

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**ІНЖЕНЕРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**  
**КАФЕДРА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА**  
**ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ**

**ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ (ЧАСТИНА І)**

методичні рекомендації

для виконання практичних робіт здобувачами

за першим(бакалаврським) рівнем вищої освіти ОПП «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка» денної форми здобуття вищої освіти

Миколаїв

2025

Рекомендовано до друку методичною радою Інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 18.09.2025, протокол № 1.

Укладач:

Ростислав Ставинський — канд. тех. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

Віталій Мардзявко — асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

Рецензенти:

Олексій Садовий — канд. тех. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

Андрій Ставинський — д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

© Миколаївський національний  
аграрний університет, 2025

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                                                                                               | 4  |
| ПРАКТИЧНА РОБОТА №1. Розрахунок зведення моментів та мас електропривода.....                                                                             | 5  |
| ПРАКТИЧНА РОБОТА №2. Розрахунок моменту двигуна для забезпечення рівноприскореного руху двоскіпового підйомника.....                                     | 14 |
| ПРАКТИЧНА РОБОТА №3. Розрахунок величин двигуна постійного струму з паралельним збудженням.....                                                          | 22 |
| ПРАКТИЧНА РОБОТА №4. Побудова природної та штучної механічної характеристики двигуна постійного струму паралельного збудження.....                       | 32 |
| ПРАКТИЧНА РОБОТА №5. Розрахунок параметрів та характеристик двигуна постійного струму з послідовним збудженням.....                                      | 42 |
| ПРАКТИЧНА РОБОТА №6. Розрахунок перехідних процесів та параметрів двигуна постійного струму у складі електропривода вантажопідйомного механізму.....     | 52 |
| ПРАКТИЧНА РОБОТА №7. Розрахунок параметрів та характеристик асинхронного двигуна.....                                                                    | 61 |
| ПРАКТИЧНА РОБОТА № 8. Розрахунок природної та штучної механічної характеристики асинхронного двигуна.....                                                | 69 |
| ПРАКТИЧНА РОБОТА № 9. Дослідження природних та штучних механічних характеристик асинхронного двигуна з фазним ротором та розрахунок пускових опорів..... | 80 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ З ПРАКТИЧНИХ РОБІТ.....                                                                                             | 89 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ПІДГОТОВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАННЯТЬ.....                                                                                                    | 91 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                                                                                          | 92 |
| ДОДАТКИ.....                                                                                                                                             | 94 |

## ВСТУП

Методичні рекомендації розроблені для виконання практичних робіт з дисципліни «Теорія електроприводу» студентами спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Дисципліна «Теорія електроприводу» є базовою для здобувачів вищої освіти спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Вона формує фундаментальні знання та практичні навички з аналізу й розрахунку електроприводів, які є невід'ємною складовою сучасних електромеханічних систем.

Сучасний електропривод – це комплекс електричних, механічних та інформаційних підсистем, які забезпечують автоматизоване керування рухом у різних галузях промисловості, енергетиці та транспорті. Володіння теоретичними основами електропривода дозволяє фахівцям не лише грамотно здійснювати вибір обладнання, але й оптимізувати його роботу з урахуванням динамічних режимів та вимог до енергоефективності.

Методичні рекомендації призначені для виконання практичних робіт, метою яких є закріплення теоретичних знань та формування у студентів умінь:

- аналізувати механічні характеристики електроприводів;
- виконувати розрахунки параметрів двигунів різних типів;
- досліджувати перехідні процеси та роботу електропривода у динамічних режимах;

Структура методичних рекомендацій передбачає подання теоретичних відомостей, індивідуальних завдань, прикладів розрахунків, контрольних питань та вихідних даних у табличній формі. Це дозволяє студентам послідовно оволодівати матеріалом, розвивати навички самостійної роботи й готуватися до практичних занять та подальшої професійної діяльності.

## ПРАКТИЧНА РОБОТА №1

**Тема:** Розрахунок зведення моментів та мас електропривода

**Мета:** набути практичних навичок з динамічних властивостей механічної частини ЕП; отримати практичні навички та уміння з питань зведення моментів, мас та сил опору.

### 1.1. Теоретичні відомості

Механічна частина електроприводу, наприклад підйомного механізму (рис. 1) містить у собі пов'язані рухомі маси приводного електродвигуна (ПЕД), механічного передаточного пристрою (МПП) та виконавчого органа робочої машини (РМ).

Двигун через з'єднувальну муфту  $M_1$ , механічний передаточний пристрій (редуктор) з муфтою  $M_2$  обертає барабан з навитим контактом, на якому підвішений вантаж масою  $m_{\text{ван}}$ . Кожен елемент кінематичної схеми має свою швидкість (кутову чи лінійну) і характеризується моментом інерції  $J$  або своєю масою  $m$ , а також сукупністю діючих на нього моментів або сил. Отже, механічна частина електроприводу являє собою систему зв'язаних мас, що рухаються з різними швидкостями обертально чи поступально і характеризується передаточними відношеннями та ККД  $\eta$ . Крім того, під дією моментів опору механічні ланки системи (канати, довгі вали, зубчасті зчеплення та ін.) деформуються, а у зубчастих зчепленнях маються зазори. Якщо враховувати усі чинники, то розрахункова схема механічної частини електроприводу буде являти собою багатомасову систему з пружними зв'язками та зазорами. Тому однією з перших задач проектування й досліджування електроприводу є складання розрахункової схеми, що враховує тільки основні чинники.

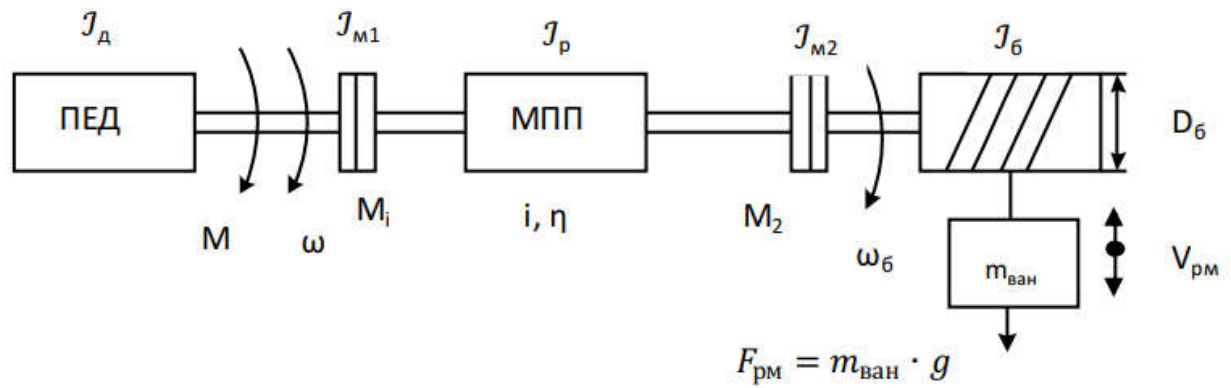


Рис. 1.1 – Кінематична схема підйомного механізму

У більшості практичних ситуацій в інженерних розрахунках, що не потребують великої точності, можна знехтувати зазорами й пружністю елементів. При цих припущеннях розрахункова схема механічної частини ЕП зводиться до одномасової ланки (рис. 2), усі елементи якої обертаються з однаковою швидкістю (швидкість ланки зведення), у якос ті якої звичайно вибирається швидкість двигуна чи виробничого механізму. Для збереження незмінними статичні та динамічні властивості реальної системи, необхідно привести (перерахувати) параметри однієї швидкості (одного елемента зведення). Якщо в якос ті елемента зведення вибраний двигун, то така операція перерахунку параметрів називається зведенням моментів опору, інерції та мас до вала (швидкості) двигуна. Якщо ж як елемент зведення вибрана робоча машина, то це – зведення моментів опору та інерції до вала (швидкості) робочої машини.

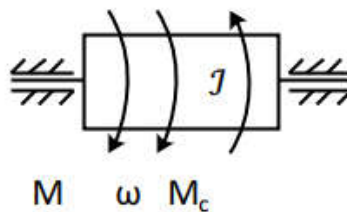


Рис. 1.2 – Розрахункова схема механічної частини ЕП

Якщо зведення моментів опору та інерції відбувається до вала (швидкості) двигуна, то розрахункова схема механічної частини електроприводу являє собою одну масову ланку, що обертається зі швидкістю двигуна  $\omega$ , яка має зведений момент інерції  $J$ , статичний момент опору  $M_c$  та знаходиться під дією

електромагнітного моменту двигуна  $M$  (рис. 2). Отримана проста розрахункова схема справедлива для ідеальних механічних ланок без пружності та зазорів і дозволяє замінити складну кінематичну схему механізму одномасовою ланкою, однаковою для усіх механізмів.

Зведення моментів опору елементів до вала двигуна, що рухаються обертально. У даному випадку усі моменти опору зводяться до вала (швидкості) двигуна. Для випадку, коли виробничий механізм здійснює обертальний рух, найпростіша кінематична схема якого наведена на рис. 1.3, а розрахункова схема – рис. 1.2.

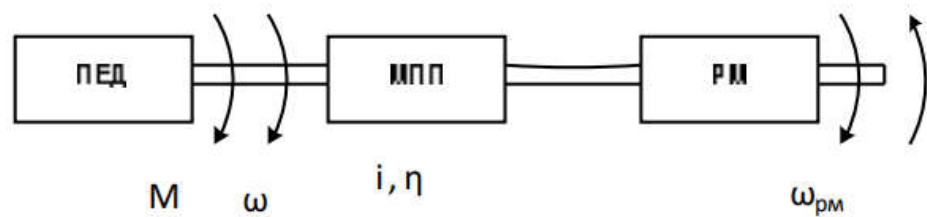


Рис. 1.3 – Кінематична схема електропривода обертального руху

Умовою зведення моментів опору до вала двигуна є рівність потужностей на валу двигуна початкової (рис. 1.3) та розрахункової (зведеної) схем (рис. 1.2). Згідно з позначеннями, що прийняті на цих рисунках, потужність початкової та розрахункової схем визначається таким чином:

$$P_n = \frac{P_{pm}}{\eta} = \frac{M_{pm} \omega_{pm}}{\eta}, \quad (1.1)$$

$$P_{роз} = M_c \omega, \quad (1.2)$$

Прирівнюючи ці рівняння, отримаємо:

$$M_c = \frac{M_{pm} \omega_{pm}}{\eta \cdot \omega} = \frac{M_{pm}}{i \cdot \eta}, \quad (1.3)$$

де  $i = \omega / \omega_{pm}$  - передаточне відношення редуктора.

Якщо робоча машина здійснює поступальний рух, початкова схема якого наведена на рис. 1.1, то сила опору робочої машини  $F_{pm}$  зводиться до вала (швидкості) двигуна у вигляді моменту опору. При цьому розрахункова схема залишається незмінною (рис. 1.2).

