, меншим за його номінальну потужність.

Згідно з ГОСТ 2479 – 79 за конструктивним виконанням та способом монтажу приймаємо електродвигун виконання ІМ3081.

Ступінь захисту двигуна ІР54. Кліматичне виконання і категорія розміщення У2.

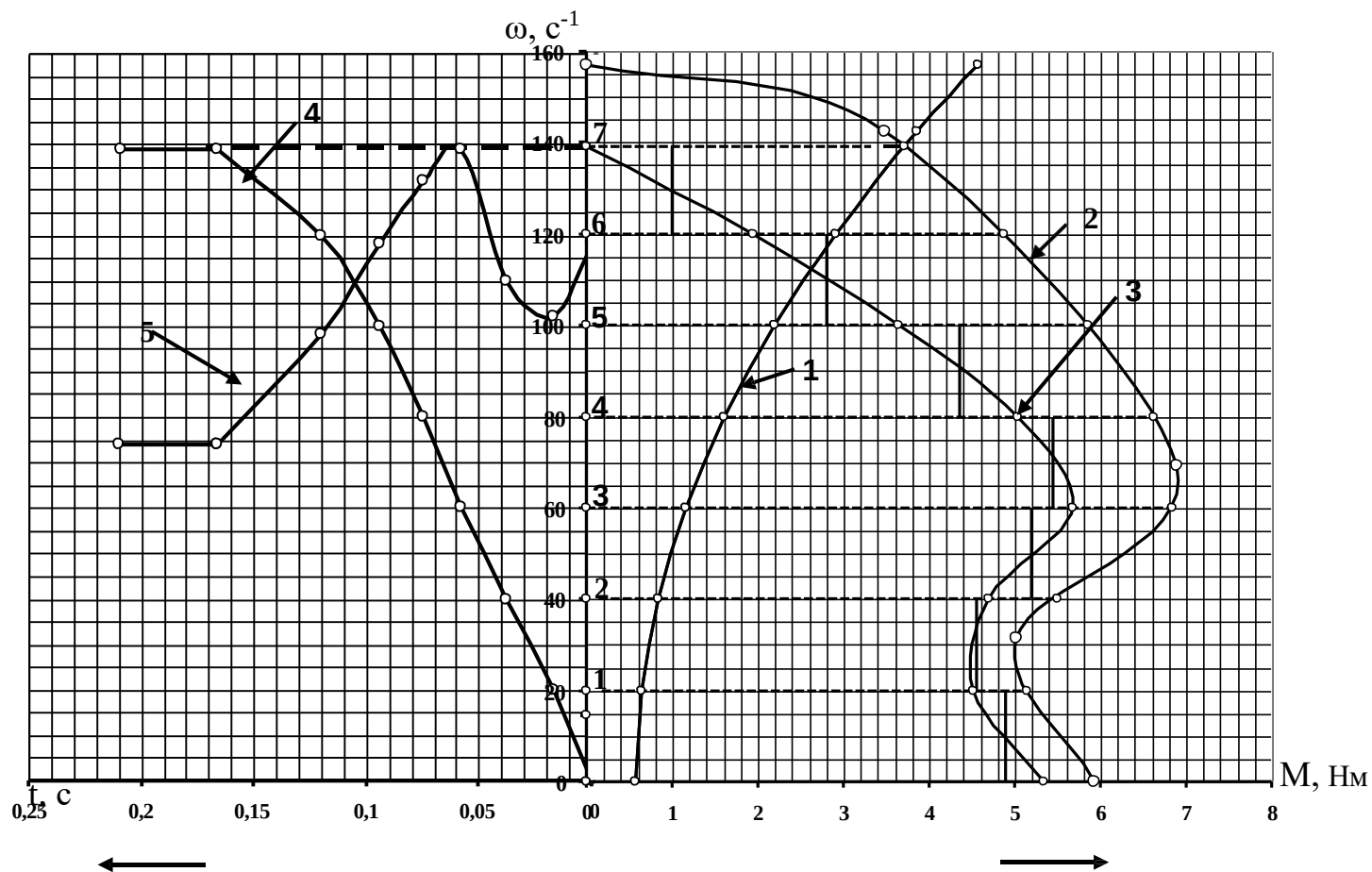


Рис. 6. Побудова кривих перехідного процесу: 1 – механічна характеристика робочої машини  $\omega = f(M_c)$ ; 2 – механічна характеристика електродвигуна  $\omega = f(M''_{\partial\theta})$ ; 3 – динамічна характеристика  $\omega = f(M_{\partial\text{ин}})$ ; 4 – час розгону електродвигуна  $\omega = f(t)$ ; 5 – характеристика зміни моменту електродвигуна за час розгону  $M_{\partial\theta} = f(t)$ .

## ДОДАТКИ

### Додаток А

#### Завдання для комплексного курсового проєкту

Розрахувати основні параметри електроприводу відцентрового насосного агрегату установки на базі асинхронного електродвигуна з короткозамкнутим ротором згідно таблиці 1.

Таблиця 1

#### Номинальні параметри відцентрових насосів

| №<br>варіанта | Подача, м <sup>3</sup> /год | Напір, м | Частота<br>обертання/хв | ККД, % |
|---------------|-----------------------------|----------|-------------------------|--------|
| 1.            | 400                         | 110      | 2900                    | 0,82   |
| 2.            | 350                         | 105      | 1450                    | 0,83   |
| 3.            | 300                         | 100      | 985                     | 0,81   |
| 4.            | 250                         | 95       | 2900                    | 0,82   |
| 5.            | 200                         | 90       | 1450                    | 0,83   |
| 6.            | 150                         | 85       | 985                     | 0,81   |
| 7.            | 100                         | 80       | 2900                    | 0,82   |
| 8.            | 400                         | 75       | 1450                    | 0,83   |
| 9.            | 350                         | 70       | 985                     | 0,81   |
| 10.           | 300                         | 65       | 2900                    | 0,82   |
| 11.           | 250                         | 60       | 1450                    | 0,83   |
| 12.           | 200                         | 110      | 985                     | 0,81   |
| 13.           | 150                         | 105      | 2900                    | 0,82   |
| 14.           | 100                         | 100      | 1450                    | 0,83   |
| 15.           | 400                         | 95       | 985                     | 0,81   |
| 16.           | 350                         | 90       | 2900                    | 0,82   |
| 17.           | 300                         | 85       | 1450                    | 0,83   |
| 18.           | 250                         | 80       | 985                     | 0,81   |
| 19.           | 200                         | 75       | 2900                    | 0,82   |
| 20.           | 150                         | 70       | 1450                    | 0,83   |
| 21.           | 100                         | 65       | 985                     | 0,81   |
| 22.           | 400                         | 60       | 2900                    | 0,82   |
| 23.           | 350                         | 110      | 1450                    | 0,83   |
| 24.           | 300                         | 105      | 985                     | 0,81   |
| 25.           | 250                         | 100      | 2900                    | 0,82   |
| 26.           | 200                         | 95       | 1450                    | 0,83   |
| 27.           | 150                         | 90       | 985                     | 0,81   |
| 28.           | 100                         | 85       | 2900                    | 0,82   |
| 29.           | 400                         | 80       | 1450                    | 0,83   |
| 30.           | 350                         | 75       | 985                     | 0,81   |
| 31.           | 300                         | 70       | 2900                    | 0,82   |
| 32.           | 250                         | 65       | 1450                    | 0,83   |
| 33.           | 200                         | 60       | 985                     | 0,81   |