Для розглядуваних початкової та розрахункової схем руху справедливі співвідношення:

$$P_n = \frac{P_{pm}}{\eta} = \frac{F_{pm} V_{pm}}{\eta}, \quad (1.4)$$

$$P_{роз} = M_c \omega, \quad (1.5)$$

Із сумісного рішення маємо:

$$M_c = \frac{F_{pm} V \omega_{pm}}{\eta \omega} = \frac{m_{ван} g V_{pm}}{\eta \omega} = \frac{F_{pm} \rho}{\eta}, \quad (1.6)$$

де  $\rho = V_{pm}/\omega$  - радіус зведення зусилля робочої машини  $F_{pm}$  до вала двигуна у вигляді моменту опору.

Зведення моментів інерції до вала двигуна. Операцію зведення моментів інерції та мас розглянемо на прикладі механізму, кінетична схема якого наведена на рис. 1.1, а розрахункова - на рис. 1.2.

Зведення моментів інерції та мас робиться на основі балансу запасу кінетичної енергії реальної та розрахункової схем. Запас кінетичної енергії початкової схеми визначається сумою кінетичних енергій усіх рухомих ланок і згідно з рис. 1.1 маємо:

$$W_n = \frac{j_\delta \omega^2}{2} + \frac{j_{M1} \omega^2}{2} + \frac{j_P \omega^2}{2} + \frac{j_{M2} \omega_\delta^2}{2} + \frac{j_\delta \omega_\delta^2}{2} + \frac{m_{ван} V_{pm}^2}{2}, \quad (1.7)$$

Запас кінетичної енергії розрахункової схеми характеризується зведеним моментом інерції:

$$W_{роз} = \frac{j \omega^2}{2}, \quad (1.8)$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь, отримаємо вираз для зведеного моменту інерції:

$$J = J_\delta + J_{M1} + J_P + \frac{J_{M2}}{i^2} + \frac{J}{i^2} + \frac{m_{ван} V_{pm}^2}{\omega^2}, \quad (1.9)$$

У загальному випадку зведений до вала двигуна момент інерції системи визначається як:



$$J = J_{\text{д}} + J_{\Sigma} + \sum_{k=1}^n \frac{J_k}{i_k^2} + \sum_{k=1}^n m_k \rho_k^2, \quad (1.10)$$

де  $J_{\text{д}}$  - момент інерції двигуна,  $J_{\Sigma}$  - сума моментів інерції інших механічних ланок, що обертаються зі швидкістю двигуна;  $J_k$  - момент інерції  $k$ - го обертального елемента;  $i_k$  - передаточне відношення редуктора від вала двигуна до  $k$  - го обертального елемента;  $m_k$  - маса  $k$  - го елемента, що рухається поступально;  $\rho_k = V_k/\omega$  - радіус зведення  $k$  - го елемента, що рухається поступально, до вала двигуна.

## 1.2. Завдання

Згідно з вихідними даними варіанта (табл. 1.1) завдання для підйомного механізму необхідно:

- 1) надати кінематичну схему підйомного механізму;
- 2) визначити зведені до вала двигуна статичний момент опору  $M_c$  та момент інерції системи  $J$  при підйомі вантажу;
- 3) розрахувати зведені до вала робочої машини зусилля  $F$  та масу  $m$  системи.

Вихідні дані варіантів завдання наведено у таблиці 1, де  $m_{\text{ван}}$  - маса вантажу;  $V_{\text{рм}}$  та  $\omega$  - швидкості лінійна вантажу та кутова ПЕД;  $D_6$  - діаметр барабану;  $J_6, J_{\text{д}}, J_{\text{р}}, J_{\text{М1}}$  та  $J_{\text{М2}}$  - моменти інерції відповідно барабана, двигуна, редуктора, першої та другої електромагнітних муфт;  $\eta$  - ККД механічної передачі та  $M$  - обертовий момент ПЕД.

## 1.3. Приклад розрахунку

Завдання 1. Для підйомного механізму, кінематична схема якого наведена на рис. 1.1, необхідно визначити зведені до вала двигуна статичний момент опору  $M_c$  та сумарний момент інерції системи при підйомі вантажу масою  $m_{\text{ван}} = 1500$  кг зі швидкістю  $V_{\text{рм}} = 1,5$  м/с. Кутова швидкість двигуна  $\omega = 97$  рад/с. Діаметр барабана  $D_6 = 0,7$  м, момент інерції барабана  $J_6 = 8,5$  кг · м<sup>2</sup>. Момент інерції двигуна  $J_{\text{д}} = 0,45$  кг · м<sup>2</sup>, зведені до вала момент інерції редуктора  $J_{\text{р}} = 0,12$ ; муфти  $M_1$   $J_1 = 0,035$

кг·м<sup>2</sup>; муфти  $M_2 J_2 = 0,9$  кг·м<sup>2</sup>; ККД передач  $\eta = 0,82$ . Крім того, визначити зведені до поступального руху (до вала робочої машини) зусилля та масу, якщо момент двигуна  $M = 400$  Н·м, розрахункова схема для цього випадку наведена на рис. 1.4.

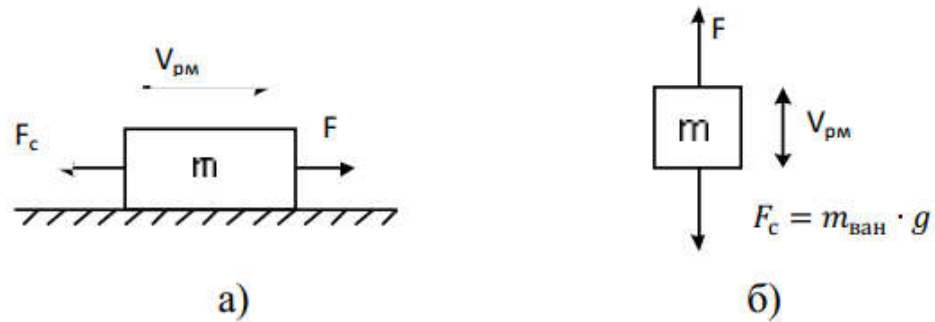


Рис. 1.4 – Розрахункова схема при зведенні моментів опору та інерції до ланки, що рухається поступально

1. Момент робочої машини (статичний момент), зведений до вала двигуна при підніманні вантажу:

$$M_c \uparrow = \frac{m_{\text{ван}} V_{pm}^2}{\eta \omega^2} = \frac{1500 \cdot 9,81 \cdot 1,5^2}{0,82 \cdot 97} = 277,5 \text{ Н·м,}$$

2. Кутова швидкість барабана (робочої машини):

$$\omega_b = \omega_{pm} = \frac{2V_{pm}}{D_b} = \frac{2 \cdot 1,5}{0,7} = 4,29 \text{ рад/с,}$$

3. Передаточне відношення редуктора:

$$i = \frac{\omega}{\omega_{pm}} = \frac{97}{4,29} = 22,6,$$

4. Сумарний момент інерції системи, зведений до вала двигуна:

$$\begin{aligned} J &= J_d + J_{M1} + J_P + \frac{J_{M2}}{i^2} + \frac{J}{i^2} + \frac{m_{\text{ван}} V_{pm}^2}{\omega^2} = \\ &= 0,45 + 0,035 + 0,12 + \frac{0,9}{22,6^2} + \frac{8,5}{22,6^2} + \frac{1500 \cdot 1,5^2}{97^2} = 0,98 \text{ кг·м}^2 \end{aligned}$$

5. Зведений до поступального руху момент двигуна (зведене зусилля) до вала робочої машини дорівнює:

$$F = \frac{M \cdot \omega \cdot \eta}{V_{pM}} = \frac{400 \cdot 97 \cdot 0,82}{1,5} = 21211 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

6. Зведена до вала робочої машини маса система буде:

$$\begin{aligned} m &= \frac{1}{V_{pM}^2} (j_o \omega^2 + j_{M1} \omega^2 + j_P \omega^2 + j_{M2} \omega_o^2 + j_o \omega_o^2) + m_{ван} = \\ &= \frac{1}{1,5} (0,45 \cdot 97^2 + 0,035 \cdot 97^2 + 0,9 \cdot 4,29^2 + \\ &\quad + 0,9 \cdot 4,29^2 + 8,5 \cdot 4,29^2) + 1500 = 4106,8 \end{aligned} \quad \text{кг},$$

7. Зробити висновок відповідно до впливу параметрів двигуна на кінцевий результат розрахунків.

#### 1.4. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями практичної роботи;
2. Ознайомитися з виконання практичного завдання;
3. Виконати розрахунок за даними у відповідності з варіантом (див. табл. 1.1);
4. Відповісти на контрольні питання.
5. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт.
6. Зробити висновок про виконану роботу.

#### 1.5. Контрольні питання

1. Що називається кінематичною схемою електропривода?
2. Кінематична схема ЕП з обертальним рухом.
3. Кінематична схема ЕП з поступальним рухом.
4. Основні фізичні величини, які характеризують механіку елементів та ЕП у цілому.
5. Активні та реактивні моменти та сили.

6. Фізична сутність процесу зведення сил та моментів діючих в електроприводі.

7. Як визначається величина кінетичної енергії елементів при поступальному та обертальному русі?

8. Зведення моментів інерції до вала приводного двигуна при обертальному та поступальному русі.

9. Зведення сил опору та мас до вала приводного двигуна при обертальному та поступальному русі.

10. Чому дорівнює момент інерції циліндра відносно поздовжньої осі?