|     |     |     |      |      |
|-----|-----|-----|------|------|
| 34. | 150 | 110 | 2900 | 0,82 |
| 35. | 100 | 105 | 1450 | 0,83 |
| 36. | 400 | 100 | 985  | 0,81 |
| 37. | 350 | 95  | 2900 | 0,82 |
| 38. | 300 | 90  | 1450 | 0,83 |
| 39. | 250 | 85  | 985  | 0,81 |
| 40. | 200 | 80  | 2900 | 0,82 |
| 41. | 150 | 75  | 1450 | 0,83 |
| 42. | 100 | 70  | 985  | 0,81 |
| 43. | 400 | 65  | 2900 | 0,82 |
| 44. | 350 | 60  | 1450 | 0,83 |
| 45. | 300 | 110 | 985  | 0,81 |
| 46. | 250 | 105 | 2900 | 0,82 |
| 47. | 200 | 100 | 1450 | 0,83 |
| 48. | 150 | 95  | 985  | 0,81 |
| 49. | 100 | 90  | 2900 | 0,82 |
| 50. | 400 | 85  | 1450 | 0,83 |
| 51. | 350 | 80  | 985  | 0,81 |
| 52. | 300 | 75  | 2900 | 0,82 |
| 53. | 250 | 70  | 1450 | 0,83 |
| 54. | 200 | 65  | 985  | 0,81 |
| 55. | 150 | 60  | 2900 | 0,82 |
| 56. | 100 | 110 | 1450 | 0,83 |
| 57. | 400 | 105 | 985  | 0,81 |
| 58. | 350 | 100 | 2900 | 0,82 |
| 59. | 300 | 95  | 1450 | 0,83 |
| 60. | 250 | 90  | 985  | 0,81 |
| 61. | 200 | 85  | 2900 | 0,82 |
| 62. | 150 | 80  | 1450 | 0,83 |
| 63. | 100 | 75  | 985  | 0,81 |
| 64. | 400 | 70  | 2900 | 0,82 |
| 65. | 350 | 65  | 1450 | 0,83 |
| 66. | 300 | 60  | 985  | 0,81 |
| 67. | 250 | 110 | 2900 | 0,82 |
| 68. | 200 | 105 | 1450 | 0,83 |
| 69. | 150 | 100 | 985  | 0,81 |
| 70. | 100 | 95  | 2900 | 0,82 |
| 71. | 400 | 90  | 1450 | 0,83 |
| 72. | 350 | 85  | 985  | 0,81 |
| 73. | 300 | 80  | 2900 | 0,82 |
| 74. | 250 | 75  | 1450 | 0,83 |
| 75. | 200 | 70  | 985  | 0,81 |
| 76. | 150 | 65  | 2900 | 0,82 |
| 77. | 100 | 60  | 1450 | 0,83 |

Розрахувати основні параметри електроприводу відцентрової вентиляційної установки на базі асинхронного електродвигуна з короткозамкнутим ротором згідно таблиці 2

Таблиця 2

Номінальні параметри відцентрових вентиляторів

| №<br>варіанта | Продуктивність (м³/год) | Тиск (Па) | Частота<br>обертання<br>(об/хв) | ККД  |
|---------------|-------------------------|-----------|---------------------------------|------|
| 1.            | 5000                    | 40        | 2900                            | 0,82 |
| 2.            | 4500                    | 35        | 1450                            | 0,83 |
| 3.            | 4000                    | 30        | 985                             | 0,81 |
| 4.            | 3500                    | 25        | 2900                            | 0,82 |
| 5.            | 3000                    | 20        | 1450                            | 0,83 |
| 6.            | 2500                    | 40        | 985                             | 0,81 |
| 7.            | 2000                    | 35        | 2900                            | 0,82 |
| 8.            | 1500                    | 30        | 1450                            | 0,83 |
| 9.            | 1000                    | 25        | 985                             | 0,81 |
| 10.           | 5000                    | 20        | 2900                            | 0,82 |
| 11.           | 4500                    | 40        | 1450                            | 0,83 |
| 12.           | 4000                    | 35        | 985                             | 0,81 |
| 13.           | 3500                    | 30        | 2900                            | 0,82 |
| 14.           | 3000                    | 25        | 1450                            | 0,83 |
| 15.           | 2500                    | 20        | 985                             | 0,81 |
| 16.           | 2000                    | 40        | 2900                            | 0,82 |
| 17.           | 1500                    | 35        | 1450                            | 0,83 |
| 18.           | 1000                    | 30        | 985                             | 0,81 |
| 19.           | 5000                    | 25        | 2900                            | 0,82 |
| 20.           | 4500                    | 20        | 1450                            | 0,83 |
| 21.           | 4000                    | 40        | 985                             | 0,81 |
| 22.           | 3500                    | 35        | 2900                            | 0,80 |
| 23.           | 3000                    | 30        | 1450                            | 0,80 |
| 24.           | 2500                    | 25        | 985                             | 0,80 |
| 25.           | 2000                    | 20        | 2900                            | 0,80 |
| 26.           | 1500                    | 40        | 1450                            | 0,80 |
| 27.           | 1000                    | 35        | 985                             | 0,80 |
| 28.           | 5000                    | 30        | 2900                            | 0,80 |
| 29.           | 4500                    | 25        | 1450                            | 0,80 |
| 30.           | 4000                    | 20        | 985                             | 0,80 |
| 31.           | 3500                    | 40        | 2900                            | 0,80 |
| 32.           | 3000                    | 35        | 1450                            | 0,80 |
| 33.           | 2500                    | 30        | 985                             | 0,80 |
| 34.           | 2000                    | 25        | 2900                            | 0,90 |
| 35.           | 1500                    | 20        | 1450                            | 0,90 |
| 36.           | 1000                    | 40        | 985                             | 0,90 |
| 37.           | 5000                    | 35        | 2900                            | 0,90 |
| 38.           | 4500                    | 30        | 1450                            | 0,90 |