Таблиця 1.1 – Вихідні данні до практичної роботи №1

| №  | $m_{\text{ван}}$<br>(кг) | $V_{\text{рм}}$<br>(м/с) | $\omega$<br>(об/хв) | $D_6$ | $J_6$ | $J_d$ | $J_p$ | $M_1$<br>(кг·м <sup>2</sup> ) | $J_1$ | $M_2$<br>(кг·м <sup>2</sup> ) | $J_2$ | $\eta$ | $M$<br>(Н·м) |
|----|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------|-------|-------------------------------|-------|--------|--------------|
| 1  | 5000                     | 0,75                     | 45                  | 0,85  | 12,00 | 0,75  | 0,15  | 0,12                          | 1,60  | 0,80                          | 0,80  | 0,80   | 500          |
| 2  | 1200                     | 0,40                     | 90                  | 0,90  | 5,50  | 0,50  | 0,08  | 0,06                          | 0,30  | 0,20                          | 0,25  | 0,88   | 120          |
| 3  | 2500                     | 0,60                     | 60                  | 0,88  | 8,50  | 0,65  | 0,10  | 0,10                          | 0,60  | 0,35                          | 0,40  | 0,86   | 260          |
| 4  | 3500                     | 0,55                     | 48                  | 0,83  | 10,00 | 0,70  | 0,12  | 0,11                          | 0,90  | 0,50                          | 0,50  | 0,84   | 360          |
| 5  | 7000                     | 0,90                     | 60                  | 0,90  | 15,00 | 0,60  | 0,18  | 0,14                          | 1,80  | 0,85                          | 0,65  | 0,82   | 750          |
| 6  | 4500                     | 0,80                     | 72                  | 0,87  | 11,50 | 0,70  | 0,13  | 0,13                          | 1,10  | 0,60                          | 0,55  | 0,81   | 480          |
| 7  | 800                      | 0,30                     | 120                 | 0,92  | 4,20  | 0,45  | 0,05  | 0,04                          | 0,20  | 0,12                          | 0,15  | 0,90   | 80           |
| 8  | 1500                     | 0,45                     | 100                 | 0,89  | 6,00  | 0,55  | 0,07  | 0,07                          | 0,40  | 0,25                          | 0,30  | 0,87   | 150          |
| 9  | 6000                     | 1,20                     | 36                  | 0,80  | 16,00 | 0,85  | 0,20  | 0,16                          | 2,00  | 0,95                          | 0,80  | 0,78   | 900          |
| 10 | 3000                     | 0,70                     | 50                  | 0,86  | 9,00  | 0,68  | 0,11  | 0,10                          | 0,75  | 0,45                          | 0,45  | 0,83   | 320          |
| 11 | 4200                     | 0,65                     | 55                  | 0,85  | 10,80 | 0,72  | 0,12  | 0,11                          | 0,95  | 0,52                          | 0,48  | 0,82   | 410          |
| 12 | 5200                     | 0,95                     | 40                  | 0,82  | 13,50 | 0,80  | 0,16  | 0,14                          | 1,40  | 0,70                          | 0,60  | 0,80   | 540          |
| 13 | 1800                     | 0,50                     | 85                  | 0,91  | 6,80  | 0,58  | 0,09  | 0,08                          | 0,45  | 0,28                          | 0,33  | 0,88   | 180          |
| 14 | 9500                     | 1,50                     | 30                  | 0,78  | 20,00 | 1,20  | 0,25  | 0,20                          | 2,50  | 1,00                          | 0,90  | 0,75   | 1250         |
| 15 | 2600                     | 0,55                     | 65                  | 0,87  | 8,80  | 0,66  | 0,10  | 0,09                          | 0,65  | 0,38                          | 0,42  | 0,84   | 280          |

| №  | $m_{\text{ван}}$<br>(кг) | $V_{\text{pm}}$<br>(м/с) | $\omega$<br>(об/хв) | $D_6$ | $J_6$ | $J_d$ | $J_p$ | $M_1$<br>(кг·м <sup>2</sup> ) | $J_1$ | $M_2$<br>(кг·м <sup>2</sup> ) | $J_2$ | $\eta$ | $M$<br>(Н·м) |
|----|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------|-------|-------------------------------|-------|--------|--------------|
| 16 | 3800                     | 0,72                     | 52                  | 0,85  | 10,40 | 0,71  | 0,12  | 0,11                          | 0,88  | 0,50                          | 0,50  | 0,83   | 390          |
| 17 | 1100                     | 0,35                     | 110                 | 0,93  | 4,80  | 0,48  | 0,06  | 0,05                          | 0,22  | 0,14                          | 0,18  | 0,89   | 95           |
| 18 | 2400                     | 0,60                     | 68                  | 0,88  | 7,90  | 0,62  | 0,09  | 0,09                          | 0,55  | 0,32                          | 0,35  | 0,86   | 250          |
| 19 | 5600                     | 0,85                     | 46                  | 0,84  | 12,80 | 0,78  | 0,15  | 0,13                          | 1,20  | 0,65                          | 0,58  | 0,81   | 560          |
| 20 | 6700                     | 1,00                     | 42                  | 0,83  | 14,50 | 0,82  | 0,17  | 0,15                          | 1,60  | 0,75                          | 0,68  | 0,80   | 720          |
| 21 | 2100                     | 0,48                     | 75                  | 0,90  | 7,00  | 0,60  | 0,08  | 0,08                          | 0,46  | 0,30                          | 0,32  | 0,87   | 210          |
| 22 | 3400                     | 0,66                     | 58                  | 0,86  | 9,50  | 0,69  | 0,11  | 0,10                          | 0,80  | 0,48                          | 0,46  | 0,83   | 350          |
| 23 | 4800                     | 0,82                     | 50                  | 0,85  | 11,80 | 0,74  | 0,13  | 0,12                          | 1,05  | 0,57                          | 0,52  | 0,82   | 470          |
| 24 | 1400                     | 0,42                     | 95                  | 0,90  | 5,90  | 0,54  | 0,07  | 0,07                          | 0,38  | 0,24                          | 0,28  | 0,88   | 140          |
| 25 | 9000                     | 1,30                     | 34                  | 0,79  | 18,50 | 1,05  | 0,22  | 0,18                          | 2,20  | 0,98                          | 0,82  | 0,77   | 1100         |
| 26 | 3200                     | 0,68                     | 56                  | 0,86  | 9,20  | 0,68  | 0,11  | 0,10                          | 0,78  | 0,47                          | 0,45  | 0,83   | 330          |
| 27 | 2700                     | 0,58                     | 62                  | 0,87  | 8,60  | 0,64  | 0,10  | 0,09                          | 0,68  | 0,40                          | 0,41  | 0,85   | 290          |
| 28 | 4300                     | 0,77                     | 49                  | 0,85  | 11,20 | 0,73  | 0,12  | 0,11                          | 0,98  | 0,55                          | 0,50  | 0,82   | 450          |
| 29 | 6200                     | 0,98                     | 38                  | 0,82  | 14,00 | 0,88  | 0,16  | 0,14                          | 1,45  | 0,72                          | 0,62  | 0,80   | 660          |
| 30 | 2000                     | 0,50                     | 80                  | 0,89  | 7,20  | 0,60  | 0,09  | 0,08                          | 0,50  | 0,33                          | 0,36  | 0,87   | 200          |

## ПРАКТИЧНА РОБОТА №2

**Тема:** Розрахунок моменту двигуна для забезпечення рівноприскореного руху двоскіпового підйомника.

**Мета:** набути практичних навичок з розрахунку моменту двигуна для забезпечення рівноприскореного руху двоскіпового підйомника.

### 2.1. Теоретичні відомості

Рух електропривода зумовлений взаємодією моменту, що розвивається двигуном, і моменту опору (причому, момент опору, у залежності від його характеру, може як сприяти, так і перешкоджати руху). Слід відзначити, що ЕП може працювати в різних режимах: *статичному (усталеному)* із постійною швидкістю, або в *динамічному (перехідному)* режимі, якому відповідають стани прискорення або уповільнення приводу, що викликаються цілим рядом факторів (наприклад, механічними коливаннями навантаження внаслідок зміни технологічних параметрів, вмиканням і вимиканням пускових або гальмівних опорів, зміною напруги живлення або параметрів самого електропривода).

Будь-яке порушення усталеної швидкості ЕП супроводжується зміною запасу кінетичної енергії в системі двигун - робоча машина, що впливає на роботу електродвигуна, викликаючи зміни його моменту, потужності, швидкості обертання.

Дослідження характеру руху електропривода або його окремих органів може бути здійснене за допомогою *рівняння руху ЕП, що враховує взаємодію всіх зусиль і моментів у системі в будь-який момент часу*. Рівняння руху електропривода можна отримати на основі рівняння енергетичного балансу системи “двигун - робоча машина”. У відповідності до основного призначення електропривод здійснює перетворення електричної енергії в механічну і її передачу виконавчому органу робочої машини для здійснення корисної роботи.

Вся енергія, що вироблена двигуном  $W_d$ , розподіляється наступним чином, одна частина її  $W_c$  витрачається на подолання сил опору руху, а інша частина  $W_{дин}$  - на зміну запасу кінетичної енергії рухомих частин системи. Рівняння енергетичного балансу має вид:

$$W = W_c + W_{дин}, \quad (2.1)$$

Рівняння руху системи (або, як його ще називають, рівняння моментів, віднесене до валу, що обертається зі швидкістю  $\omega$ ):

$$M_d - M_c = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \cdot \frac{dJ}{dt}, \quad (2.2)$$

Права частина рівняння – це вираз для *динамічного моменту*, що виникає

тільки в перехідному режимі, при  $\frac{d\omega}{dt} \neq 0; \frac{dJ}{d\varphi} \neq 0$ :

$$M_d - M_c = M_{дин}, \quad (2.3)$$

Динамічний момент зумовлюється, як зміною швидкості руху, так і зміною кінетичної енергії системи внаслідок зміни моменту інерції (прикладом систем електропривода із змінним моментом інерції можуть бути кривошипні механізми різноманітних пресів, перекидачі, ткацькі верстати, конвеєри, мішалки і ін.).

Найчастіше на практиці момент інерції незмінний, або змінюється незначно ( $J = \text{const}$  або  $J \approx \text{const}$ ). У цьому випадку рівняння руху електроприводу спрощується та набуває виду:

$$M_d - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.4)$$

Слід відзначити, що більшість електромеханічних систем мають не тільки елементи, що обертаються. В основному доводиться зустрічатися із системами де поєднується обертальний та поступальний рух елементів, а інколи в системі присутні лише елементи, що рухаються поступально. Для поступального руху рівняння руху можна записати в такому вигляді:

$$F_d - F_c = F_{дин} = m \frac{dV}{dt}, \quad (2.5)$$

де  $F_d$  - рушійна (двигунна) сила;  $F_c$  - сила статичних опорів;  $m$  - маса рухомого тіла;  $V$  - лінійна швидкість переміщення тіла.

Для поступального руху передаточна функція будується аналогічно а структурна схема набуває вигляду:

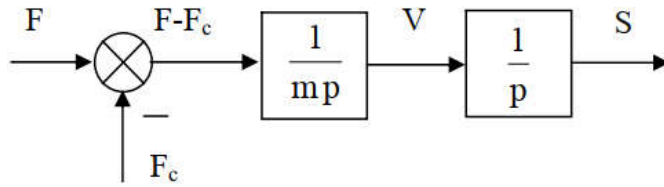


Рис. 2.1 – Структурна схема механічної частини ЕП, що рухається поступально

У теорії електропривода, як правило, використовується рівняння руху для обертального руху, за умови, що всі елементи, що поступально рухаються, спеціальним чином приведені до обертального руху.

## 2.2. Завдання

Згідно з вихідними даними варіанта (табл. 2.1) завдання необхідно:

Для електроприводу двоскіпового підйомника (рис. 2.2) розрахувати момент двигуна, необхідний для забезпечення рівноприскореного руху скіпа з прискоренням  $\alpha = 0.6 \text{ м/с}^2$ , якщо відомі такі величини: маса вантажу  $m_v$ , кг; маса порожнього скіпа  $m_c$ , кг; момент інерції привідного двигуна  $J_d$ ,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ; момент інерції барабана  $J_b$ ,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ; момент інерції одного напрямного шківів  $J_{ш}$ ,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ; кількість шківів  $n_{ш}$ ; момент інерції редуктора, приведений до валу двигуна,  $J_p$ ,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ; маса канату  $m$ , кг; діаметр барабану лебідки  $D_b$ , м; діаметр шківів  $D_{ш}$ , м; передавальне число редуктора  $i_p$ ; ККД підйомника  $\eta$ ; кут нахилу руху скіпа  $\alpha = 45^\circ$ .