|     |      |    |      |      |
|-----|------|----|------|------|
| 39. | 4000 | 25 | 985  | 0,90 |
| 40. | 3500 | 20 | 2900 | 0,90 |
| 41. | 3000 | 40 | 1450 | 0,90 |
| 42. | 2500 | 35 | 985  | 0,90 |
| 43. | 2000 | 30 | 2900 | 0,90 |
| 44. | 1500 | 25 | 1450 | 0,90 |
| 45. | 1000 | 20 | 985  | 0,90 |
| 46. | 5000 | 40 | 2900 | 0,90 |
| 47. | 4500 | 35 | 1450 | 0,85 |
| 48. | 4000 | 30 | 985  | 0,85 |
| 49. | 3500 | 25 | 2900 | 0,85 |
| 50. | 3000 | 20 | 1450 | 0,85 |
| 51. | 2500 | 40 | 985  | 0,85 |
| 52. | 2000 | 35 | 2900 | 0,85 |
| 53. | 1500 | 30 | 1450 | 0,85 |
| 54. | 1000 | 25 | 985  | 0,85 |
| 55. | 5000 | 20 | 2900 | 0,85 |
| 56. | 4500 | 40 | 1450 | 0,85 |
| 57. | 4000 | 35 | 985  | 0,85 |
| 58. | 3500 | 30 | 2900 | 0,85 |
| 59. | 3000 | 25 | 1450 | 0,82 |
| 60. | 2500 | 20 | 985  | 0,82 |
| 61. | 2000 | 40 | 2900 | 0,82 |
| 62. | 1500 | 35 | 1450 | 0,82 |
| 63. | 1000 | 30 | 985  | 0,82 |
| 64. | 5000 | 25 | 2900 | 0,82 |
| 65. | 4500 | 20 | 1450 | 0,82 |
| 66. | 4000 | 40 | 985  | 0,82 |
| 67. | 3500 | 35 | 2900 | 0,82 |
| 68. | 3000 | 30 | 1450 | 0,82 |
| 69. | 2500 | 25 | 985  | 0,82 |
| 70. | 2000 | 20 | 2900 | 0,82 |
| 71. | 1500 | 40 | 1450 | 0,82 |
| 72. | 1000 | 35 | 985  | 0,82 |
| 73. | 5000 | 30 | 2900 | 0,82 |
| 74. | 4500 | 25 | 1450 | 0,82 |
| 75. | 4000 | 20 | 985  | 0,82 |

Асинхронний електропривід живиться напругою 380 В, частота  $f = 50$  Гц.