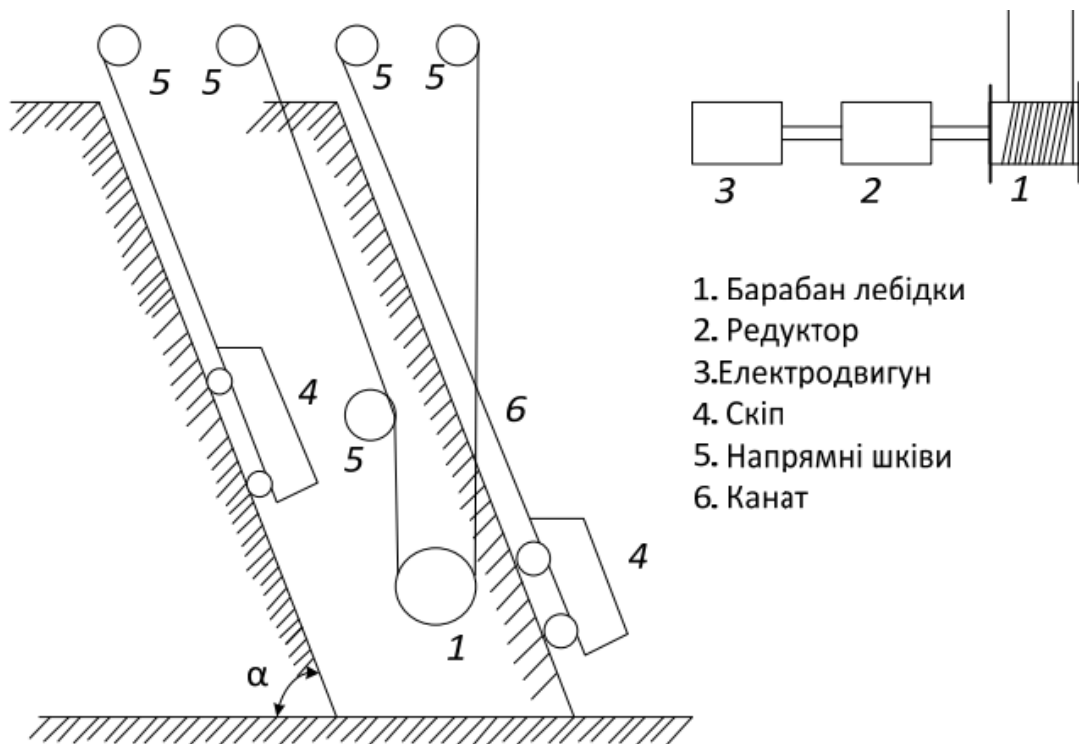


Рис. 2.2 – Конструктивна схема двоскіпового підйомника

Коефіцієнт, що враховує всі сили тертя на поверхні переміщення скіпів, прийняти рівним  $k_T = 0,05$ .

### 2.3. Приклад розрахунку

Завдання 1. Для електроприводу двоскіпового підйомника (рис. 2.2) розрахувати момент двигуна, необхідний для забезпечення рівноприскореного руху скіпа з прискоренням  $a = 0.6 \text{ м/с}^2$ , якщо відомі такі величини: маса вантажу  $m_v = 9000 \text{ кг}$ ; маса порожнього скіпа  $m_c = 7000 \text{ кг}$ ; момент інерції привідного двигуна  $J_d = 4.5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; момент інерції барабана  $J_b = 1200 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; момент інерції одного напрямного шківів  $J_{ш} = 1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; кількість шківів  $n_{ш} = 6$ ; момент інерції редуктора, приведений до валу двигуна,  $J_p = 4.0 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; маса канату  $m = 2300 \text{ кг}$ ; діаметр барабану лебідки  $D_b = 2.0 \text{ м}$ ; діаметр шківів  $D_{ш} = 1.8 \text{ м}$ ; передавальне число редуктора  $i_p = 25$ ; ККД підйомника  $\eta = 0.7$ ; кут нахилу руху скіпа  $\alpha = 45^\circ$ .

1. Сила натягу канату від ваги завантаженого скіпа:

$$F_{зв} = (m_{ск} + m_v) \cdot g \cdot \sin \alpha = (9 + 7) \cdot 103 \cdot 9,81 \cdot \sin 45^\circ = 111 \cdot 10^3 \text{ Н};$$

2. Сила тиску на поверхню руху:

$$N_{36} = (m_{ck} + m_e) \cdot g \cdot \sin \alpha = (9 + 7) \cdot 103 \cdot 9.81 \cdot \sin 45^\circ = 111 \cdot 10^3 \text{ Н},$$

3. Сила тертя від тиску завантаженого скіпа:

$$F_{m1} = k_m \cdot N_{36} = 0.05 \cdot 111 \cdot 10^3 = 5,6 \cdot 10^3 \text{ Н},$$

4. Сумарне статичне зусилля на підйомному кінці канату:

$$F_1 = F_{36} + F_{m1} = (111 + 5,6) \cdot 10^3 = 116,6 \cdot 10^3 \text{ Н},$$

5. Сила натягу канату від ваги порожнього скіпа

$$F_n = m_{ck} \cdot g \cdot \sin \alpha = 7 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot \sin 45^\circ = 48,5 \cdot 10^3 \text{ Н},$$

6. Сила тертя від тиску порожнього скіпа:

$$F_{m2} = k \cdot F_n = 0,05 \cdot 48,5 \cdot 10^3 = 2,4 \cdot 10^3 \text{ Н},$$

7. Сумарне статичне зусилля на збігаючому кінці канату:

$$F_2 = F_n - F_{m2} = (48,5 - 2,4) \cdot 10^3 = 46,1 \cdot 10^3 \text{ Н},$$

8. Результуюче зусилля на ободі барабана:

$$F_{pez} = F_1 - F_2 = (116,6 - 46,1) \cdot 10^3 = 71,5 \cdot 10^3 \text{ Н},$$

Примітка: у цьому прикладі маса каната розподілена симетрично (тобто внесок маси каната у різницю сил відсутній). Якщо канат нерівномірно розподілений, треба додати відповідний член.

9. Статичний момент опору, приведений до валу двигуна:

Радіус барабана  $R_b = D_b/2 = 1,0$  м. Приведення до валу двигуна враховує редуктор  $i_r$  та ККД  $\eta$  (момент на валу двигуна буде менший у зв'язку з передаточним числом, а також треба врахувати втрати).

$$M = \frac{F_{pez} \cdot D_b}{D_b \cdot i_p \cdot \eta} = \frac{71,5 \cdot 10^3 \cdot 2}{2 \cdot 25 \cdot 0,7} = 4085,7 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

10. Приведений до валу двигуна момент інерції привода. Приведення обертових інерцій до вала двигуна: компоненту кожного обертового елемента ділимо на  $i_r^2$ . Також переводимо масову інерцію каната (лінійна маса на радіусі барабана). Формула, яку застосовано:

$$J_{np} = \frac{J_{\delta} + J_p + J_{\delta}}{i^2} + n_{ук} \cdot J_{ук} \cdot \left( \frac{D_{\delta}}{D_{ук}} \right)^2 / i^2 + \frac{(2 \cdot m_{ск} + m_{\delta} + m_k) \cdot 10^3}{i^2} =$$

$$= \frac{4,5 + 4 + 1200}{25^2} + 6 \cdot 1000 \cdot \left( \frac{2}{1,8} \right)^2 / 25^2 + \frac{(2 \cdot 7 + 9 + 2,3) \cdot 10^3}{25^2} = 62,77 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

11. Кутове прискорення двигуна.

Лінійне прискорення  $a$  пов'язане з кутовим прискоренням  $\varepsilon$  двигуна через приведений радіус: лінійна від кінця барабана відповідає кутовому прискоренню на валу двигуна з коефіцієнтом  $R_b/i_r$ . Тому:

$$a = \varepsilon \cdot \frac{R_b}{i_r} \Rightarrow \varepsilon = a \cdot \frac{i_r}{R_b},$$

$$\varepsilon = a \cdot i = 0,6 \cdot 25 = 15 \text{ рад/с},$$

12. Момент двигуна, який забезпечить рівноприскорений рух скіпа:

$$M = M_c + J_{np} \cdot \varepsilon = 4085,7 + 62,77 \cdot 15 = 5027 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

13. Зробити висновок відповідно до впливу параметрів двигуна на кінцевий результат розрахунків.

## 2.4. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями практичної роботи;
2. Ознайомитися з виконання практичного завдання;
3. Виконати розрахунок за даними у відповідності з варіантом (див. табл. 2.1);
4. Відповісти на контрольні питання.
5. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт.
6. Зробити висновок про виконану роботу.

## 2.5. Контрольні питання

1. Яке призначення двоскіпового підйомника?
2. У чому полягає принцип рівноприскореного руху підйомного механізму?
3. Які сили діють на скіпи під час підйому та спуску?
4. Як впливають маси вантажу, скіпа та каната на величину рушійного моменту?
5. Чому при розрахунку враховується момент інерції всіх обертових частин?
6. Що таке приведений момент інерції і як він визначається?
7. Яким чином передавальне відношення впливає на обчислення моменту на валу двигуна?
8. Які основні рівняння використовуються для визначення моменту двигуна?
9. Як визначається динамічний момент під час рівноприскореного руху?
10. Яким чином розраховується кутове прискорення барабана підйомника?
11. Як здійснюється приведення маси вантажу до валу двигуна?
12. Як визначається середній та максимальний момент двигуна?