## Додаток Б

Значення коефіцієнтів запасу при визначенні потужності двигунів

### 1. Значення коефіцієнту запасу для насосів

| Потужність насоса, кВт | До 1,5 | Від 1,5 до 4,0 | Від 4,0 до 35,0 | Більше 35,0 |
|------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------|
| Коефіцієнт запасу      | 1,5    | 1,2            | 1,15            | 1,1         |

### 2. Значення коефіцієнту запасу для вентиляторів

| Потужність вентилятора, кВт                     | До 0,5 | 0,6 – 1 | 1,1 – 2 | 2,1 – 3 | 3,1 і більше |
|-------------------------------------------------|--------|---------|---------|---------|--------------|
| Коефіцієнт запасу для відцентрових вентиляторів | 1,5    | 1,3     | 1,2     | 1,15    | 1,1          |

## Додаток В

### 1. Залежність ККД та коефіцієнта потужності двигунів АВВ від ступеня завантаження

| $\beta$                     |                       |       |       |       |       |                        |      |      |      |      |                          |
|-----------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|------------------------|------|------|------|------|--------------------------|
| P <sub>н</sub> ,<br>кВт     | ККД при $\beta=P/P_n$ |       |       |       |       | cosφ при $\beta=P/P_n$ |      |      |      |      | V <sub>t</sub> ,<br>°C/c |
|                             | 0,25                  | 0,5   | 0,75  | 1,0   | 1,25  | 0,25                   | 0,5  | 0,75 | 1,0  | 1,25 |                          |
| n <sub>0</sub> = 3000 об/хв |                       |       |       |       |       |                        |      |      |      |      |                          |
| 0,09                        | 0,42                  | 0,555 | 0,60  | 0,60  | 0,575 | 0,32                   | 0,52 | 0,64 | 0,75 | 0,77 | 1,2                      |
| 0,12                        | 0,485                 | 0,60  | 0,635 | 0,63  | 0,58  | 0,32                   | 0,53 | 0,65 | 0,75 | 0,77 | 1,0                      |
| 0,18                        | 0,52                  | 0,64  | 0,68  | 0,68  | 0,63  | 0,35                   | 0,56 | 0,68 | 0,78 | 0,82 | 3,7                      |
| 0,25                        | 0,57                  | 0,68  | 0,70  | 0,69  | 0,65  | 0,36                   | 0,58 | 0,72 | 0,79 | 0,82 | 3,7                      |
| 0,37                        | 0,64                  | 0,73  | 0,74  | 0,72  | 0,67  | 0,45                   | 0,69 | 0,80 | 0,86 | 0,89 | 5,5                      |
| 0,55                        | 0,70                  | 0,76  | 0,76  | 0,75  | 0,70  | 0,47                   | 0,68 | 0,79 | 0,85 | 0,87 | 6,5                      |
| 0,75                        | 0,72                  | 0,79  | 0,795 | 0,785 | 0,75  | 0,49                   | 0,70 | 0,80 | 0,85 | 0,87 | 8,1                      |
| 1,1                         | 0,77                  | 0,81  | 0,81  | 0,79  | 0,75  | 0,49                   | 0,71 | 0,80 | 0,85 | 0,87 | 10,9                     |
| 1,5                         | 0,73                  | 0,805 | 0,815 | 0,81  | 0,79  | 0,48                   | 0,70 | 0,80 | 0,85 | 0,87 | 7,9                      |
| 2,2                         | 0,77                  | 0,83  | 0,835 | 0,83  | 0,81  | 0,51                   | 0,73 | 0,83 | 0,87 | 0,89 | 8,9                      |
| 3,0                         | 0,80                  | 0,855 | 0,855 | 0,845 | 0,82  | 0,58                   | 0,78 | 0,85 | 0,88 | 0,89 | 8,7                      |
| 4,0                         | 0,80                  | 0,86  | 0,88  | 0,87  | 0,85  | 0,6                    | 0,8  | 0,85 | 0,88 | 0,89 | 7,6                      |
| 5,5                         | 0,83                  | 0,88  | 0,885 | 0,88  | 0,865 | 0,64                   | 0,81 | 0,86 | 0,89 | 0,89 | 8,8                      |
| 7,5                         | 0,78                  | 0,855 | 0,875 | 0,875 | 0,865 | 0,56                   | 0,74 | 0,83 | 0,88 | 0,89 | 9,1                      |
| 11,0                        | 0,80                  | 0,87  | 0,88  | 0,88  | 0,87  | 0,65                   | 0,82 | 0,87 | 0,90 | 0,90 | 9,8                      |
| 15,0                        | 0,81                  | 0,88  | 0,90  | 0,90  | 0,89  | 0,67                   | 0,82 | 0,87 | 0,89 | 0,89 | 9,6                      |
| 18,5                        | 0,84                  | 0,895 | 0,905 | 0,905 | 0,89  | 0,70                   | 0,84 | 0,88 | 0,90 | 0,90 | 10,3                     |
| 22,0                        | 0,81                  | 0,88  | 0,905 | 0,905 | 0,90  | 0,64                   | 0,80 | 0,86 | 0,89 | 0,90 | 8,8                      |
| 30,0                        | 0,83                  | 0,895 | 0,915 | 0,915 | 0,90  | 0,66                   | 0,82 | 0,88 | 0,90 | 0,90 | 7,6                      |
| 37,0                        | 0,82                  | 0,89  | 0,915 | 0,915 | 0,91  | 0,66                   | 0,80 | 0,85 | 0,87 | 0,87 | 6,5                      |
| 45,0                        | 0,84                  | 0,90  | 0,92  | 0,92  | 0,915 | 0,70                   | 0,83 | 0,87 | 0,88 | 0,88 | 6,8                      |
| 55,0                        | 0,84                  | 0,91  | 0,925 | 0,925 | 0,92  | 0,77                   | 0,88 | 0,90 | 0,91 | 0,91 | 7,0                      |
| 75,0                        | 0,82                  | 0,90  | 0,93  | 0,93  | 0,93  | 0,72                   | 0,85 | 0,89 | 0,90 | 0,90 | 5,4                      |
| 90,0                        | 0,85                  | 0,91  | 0,93  | 0,93  | 0,925 | 0,73                   | 0,86 | 0,91 | 0,92 | 0,92 | 6,0                      |