Таблиця 2.1 – Вихідні данні до практичної роботи №2

| №  | $m_b$ | $M_c$ | $J_d$ | $J_b$ | $J_{ш}$ | $n_{ш}$ | $J_p$ | $m$  | $D_b$ | $D_{ш}$ | $i_p$ | $\eta$ |
|----|-------|-------|-------|-------|---------|---------|-------|------|-------|---------|-------|--------|
| 1  | 8000  | 7000  | 0,95  | 14,0  | 1500    | 6       | 4     | 2300 | 2,00  | 1,80    | 25    | 0,80   |
| 2  | 7500  | 6500  | 0,90  | 13,5  | 1400    | 5       | 4     | 2200 | 1,95  | 1,75    | 25    | 0,82   |
| 3  | 7000  | 6000  | 0,85  | 13,0  | 1300    | 6       | 4     | 2100 | 1,90  | 1,70    | 25    | 0,84   |
| 4  | 6500  | 5500  | 0,80  | 12,5  | 1200    | 5       | 4     | 2000 | 1,85  | 1,65    | 25    | 0,86   |
| 5  | 6000  | 5000  | 0,75  | 12,0  | 1100    | 6       | 4     | 1900 | 1,80  | 1,60    | 25    | 0,88   |
| 6  | 5500  | 4500  | 0,70  | 11,5  | 1000    | 5       | 4     | 1800 | 1,75  | 1,55    | 25    | 0,81   |
| 7  | 5000  | 4000  | 0,65  | 11,0  | 900     | 6       | 4     | 1700 | 1,70  | 1,50    | 25    | 0,83   |
| 8  | 4500  | 3500  | 0,60  | 10,5  | 800     | 5       | 4     | 1600 | 1,65  | 1,45    | 25    | 0,85   |
| 9  | 4000  | 3000  | 0,55  | 10,0  | 700     | 6       | 4     | 1500 | 1,60  | 1,40    | 25    | 0,87   |
| 10 | 3500  | 2500  | 0,50  | 9,5   | 600     | 5       | 4     | 1400 | 1,55  | 1,35    | 25    | 0,89   |

| №  | m <sub>B</sub> | m <sub>C</sub> | J <sub>д</sub> | J <sub>б</sub> | J <sub>ш</sub> | n <sub>ш</sub> | J <sub>p</sub> | m    | D <sub>б</sub> | D <sub>ш</sub> | i <sub>p</sub> | η    |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|----------------|----------------|----------------|------|
| 11 | 8200           | 7200           | 0,96           | 14,2           | 1550           | 6              | 4,1            | 2350 | 2,05           | 1,82           | 25             | 0,79 |
| 12 | 6800           | 5800           | 0,83           | 12,8           | 1250           | 5              | 4              | 2050 | 1,88           | 1,68           | 25             | 0,85 |
| 13 | 6300           | 5300           | 0,78           | 12,3           | 1150           | 6              | 4              | 1950 | 1,82           | 1,62           | 25             | 0,86 |
| 14 | 5800           | 4800           | 0,74           | 11,9           | 1050           | 5              | 4              | 1850 | 1,78           | 1,58           | 25             | 0,84 |
| 15 | 5400           | 4400           | 0,71           | 11,6           | 980            | 6              | 4              | 1780 | 1,74           | 1,54           | 25             | 0,82 |
| 16 | 4900           | 3900           | 0,67           | 11,1           | 920            | 5              | 4              | 1680 | 1,70           | 1,50           | 25             | 0,83 |
| 17 | 4700           | 3700           | 0,66           | 10,9           | 880            | 6              | 4              | 1650 | 1,68           | 1,48           | 25             | 0,84 |
| 18 | 4300           | 3300           | 0,62           | 10,6           | 820            | 5              | 4              | 1580 | 1,64           | 1,44           | 25             | 0,86 |
| 19 | 3900           | 2900           | 0,58           | 10,2           | 760            | 6              | 4              | 1500 | 1,60           | 1,40           | 25             | 0,87 |
| 20 | 3600           | 2600           | 0,53           | 9,9            | 700            | 5              | 4              | 1450 | 1,58           | 1,38           | 25             | 0,88 |
| 21 | 3300           | 2300           | 0,49           | 9,6            | 650            | 6              | 4              | 1400 | 1,56           | 1,36           | 25             | 0,89 |
| 22 | 3100           | 2100           | 0,47           | 9,3            | 620            | 5              | 4              | 1360 | 1,54           | 1,34           | 25             | 0,90 |
| 23 | 2900           | 1900           | 0,45           | 9,0            | 580            | 6              | 4              | 1320 | 1,52           | 1,32           | 25             | 0,88 |
| 24 | 2700           | 1700           | 0,42           | 8,7            | 540            | 5              | 4              | 1280 | 1,50           | 1,30           | 25             | 0,87 |
| 25 | 2500           | 1500           | 0,40           | 8,4            | 500            | 6              | 4              | 1240 | 1,48           | 1,28           | 25             | 0,86 |
| 26 | 2300           | 1300           | 0,37           | 8,1            | 460            | 5              | 4              | 1200 | 1,46           | 1,26           | 25             | 0,85 |
| 27 | 2100           | 1100           | 0,35           | 7,8            | 420            | 6              | 4              | 1160 | 1,44           | 1,24           | 25             | 0,84 |
| 28 | 1900           | 900            | 0,32           | 7,5            | 380            | 5              | 4              | 1120 | 1,42           | 1,22           | 25             | 0,83 |
| 29 | 1700           | 700            | 0,30           | 7,2            | 340            | 6              | 4              | 1080 | 1,40           | 1,20           | 25             | 0,82 |
| 30 | 1500           | 500            | 0,28           | 6,9            | 300            | 5              | 4              | 1040 | 1,38           | 1,18           | 25             | 0,81 |

## ПРАКТИЧНА РОБОТА №3

**Тема:** Розрахунок величин двигуна постійного струму з паралельним збудженням

**Мета:** набути практичних навичок проведення розрахунку основних величин, які характеризують роботу двигуна постійного струму паралельного збудження.

### 3.1. Теоретичні відомості

Двигуни постійного струму (ДПС) є електромеханічними перетворювачами енергії, що перетворюють електричну енергію постійного струму в механічну енергію обертального руху. Основними вузлами є статор (магнітна система з обмоткою збудження або постійними магнітами) та ротор (якір з обмоткою).

Залежно від способу підключення обмотки збудження до джерела живлення розрізняють:

- двигун з паралельним (шунтовим) збудженням;
- двигун з послідовним збудженням;
- двигун зі змішаним (компаундним) збудженням.

Кожен тип має свої особливості та області застосування.

У такій схемі обмотка збудження підключена паралельно до обмотки якоря. Струм збудження практично не залежить від навантаження і визначається лише напругою живлення та опором обмотки збудження:

$$I_E = \frac{U}{R_E}, \quad (3.1)$$

Основні властивості:

- відносно жорстка механічна характеристика (швидкість майже не змінюється при навантаженні);
- плавне регулювання швидкості;
- використовується у приводах, де потрібна сталість швидкості (верстати, транспортні механізми).

В обмотці послідовного збудження струм один і той же протікає через якір і котушки збудження:

$$I_E = I_a, \quad (3.2)$$

Основні властивості:

- великий пусковий момент (через сильний магнітний потік при великих струмах);
- механічна характеристика м'яка: при зменшенні навантаження швидкість значно зростає;
- застосовуються в підйомних механізмах, тягових двигунах, компресорах.

Основні рівняння роботи ДПС.

Рівняння балансу напруг (для якоря):

$$U = E + I_a R_a, \quad (3.3)$$

де  $U$  - напруга живлення,  $E$  - ЕРС,  $I_a$  - струм якоря,  $R_a$  - опір якірного кола.

ЕРС якоря:

$$E = C_E \cdot \Phi_n, \quad (3.4)$$

де  $C_E$  - конструктивна стала,  $\Phi$  - магнітний потік,  $n$  - частота обертання.

Електромагнітна потужність:

$$P_{em} = E \cdot I_a, \quad (3.5)$$

Електромагнітний момент:

$$M_{em} = C_M \cdot \Phi_n \cdot I_a = \frac{P_{em}}{\omega}, \quad (3.6)$$

Корисна механічна потужність і момент:

$$P_2 = P_{in} - \Delta P, \quad (3.7)$$

$$M = \frac{P_2}{\omega}, \quad (3.8)$$

Втрати потужності в ДПС.

Втрати поділяються на:

- електричні (мідні) -  $I_a^2 R_a, I_E^2 R_E$ ;
- магнітні (у сталі від гістерезису та вихрових струмів);
- механічні (тертя в підшипниках, вентилявання).

Загальні втрати:

$$\Delta P = P_{in} - P_2, \quad (3.9)$$

Особливості пуску двигунів постійного струму.

На момент пуску швидкість  $n = 0$ , тому ЕРС відсутня ( $E = 0$ ). Тоді струм якоря:

$$I_{a,start} = \frac{U}{R_a + R_f + R_{ar}}, \quad (3.8)$$

де  $R_f$  - опір обмотки збудження (для послідовного двигуна),  $R_{ar}$  - додатковий реостат.

Через малий опір якоря пусковий струм може в десятки разів перевищувати номінальний, що небезпечно для машини. Для його обмеження застосовують:

- пускові реостати;
- зниження напруги пуску.

### 3.2. Завдання

Відповідно до варіанту (див. табл. 3.1), необхідно визначити наступні величини, що характеризують роботу ДПС:

1. Для номінального режиму роботи визначити струм  $I_N$ , споживаний двигуном з мережі; струм якоря  $I_{aN}$ ; струм збудження  $I_{EN}$ ; сумарні втрати потужності в двигуні  $\Delta P_{nom}$ ; електромагнітну потужність  $P_{emnom}$ ; електрорушійну силу (ЕРС)  $E_{nom}$ ;  $M_N$  – обертальний момент.

2. Визначити опір регульовального реостата  $R_{ar}$ , який треба увімкнути в коло якоря для обмеження пускового струму якоря до  $I_{a,start} = 2,2 \cdot I_{aN}$ , якщо двигун вмикається при пуску на номінальну напругу  $U_N$ , а також знайти значення напруги живлення  $U_{start}$ , до якого треба її знизити, щоб пусковий струм якоря  $I_{a,start}$



не перевищував би значення  $I_{a \text{ start}} = 2,5 \cdot I_{aN}$  при відсутності регулювального реостата.

На рис.3.1 та 3.2 зображено електричну схему вмикання двигуна постійного струму (ДПС) з паралельним збудженням та послідовним збудженням відповідно.

Варіанти даних цих двигунів наведено в табл. 3.1, де позначено  $P_N$ ,  $U_N$ ,  $n_N$ ,  $\eta_N$  – відповідно, номінальні потужність, напруга, частота обертання і ККД;  $R_a$  – опір якорного кола;  $R_E$  – опір обмотки збудження.

### 3.3. Приклад розрахунку

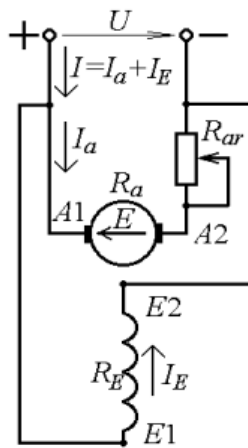


Рис. 3.1 – Схема ДПС з паралельним збудженням

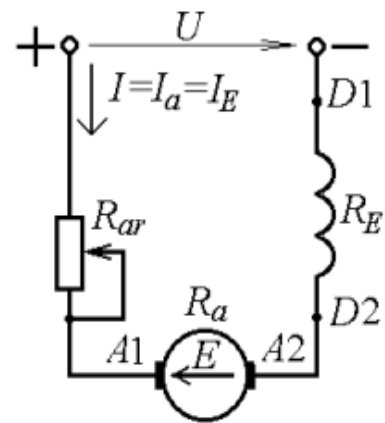


Рис. 3.2 – Схема двигуна постійного струму з послідовним збудженням

Двигун постійного струму з паралельним збудженням (рис. 3.1) має такі дані в номінальному режимі: потужність  $P_N = 90$  кВт; напруга  $U_N = 220$  В ; частота обертання  $n_N = 1060$  об/хв; ККД  $\eta_N = 0,892$ . Опір якорного кола складає  $R_a = 0,03$  Ом; опір обмотки збудження –  $R_E = 25,6$  Ом. Визначити для номінального режиму: потужність  $P_{in nom}$  і струм  $I_N$ , які двигун споживає з мережі; струми збудження  $I_{EN}$  і якоря  $I_{aN}$ ; сумарні втрати потужності в двигуні  $\Delta P_{nom}$ ; ЕРС якоря  $E_{nom}$ ; електромагнітну потужність  $P_{em nom}$ ; обертальний електромагнітний  $M_{em nom}$  і корисний  $M_N$  моменти. Для спрощення розрахунків реакцією якоря можна знехтувати.