## Продовження дод. В

| 1                           | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| n <sub>0</sub> = 1500 об/хв |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| 0,06                        | 0,27  | 0,43  | 0,53  | 0,53  | 0,52  | 0,32 | 0,44 | 0,54 | 0,63 | 0,70 | 0,6  |
| 0,09                        | 0,32  | 0,48  | 0,57  | 0,57  | 0,565 | 0,35 | 0,45 | 0,56 | 0,65 | 0,72 | 0,8  |
| 0,12                        | 0,41  | 0,56  | 0,64  | 0,63  | 0,62  | 0,30 | 0,43 | 0,56 | 0,66 | 0,70 | 2,4  |
| 0,18                        | 0,435 | 0,58  | 0,64  | 0,64  | 0,615 | 0,28 | 0,43 | 0,57 | 0,68 | 0,74 | 2,9  |
| 0,25                        | 0,49  | 0,63  | 0,68  | 0,68  | 0,655 | 0,27 | 0,43 | 0,56 | 0,67 | 0,73 | 3,7  |
| 0,37                        | 0,515 | 0,645 | 0,68  | 0,68  | 0,64  | 0,29 | 0,45 | 0,58 | 0,70 | 0,76 | 5,6  |
| 0,55                        | 0,55  | 0,67  | 0,705 | 0,705 | 0,67  | 0,29 | 0,46 | 0,59 | 0,70 | 0,75 | 4,8  |
| 0,75                        | 0,59  | 0,71  | 0,74  | 0,73  | 0,69  | 0,33 | 0,50 | 0,64 | 0,73 | 0,79 | 7,3  |
| 1,1                         | 0,64  | 0,74  | 0,76  | 0,75  | 0,72  | 0,38 | 0,59 | 0,73 | 0,81 | 0,85 | 7,2  |
| 1,5                         | 0,71  | 0,73  | 0,745 | 0,78  | 0,74  | 0,41 | 0,63 | 0,76 | 0,83 | 0,86 | 8,0  |
| 2,2                         | 0,75  | 0,82  | 0,835 | 0,81  | 0,775 | 0,42 | 0,64 | 0,76 | 0,83 | 0,85 | 10,4 |
| 3,0                         | 0,755 | 0,82  | 0,83  | 0,82  | 0,795 | 0,43 | 0,65 | 0,77 | 0,83 | 0,85 | 7,8  |
| 4,0                         | 0,80  | 0,85  | 0,86  | 0,85  | 0,825 | 0,46 | 0,68 | 0,79 | 0,84 | 0,86 | 7,1  |
| 5,5                         | 0,82  | 0,865 | 0,865 | 0,855 | 0,83  | 0,52 | 0,73 | 0,81 | 0,86 | 0,86 | 12,4 |
| 7,5                         | 0,775 | 0,86  | 0,875 | 0,875 | 0,86  | 0,53 | 0,71 | 0,83 | 0,86 | 0,87 | 9,8  |
| 11,0                        | 0,80  | 0,86  | 0,88  | 0,875 | 0,87  | 0,55 | 0,75 | 0,84 | 0,87 | 0,88 | 10,5 |
| 15,0                        | 0,87  | 0,91  | 0,91  | 0,90  | 0,88  | 0,63 | 0,82 | 0,88 | 0,89 | 0,89 | 8,0  |
| 18,5                        | 0,88  | 0,915 | 0,915 | 0,905 | 0,885 | 0,66 | 0,82 | 0,86 | 0,89 | 0,89 | 7,4  |
| 22,0                        | 0,86  | 0,90  | 0,905 | 0,905 | 0,875 | 0,63 | 0,80 | 0,85 | 0,87 | 0,87 | 6,2  |
| 30,0                        | 0,87  | 0,91  | 0,92  | 0,92  | 0,90  | 0,65 | 0,81 | 0,86 | 0,87 | 0,87 | 6,4  |
| 37,0                        | 0,88  | 0,92  | 0,925 | 0,925 | 0,92  | 0,67 | 0,83 | 0,88 | 0,89 | 0,89 | 8,5  |
| 45,0                        | 0,89  | 0,925 | 0,93  | 0,925 | 0,915 | 0,69 | 0,84 | 0,88 | 0,89 | 0,89 | 7,9  |
| 55,0                        | 0,89  | 0,925 | 0,93  | 0,93  | 0,92  | 0,67 | 0,83 | 0,88 | 0,89 | 0,89 | 6,9  |
| 75,0                        | 0,89  | 0,925 | 0,94  | 0,94  | 0,93  | 0,70 | 0,83 | 0,87 | 0,88 | 0,88 | 4,5  |
| 90,0                        | 0,90  | 0,935 | 0,94  | 0,94  | 0,93  | 0,71 | 0,85 | 0,88 | 0,89 | 0,89 | 4,7  |
| 110,0                       | 0,90  | 0,93  | 0,94  | 0,935 | 0,92  | 0,83 | 0,91 | 0,92 | 0,91 | 0,88 | 2,4  |
| n <sub>0</sub> = 1000 об/хв |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| 0,18                        | 0,345 | 0,495 | 0,56  | 0,56  | 0,52  | 0,25 | 0,38 | 0,51 | 0,62 | 0,71 | 2,6  |
| 0,25                        | 0,395 | 0,54  | 0,59  | 0,59  | 0,55  | 0,24 | 0,38 | 0,51 | 0,62 | 0,70 | 1,8  |