1) Характеристика роботи ДПС під час номінального режиму роботи визначається за наступними показниками:

1. Потужність і струм, які двигун споживає з мережі:

$$P_{innom} = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{90}{0,892} = 100,9 \text{ кВт}$$

$$I_N = \frac{P_{innom}}{U_N} = \frac{100,9 \cdot 10^3}{220} = 458,6 \text{ А},$$

2. Струм обмотки збудження і струм якоря:

$$I_{EN} = \frac{U_N}{R_E} = \frac{220}{25,6} = 8,6 \text{ А},$$

$$I_{aN} = I_N - I_{EN} = 458,6 - 8,6 = 450 \text{ А},$$

3. Сумарні втрати потужності в двигуні:

$$\Delta p_{nom} = P_{innom} - P_N = 100,9 - 90 = 10,9 \text{ кВт},$$

4. ЕРС в обмотці якоря:

$$E_{nom} = U_N - I_{aN} \cdot R_a = 220 - 450 \cdot 0,03 = 206,5 \text{ В},$$

5. Електромагнітна потужність:

$$P_{emnom} = E_{nom} \cdot I_{aN} = 206,5 \cdot 450 = 92925 \text{ Вт},$$

6. Обертальні електромагнітний і корисний моменти:

$$M_{emnom} = 9,55 \cdot \frac{P_{emnom}}{n_N} = \frac{92925}{1060} = 837,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_N = 9,55 \cdot \frac{P_N}{n_N} = \frac{90 \cdot 10^3}{1060} = 810,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

2) Опір регулювального реостата при  $U_N$  визначається з формули для струму якоря:

$$I_a = \frac{U_N}{R_a + R_{ar}} = 2,2 \cdot I_{aN},$$

7. Після перетворення:

$$R_{ar} = \frac{U_N}{2,2 I_{aN}} - R_a,$$

$$R_{ar} = \frac{220}{2,2 \cdot 450} - 0,03 = 0,192 \text{ Ом},$$

8. Напруга живлення  $U_{start}$  при  $R_{ar} = 0$  для  $I_{astart} = 2,5 \cdot I_{aN}$  визначається з формули для струму якоря:

$$U_{start} = 2,5 \cdot I_{aN} \cdot R_a$$

$$U_{start} = 2,5 \cdot 450 \cdot 0,03 = 33,75 \text{ В.}$$

3) Розрахунок для двигуна постійного струму з послідовним збудженням (рис. 3.2), виходячи з даних практичної роботи, табл. 3.1 для паралельного збудження опір обмотки збудження  $R_E = 25.6 \text{ Ом}$  - таке значення для послідовного збудження зробило б сумарний опір дуже великим і привело б до неможливого (негативного) значення ЕРС при номінальному струмі.

Тому я припускаю реалістичне значення опору послідовної обмотки  $R_f$  (серійної) –  $R_f = 0.05 \text{ Ом}$ . Усі інші вихідні дані залишені без змін.

1. Вхідна потужність:

$$P_{in} = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{90000}{0,89} = 100896,8 \text{ Вт},$$

2. Струм з мережі і струм якоря (серійний двигун):

$$I_N = I_{aN} = \frac{P_{in}}{U_N} = \frac{100896,8}{220} = 458,6 \text{ А},$$

3. Сумарні втрати:

$$\Delta P = P_{in} - P_N = 100896,8 - 90000 = 10896,8 \text{ Вт},$$

4. Напруга, що падає на сумарному опорі  $R_a + R_f = 0,03 + 0,05 = 0,08 \text{ Ом}$ :

$$U_{drop} = I_{aN} (R_a + R_f) = 458,6 \cdot 0,08 = 36,6 \text{ В},$$

5. ЕРС якоря:

$$E_{nom} = U_N - U_{drop} = 220 - 36,6 = 183,3 \text{ В},$$

6. Електромагнітна потужність:

$$P_{em.nom} = E_{nom} \cdot I_{aN} = 183,3 \cdot 458,6 = 84070,1 \text{ Вт},$$

7. Кутова швидкість:

$$\omega_N = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_N}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1060}{60} = 111 \text{ рад/с},$$

8. Електромагнітний момент:

$$M_{em.nom} = \frac{P_{em.nom}}{\omega_N} = \frac{84070,1}{111} = 757,3 \text{ Н·м},$$

9. Корисний момент:

$$M_N = \frac{P_N}{\omega_N} = \frac{90000}{111} = 810,78 \text{ Н·м},$$

10. Розрахунок реостата для обмеження пускового струму.

Треба обмежити пусковий струм до:

$$I_{a,start}^{(1)} = 2,2 \cdot I_{aN},$$

$$I_{a,start} = \frac{U_N}{R_a + R_f + R_{ar}} \Rightarrow R_{ar} = \frac{U_N}{I_{a,start}} - (R_a + R_f),$$

Тоді

$$I_{a,start}^{(1)} = 2,2 \cdot 458,6 = 1008,9 \text{ А},$$

$$R_{ar} = \frac{U_N}{I_{a,start}^{(1)}} - (R_a + R_f) = \frac{220}{1008,96} - 0,08 = 0,138 \text{ Ом},$$

11. Якщо ж без реостата потрібно обмежити струм до  $I_{a,start}^{(2)} = 2,5 \cdot I_{aN}$ , то знаходимо стартову напругу:

$$U_{start} = I_{a,star} (R_a + R_f),$$

$$I_{a,start}^{(2)} = 2,5 \cdot 458,62 = 1146,5 \text{ А},$$

$$U_{start} = I_{a,star}^{(2)} (R_a + R_f) = 1146,5 \cdot 0,08 = 91,72 \text{ В},$$

Зробити висновок відповідно до впливу параметрів двигуна на кінцевий результат розрахунків.

### 3.3. Контрольні питання

1. Що таке двигун постійного струму (ДПС) та які його основні вузли?
2. Опишіть основні властивості двигуна постійного струму з паралельним (шунтовим) збудженням.
3. Чим відрізняється механічна характеристика двигуна з послідовним збудженням від двигуна з паралельним?
4. Які особливості пуску двигунів постійного струму? Чому необхідно обмежувати пусковий струм?
5. Як знайти опір регулювального реостата, щоб обмежити пусковий струм?
6. Як визначається напруга живлення для обмеження пускового струму у випадку відсутності реостата?
7. Який вплив опору обмотки збудження на струм збудження та загальні характеристики двигуна?
8. Чому під час пуску ЕРС дорівнює нулю? Як це впливає на пусковий струм?
9. Як зміна номінальної напруги впливає на пусковий струм двигуна?
10. Чому для послідовного двигуна використовують менший опір обмотки збудження, ніж для паралельного?
11. Які величини необхідно розрахувати для оцінки механічної потужності та моменту?
12. Поясніть, як результати розрахунків впливають на вибір способу регулювання двигуна та безпечного пуск

Таблиця 3.1 – Вихідні данні до практичної роботи №3

| №<br>варіанту | $P_N$ | $U_N$ | $n_N$ | $\eta_N$ | $R_a$ | $R_E$ |
|---------------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|
|               | кВт   | В     | об/хв | —        | Ом    | Ом    |
| 1             | 4,25  | 220   | 730   | 0,680    | 1,61  | 110   |
| 2             | 3     | 220   | 475   | 0,603    | 3,14  | 139   |
| 3             | 3,55  | 220   | 425   | 0,601    | 2,67  | 117   |
| 4             | 15    | 220   | 1400  | 0,779    | 0,37  | 103   |

|    |      |     |      |       |      |      |
|----|------|-----|------|-------|------|------|
| 5  | 7,5  | 220 | 1000 | 0,760 | 0,79 | 175  |
| 6  | 6    | 220 | 875  | 0,740 | 0,80 | 85   |
| 7  | 4,25 | 220 | 580  | 0,650 | 1,84 | 105  |
| 8  | 11   | 220 | 1060 | 0,785 | 0,45 | 100  |
| 9  | 8,5  | 220 | 875  | 0,760 | 0,62 | 98   |
| 10 | 8    | 220 | 600  | 0,680 | 0,85 | 58   |
| 11 | 11   | 220 | 800  | 0,760 | 0,48 | 73   |
| 12 | 8,5  | 220 | 515  | 0,680 | 0,93 | 91   |
| 13 | 15   | 220 | 850  | 0,807 | 0,21 | 45   |
| 14 | 11   | 220 | 530  | 0,705 | 0,56 | 46   |
| 15 | 15   | 220 | 580  | 0,753 | 0,34 | 44   |
| 16 | 17   | 220 | 500  | 0,730 | 0,33 | 34   |
| 17 | 20   | 220 | 475  | 0,750 | 0,26 | 32   |
| 18 | 7,5  | 440 | 2120 | 0,871 | 1,54 | 1124 |
| 19 | 5,5  | 440 | 1450 | 0,814 | 3,06 | 964  |
| 20 | 4,25 | 440 | 975  | 0,740 | 5,93 | 971  |
| 21 | 3,14 | 440 | 730  | 0,690 | 9,64 | 994  |
| 22 | 7,5  | 440 | 1450 | 0,825 | 1,54 | 414  |
| 23 | 5,5  | 440 | 900  | 0,741 | 4,96 | 1304 |
| 24 | 4,25 | 440 | 690  | 0,674 | 6,62 | 438  |
| 25 | 10   | 440 | 1320 | 0,812 | 1,23 | 260  |
| 26 | 15,5 | 220 | 590  | 0,75  | 0,34 | 44   |
| 27 | 18   | 220 | 520  | 0,73  | 0,33 | 35   |
| 28 | 20   | 220 | 480  | 0,75  | 0,26 | 32   |
| 29 | 7,6  | 440 | 2100 | 0,87  | 1,5  | 1124 |
| 30 | 5,4  | 440 | 1450 | 0,81  | 3,1  | 964  |



## ПРАКТИЧНА РОБОТА №4

**Тема:** Побудова природної та штучної механічної характеристики двигуна постійного струму паралельного збудження

**Мета:** набути практичних навичок проведення розрахунку основних величин, що характеризують роботу двигуна постійного струму паралельного збудження.

### 4.1. Теоретичні відомості

Двигуни постійного струму (ДПС) з паралельним (шунтовим) збудженням широко використовуються у приводах, де потрібна стабільна швидкість обертання при змінному навантаженні. Механічні характеристики цих двигунів відображають залежність частоти обертання  $n$  від обертового моменту  $M$  і дозволяють оцінити роботу двигуна в різних режимах.