Продовження дод. В

| <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> | <i>7</i> | <i>8</i> | <i>9</i> | <i>10</i> | <i>11</i> | <i>12</i> |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 0,37     | 0,46     | 0,60     | 0,65     | 0,65     | 0,615    | 0,28     | 0,42     | 0,55     | 0,65      | 0,72      | 3,8       |
| 0,55     | 0,53     | 0,665    | 0,69     | 0,685    | 0,635    | 0,30     | 0,46     | 0,59     | 0,70      | 0,76      | 4,5       |
| 0,75     | 0,57     | 0,69     | 0,705    | 0,70     | 0,645    | 0,32     | 0,49     | 0,63     | 0,72      | 0,77      | 4,9       |
| 1,1      | 0,53     | 0,735    | 0,75     | 0,74     | 0,69     | 0,33     | 0,52     | 0,65     | 0,74      | 0,78      | 4,3       |
| 1,5      | 0,66     | 0,76     | 0,77     | 0,76     | 0,72     | 0,32     | 0,51     | 0,64     | 0,72      | 0,75      | 5,1       |
| 2,2      | 0,74     | 0,815    | 0,82     | 0,81     | 0,78     | 0,33     | 0,54     | 0,67     | 0,74      | 0,77      | 5,0       |
| 3,0      | 0,73     | 0,81     | 0,82     | 0,81     | 0,785    | 0,33     | 0,58     | 0,69     | 0,76      | 0,79      | 8,6       |
| 4,0      | 0,77     | 0,825    | 0,83     | 0,82     | 0,795    | 0,40     | 0,62     | 0,74     | 0,81      | 0,83      | 9,1       |
| 5,5      | 0,71     | 0,81     | 0,84     | 0,85     | 0,83     | 0,33     | 0,56     | 0,69     | 0,80      | 0,84      | 8,8       |
| 7,5      | 0,76     | 0,84     | 0,85     | 0,855    | 0,84     | 0,40     | 0,62     | 0,74     | 0,81      | 0,84      | 8,6       |
| 11,0     | 0,85     | 0,89     | 0,89     | 0,88     | 0,855    | 0,52     | 0,72     | 0,80     | 0,83      | 0,84      | 8,6       |
| 15,0     | 0,855    | 0,89     | 0,89     | 0,88     | 0,86     | 0,54     | 0,74     | 0,82     | 0,85      | 0,85      | 8,6       |
| 18,5     | 0,86     | 0,905    | 0,905    | 0,895    | 0,88     | 0,53     | 0,74     | 0,82     | 0,85      | 0,85      | 7,1       |
| 22,0     | 0,875    | 0,91     | 0,91     | 0,90     | 0,88     | 0,52     | 0,73     | 0,81     | 0,83      | 0,83      | 6,4       |
| 30,0     | 0,88     | 0,91     | 0,91     | 0,90     | 0,89     | 0,53     | 0,75     | 0,83     | 0,85      | 0,85      | 7,6       |
| 37,0     | 0,875    | 0,91     | 0,915    | 0,91     | 0,895    | 0,53     | 0,77     | 0,83     | 0,85      | 0,85      | 6,8       |
| 45,0     | 0,88     | 0,92     | 0,925    | 0,925    | 0,915    | 0,54     | 0,77     | 0,83     | 0,85      | 0,85      | 5,5       |
| 55,0     | 0,89     | 0,92     | 0,925    | 0,925    | 0,915    | 0,55     | 0,78     | 0,84     | 0,86      | 0,86      | 6,4       |
| 75,0     | 0,90     | 0,93     | 0,93     | 0,925    | 0,905    | 0,7      | 0,86     | 0,89     | 0,90      | 0,89      | 5,2       |
| 90,0     | 0,90     | 0,93     | 0,93     | 0,93     | 0,915    | 0,67     | 0,84     | 0,88     | 0,90      | 0,89      | 6,1       |
| 110,0    | 0,91     | 0,93     | 0,935    | 0,93     | 0,92     | 0,71     | 0,86     | 0,90     | 0,92      | 0,91      | 5,4       |

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Видмиш А. А., Ярошенко Л. В. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 2020. 387 с.
2. Корчемний М.О., Клендій П.Б., Потапенко М.В. Теоретичні основи автоматики. Навчальний посібник, м. Тернопіль, Навчальна книга «Богдан», 2011 – 304 с.
3. Красношопка, Н. Д. Автоматизований електропривод. Розділ 1. Теорія електропривода [Електронний ресурс]: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 101 с.
4. Лавріненко Ю.М., Савченко П.І., Синявський О.Ю. та інші. Основи електропривода. Київ: Ліра-К, 2024. 532 с.
5. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ) : затверджено наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.07.2017 № 476.
6. Синявський О.Ю., Савченко В.В. Практикум з теорії електропривода. К.: Компрінт, 2023. 57 с.
7. Теряєв В. І. Автоматизований електропривод. Ч. 2 [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів освітньої програми «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 204 с.

*Навчально-методичне видання*

*Віталій Георгійович Камишлов  
Михайло Миколайович Федірко,  
Ольга Петрівна Завитій*

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до виконання комплексного курсового проєкту  
з освітньо-професійної програми “Енергетичний аудит”  
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»  
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти**

Підписано до друку 11.09.2024 р.  
Формат 60x84/16. Гарнітура Times.  
Папір офсетний. Друк лазерний.  
Умов.-друк. арк. 2,5. Обл.-вид арк. 2,9.