Природна механічна характеристика - це крива  $n(M)$ , побудована при постійній напрузі живлення  $U_N$  без введення додаткового опору в коло якоря. Для двигуна з паралельним збудженням магнітний потік  $\Phi$  майже не змінюється при зміні навантаження, тому залежність  $n(M)$  є майже лінійною.

Основні формули для побудови природної механічної характеристики:

ЕРС якоря:

$$E = U - I_a \cdot R_a, \quad (4.1)$$

Частота обертання якоря:

$$n = \frac{E}{C_E \Phi}, \quad (4.2)$$

Електромагнітний момент:

$$M_{em} = C_M \cdot \Phi \cdot I_a, \quad (4.3)$$

У номінальному режимі обертовий момент на валу  $M$  майже дорівнює електромагнітному моменту  $M_{em}$ , що спрощує розрахунки.



Штучна механічна характеристика отримується при зміні опору в колі якоря за допомогою регульовального реостата  $R_{ar}$  або при зміні напруги живлення. Підвищення опору в колі якоря або зниження напруги живлення зменшує пусковий струм і робить криву  $n(M)$  більш пологою.

Формули для штучної механічної характеристики:

Заміна опору якоря:

$$R'_a = R_a + R_{ar}, \quad (4.4)$$

Частота обертання при новому опорі:

$$n = \frac{U - I_a \cdot R'_a}{C_E \Phi}, \quad (4.5)$$

Частота обертання при певному обертальному моменті  $M = k \cdot M_N$  визначається за формулою:

$$n = n_0 - \frac{I_a \cdot R'_a}{C_E \Phi}, \quad (4.6)$$

де  $n_0$  - частота обертання при неробочому ході ( $M = 0$ ).

При пуску частота обертання  $n = 0$ , ЕРС якоря  $E = 0$ . Тоді пусковий струм визначається як:

$$I_{astart} = \frac{U}{R_a + R_{ar}}, \quad (4.7)$$

Для обмеження пускового струму використовують:

- введення регульовального реостата  $R_{ar}$  у коло якоря;
- зниження напруги живлення  $U_{start}$ .

Природна характеристика: будується за двома точками:

- $M = 0$ , (неробочий хід);
- $M = M_{ем ном}$ ,  $n = n_N$  (номінальний режим).

Пряма лінія між цими точками відображає майже постійну швидкість при змінному навантаженні.

Штучна характеристика: будується аналогічно, але враховується додатковий опір  $R_{ar}$  у колі якоря.

Механічні характеристики ДПС з паралельним збудженням дозволяють оцінити вплив електричних параметрів (напруги живлення, опору якоря) на роботу двигуна. Природна характеристика відображає базові властивості двигуна, тоді як штучна дозволяє моделювати роботу при зміні зовнішніх умов, обмеженні пускового струму та регулюванні швидкості.

#### 4.2. Завдання

Відповідно до варіанту (див. табл. 4.1), необхідно визначити наступні величини, що характеризують роботу ДПС:

1. Визначити частоту обертання якоря  $n_o$  у режимі ідеального НХ.
2. Побудувати природну механічну характеристику  $n(M)$ , де  $n$ ,  $M$  – частота обертання і обертальний момент якоря.
3. Визначити частоту обертання якоря  $n$  при обертальному моменті  $M = 0,6 \cdot M_N$ .
4. Побудувати штучну механічну характеристику  $n(M)$  при номінальній напрузі  $U_N$ , якщо у коло якоря ввімкнутий регулювальний реостат з опором  $R_{ar} = 2,5 \cdot R_a$  (рис. 1).
5. Визначити опір  $R_{ar}$  регулювального реостата у колі якоря (рис. 1) для обмеження пускового струму якоря до  $I_{a \text{ start}} = 2,4 \cdot I_{aN}$ , якщо двигун вмикається при пуску на номінальну напругу  $U_N$ .
6. Знайти величину напруги живлення при пуску  $U_{start}$ , до якої її треба знизити при вмиканні двигуна, щоб пусковий струм якоря  $I_{a \text{ start}}$  не перевищував би значення  $I_{a \text{ start}} = 2,3 \cdot I_{aN}$  при відсутності пускового реостата.

На рис. 4.1 зображено електричну схему вмикання двигуна постійного струму (ДПС) з паралельним збудженням. Варіанти даних цих двигунів наведено в табл. 4.1, де позначено  $P_N$ ,  $U_N$ ,  $n_N$ ,  $\eta_N$  – відповідно, номінальна потужність, напруга, частота обертання і ККД;  $R_a$  – опір якорного кола;  $R_E$  – опір обмотки збудження.

### 4.3. Приклад розрахунку

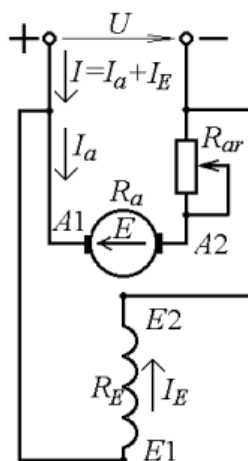


Рис. 4.1 - Схема ДПС з паралельним збудженням

Двигун постійного струму з паралельним збудженням (рис. 4.1) має такі номінальні дані: напруга  $U_N = 220$  В; струми якоря і збудження, значення яких взяти з попередньої практичної роботи  $I_{aN}$ ,  $I_{EN}$  А; частота обертання  $n_N = 1000$  об/хв. Опір якрного кола складає  $R_a = 0,1$  Ом.

Необхідно:

1. Визначити опір регулювального реостата  $R_{ar}$ , який треба увімкнути в коло якоря для обмеження пускового струму якоря до  $I_{a\text{ start}} = 2,2 \cdot I_{aN}$ , якщо двигун вмикається при пуску на номінальну напругу  $U_N$ , а також знайти значення напруги живлення  $U_{start}$ , до якого треба її знизити, щоб пусковий струм якоря  $I_{a\text{ start}}$  не перевищував би значення  $I_{a\text{ start}} = 2,5 \cdot I_{aN}$  при відсутності регулювального реостата.

2. Побудувати механічні характеристики  $n(M)$  при номінальній напрузі  $U_N$ : а) природну; б) штучну – при умові, що в коло якоря увімкнено регулювальний реостат з опором  $R_{ar} = 0,2$  Ом ( $n$  – частота обертання якоря;  $M$  – обертальний момент).

3. Аналітично або, користуючись природною механічною характеристикою, визначити частоту обертання якоря при  $M = 0,5 \cdot M_N$ .

1. Опір регулювального реостата при  $U_N$  визначається з формули струму якоря:

$$I_a = \frac{U_n}{R_a + R_{ar}} = 2,2 \cdot I_{aN}, \quad (4.8)$$

Після перетворення та підстановки отримаємо:

$$R_{ar} = \frac{U_n}{2,2 I_{aN}} - R_a = \frac{400}{2,2 \cdot 200} - 0,15 = 0,85 \text{ Ом},$$

Напруга живлення  $U_{start}$  при  $R_{ar} = 0$  для  $I_{astart} = 2,5 \cdot I_{aN}$  визначається з формули для струму якоря:

$$U_{start} = 2,5 \cdot I_{aN} \cdot R_a = 2,5 \cdot 200 \cdot 0,15 = 75 \text{ В},$$

2. Відомо, що електрорушійна сила (ЕРС) двигуна  $E$  і електромагнітний момент  $M_{em}$  визначаються формулами:

$$E = C_E \cdot \Phi \cdot n, \quad (4.9)$$

$$M_{em} = C_M \cdot \Phi \cdot I_a, \quad (4.10)$$

де  $C_E$ ,  $C_M$  - електрична і механічна сталі двигуна;  $\Phi$  - магнітний потік;  $I_a$  - струм якоря.

В номінальному режимі:

$$E_{nom} = C_E \cdot \Phi_{nom} \cdot n_N, \quad (4.11)$$

$$M_{emnom} = C_M \cdot \Phi_{nom} \cdot I_{aN}, \quad (4.12)$$

Враховуючи попередні формули отримаємо:

$$\frac{E}{E_{nom}} = \frac{\Phi \cdot n}{\Phi_{nom} \cdot n_N}, \quad \frac{M_{em}}{M_{emnom}} = \frac{\Phi \cdot I_a}{\Phi_{nom} \cdot I_{aN}}, \quad (4.13)$$

Якщо напруга живлення є незмінною, то в двигуні з паралельним збудженням магнітний потік  $\Phi$  майже не змінюється навіть при зміні його навантаження. Тому, враховуючи, що  $\Phi = \Phi_{nom}$ , маємо з попередніх формул:

$$n = n_N \cdot \frac{E}{E_{nom}}, \quad I_a = I_{aN} \cdot \frac{M_{em}}{M_{emnom}}, \quad (4.14)$$

Відомо також, що ЕРС визначається ще формулою:

$$E = U - I_a \cdot R_a,$$

Значення струму ( $I_a$ ) підставляємо в формулу ЕРС, внаслідок отримаємо:

$$I_a = U - I_a \cdot R_a \frac{M_{em}}{M_{emnom}}, \quad (4.15)$$

Підставляючи в формулу частоти обертання ( $n$ ) вираз  $E$  маємо базову формулу для розрахунку механічних характеристик:

$$n = n_N \cdot \frac{U}{E_{nom}} - \frac{I_a \cdot n_N}{E_{nom} \cdot M_{emnom}} \cdot M_{em} \cdot R_a, \quad (4.16)$$

Для даного двигуна визначається:

- номінальний ЕРС:

$$E_{nom} = U_N - I_{aN} \cdot R_a = 220 - 130 \cdot 0,1 = 207 \text{ В},$$

- номінальна електромагнітна потужність:

$$R_{emnom} = E_{nom} \cdot I_{aN} = 207 \cdot 130 = 26910 \text{ В},$$

- номінальний електромагнітний момент:

$$M_{emnom} = 9,55 \cdot \frac{P_{emnom}}{n_N} = 9,55 \cdot \frac{26910}{1000} = 257 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для спрощеного визначення механічних характеристик обертальний момент на валу  $M$  замінюють електромагнітним моментом  $M_{em}$ .

Природна механічна характеристика  $n(M)$  при  $U = U_N$  визначається за базовою формулою ( $n$ ) таким чином:

$$n = n_N \cdot \frac{U}{E_{nom}} - \frac{I_a \cdot n_N}{E_{nom} \cdot M_{emnom}} \cdot M_{em} \cdot R_a = n_0 - C \cdot M_{em} \cdot R_a,$$

де  $n$  - частота обертання якоря при неробочому ході ( $M = 0$ ) визначається за формулою:

$$n_0 = n_N \cdot \frac{U}{E_{nom}} = 1000 \cdot \frac{220}{207} = 1063 \text{ об/хв},$$

Стала двигуна:

$$C = \frac{I_a \cdot n_N}{E_{nom} \cdot M_{emnom}} = \frac{130 \cdot 1000}{207 \cdot 257} = 2,44 \frac{\text{об}}{\text{хв} \cdot \text{Ом} \cdot \text{Н} \cdot \text{м}},$$

Природна механічна характеристика є приблизно прямою лінією (рис. 4.2), яку можна побудувати за двома точками: точкою  $A$  з координатами ( $M = 0, n = n_0$

=1063 об/хв) і точкою В с координатами ( $M = M_{em\ nom} = 257\ \text{Н}\cdot\text{м}$ ,  $n = n_N = 1000\ \text{об/хв}$ ).

Штучна механічна характеристика  $n(M)$  при вмиканні регулювального реостата з опором  $R_{ar} = 0,2\ \text{Ом}$  і при збереженні  $U = U_N$  визначається за базовими формулами ( $n$ ) заміною  $R_a$  на  $R_a + R_{ar}$  таким чином:

$$n = n_N \cdot \frac{U}{E_{nom}} - \frac{I_a \cdot n_N}{E_{nom} \cdot M_{emnom}} \cdot M_{em} \cdot (R_a + R_{ar}) = n_0 - C \cdot M_{em} \cdot (R_a + R_{ar})$$

де частота обертання якоря при неробочому ході  $n_0$  та стала двигуна  $C$  зберігаються, як і для випадку розрахунку природної механічної характеристики.

Штучна механічна характеристика теж є прямою лінією (рис. 4.2), яка теж будується за двома точками. Точка А має координати ( $M = 0$ ,  $n = n_0 = 1063\ \text{об/хв}$ ).

Для другої точки С при номінальному моменті  $M_{em} = M_{emnom} = 257\ \text{Н}\cdot\text{м}$  розрахуємо частоту обертання:

$$n = n_0 - C \cdot M_{em} \cdot (R_a + R_{ar}) = 1063 - 2,444 \cdot 257 \cdot (0,1 + 0,2) = 875,$$

Частота обертання  $n'$  при  $U_N$  і  $M_{em} = 0,5 \cdot M_{emnom}$  і при відсутності регулювального реостата визначається за формулою:

$$n' = n_0 - C \cdot 0,5 \cdot M_{em} \cdot R_a = 1063 - 2,444 \cdot 0,5 \cdot 275 \cdot 0,1 = 1031,5,$$

Такий же результат отримуємо графічно з природної механічної характеристики для  $M_{em} = 0,5 \cdot M_{emnom}$  (рис. 4.2, точка D).

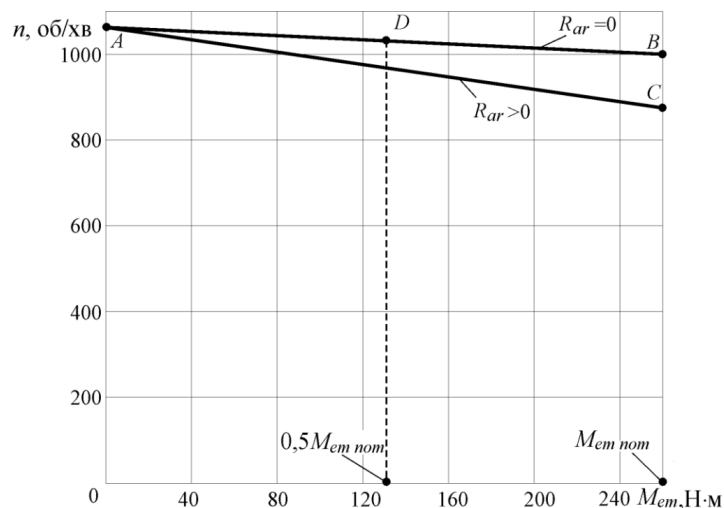


Рис. 4.2 – Механічна характеристика ДПС з паралельним збудженням

Зробити висновок відповідно до впливу параметрів двигуна на кінцевий результат розрахунків.

#### 4.4. Контрольні питання

1. Що таке механічна характеристика двигуна постійного струму?
2. У чому полягає відмінність між природною та штучною механічними характеристиками?
3. Чому природна механічна характеристика ДПС з паралельним збудженням є майже лінійною?
4. Як впливає додатковий опір у колі якоря на штучну механічну характеристику?
5. Як визначається ЕРС якоря двигуна постійного струму?
6. Запишіть формулу для обчислення частоти обертання якоря при навантаженні.
7. Як обчислюється електромагнітний момент двигуна?
8. Яка формула використовується для знаходження пускового струму при наявності реостата в колі якоря?
9. Чому в двигуні з паралельним збудженням магнітний потік практично не змінюється при зміні навантаження?
10. Як змінюється швидкість обертання двигуна зі збільшенням навантаження на валу?
11. Які переваги і недоліки має регулювання швидкості шляхом введення додаткового опору в коло якоря?
12. Як можна практично використати побудовані механічні характеристики в електроприводі?

Таблиця 4.1 – Вихідні данні до практичної роботи №4

| №<br>варіанту | $P_N$ | $U_N$ | $n_N$ | $\square_N$ | $R_a$ | $R_E$ |
|---------------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|
|               | кВт   | В     | об/хв | —           | Ом    | Ом    |
| 1             | 4,25  | 220   | 730   | 0,680       | 1,61  | 110   |
| 2             | 3     | 220   | 475   | 0,603       | 3,14  | 139   |
| 3             | 3,55  | 220   | 425   | 0,601       | 2,67  | 117   |
| 4             | 15    | 220   | 1400  | 0,779       | 0,37  | 103   |
| 5             | 7,5   | 220   | 1000  | 0,760       | 0,79  | 175   |
| 6             | 6     | 220   | 875   | 0,740       | 0,80  | 85    |
| 7             | 4,25  | 220   | 580   | 0,650       | 1,84  | 105   |
| 8             | 11    | 220   | 1060  | 0,785       | 0,45  | 100   |
| 9             | 8,5   | 220   | 875   | 0,760       | 0,62  | 98    |
| 10            | 8     | 220   | 600   | 0,680       | 0,85  | 58    |
| 11            | 11    | 220   | 800   | 0,760       | 0,48  | 73    |
| 12            | 8,5   | 220   | 515   | 0,680       | 0,93  | 91    |
| 13            | 15    | 220   | 850   | 0,807       | 0,21  | 45    |
| 14            | 11    | 220   | 530   | 0,705       | 0,56  | 46    |
| 15            | 15    | 220   | 580   | 0,753       | 0,34  | 44    |
| 16            | 17    | 220   | 500   | 0,730       | 0,33  | 34    |
| 17            | 20    | 220   | 475   | 0,750       | 0,26  | 32    |
| 18            | 7,5   | 440   | 2120  | 0,871       | 1,54  | 1124  |
| 19            | 5,5   | 440   | 1450  | 0,814       | 3,06  | 964   |
| 20            | 4,25  | 440   | 975   | 0,740       | 5,93  | 971   |
| 21            | 3,14  | 440   | 730   | 0,690       | 9,64  | 994   |
| 22            | 7,5   | 440   | 1450  | 0,825       | 1,54  | 414   |
| 23            | 5,5   | 440   | 900   | 0,741       | 4,96  | 1304  |
| 24            | 4,25  | 440   | 690   | 0,674       | 6,62  | 438   |
| 25            | 10    | 440   | 1320  | 0,812       | 1,23  | 260   |
| 26            | 4,25  | 220   | 730   | 0,680       | 1,61  | 110   |



|    |      |     |      |       |      |     |
|----|------|-----|------|-------|------|-----|
| 27 | 3,00 | 220 | 475  | 0,603 | 3,14 | 139 |
| 28 | 5,00 | 220 | 960  | 0,720 | 0,85 | 95  |
| 29 | 7,50 | 220 | 1450 | 0,765 | 0,48 | 72  |
| 30 | 2,20 | 110 | 870  | 0,655 | 1,25 | 58  |

## ПРАКТИЧНА РОБОТА №5

**Тема:** Розрахунок параметрів та характеристик двигуна постійного струму з послідовним збудженням.

**Мета:** набути практичних навичок проведення розрахунку основних параметрів двигуна постійного струму послідовного збудження.

### 5.1. Теоретичні відомості

Двигун постійного струму з послідовним збудженням (ДПС-ПЗ) належить до електричних машин, у яких обмотка збудження з'єднана послідовно з обмоткою якоря. Таким чином, один і той самий струм протікає через обмотку якоря та обмотку збудження.

Основні особливості:

- магнітний потік  $\Phi$  залежить від струму якоря  $I_a$ , що робить характеристики двигуна нелінійними;
- при великих струмах збудження створюється сильний магнітний потік, що забезпечує високий пусковий момент;
- при зменшенні навантаження струм падає, магнітний потік зменшується, і швидкість двигуна різко зростає - що може призвести до «розгону» двигуна;
- такі двигуни широко застосовуються у підйомних механізмах, тягових приводах, компресорах, де потрібен великий пусковий момент.

Основні рівняння роботи ДПС з послідовним збудженням

Рівняння балансу напруги якоря:

$$U = E + I_a R_{aE}, \quad (5.1)$$

де  $U$  - напруга живлення,  $E$  - ЕРС якоря,  $I_a$  - струм якоря,  $R_a$  - опір якоря з урахуванням обмотки збудження.

ЕРС якоря:

$$E = C_E \cdot \Phi \cdot n, \quad (5.2)$$

де  $C_E$  - конструктивна стала машини,  $\Phi$  - магнітний потік,  $n$  - частота обертання.

Електромагнітний момент:

$$M_{em} = C_M \cdot \Phi \cdot I_a, \quad (5.3)$$

Корисна механічна потужність:

$$P_2 = M_N \cdot \omega, \quad (5.4)$$

де  $M_N$  - момент на валу,  $\omega$  - кутова швидкість.

Механічні характеристики ДПС-ПЗ. Механічна характеристика показує залежність частоти обертання від обертового моменту  $n(M)$ .

1. Природна механічна характеристика отримується при роботі двигуна на номінальній напрузі  $U_N$  без додаткових опорів у колі якоря.

Через залежність  $\Phi(I_a)$  вона має нелінійний характер:

- при великих моментах (великий струм) швидкість зменшується;
- при малих моментах (малий струм) швидкість різко зростає.

2. Штучна механічна характеристика отримується при введенні додаткового реостату  $R_{ar}$  у коло якоря. Це збільшує падіння напруги на опорах і призводить до зменшення швидкості при даному моменті. Таким чином, крива  $n(M)$  зміщується вниз.

Пуск двигуна. При пуску  $n=0$ , тому  $E=0$ , і пусковий струм визначається:

$$I_{a,start} = \frac{U}{R_{aE} + R_{ar}}, \quad (5.5)$$

Оскільки опір якоря і обмотки збудження малий, пусковий струм може бути в десятки разів більший за номінальний. Для його обмеження вводять пускові реостати або знижують напругу живлення.

Таким чином, ДПС з послідовним збудженням відрізняється високим пусковим моментом, нелінійними механічними характеристиками та потребує обмеження пускового струму. Природні та штучні характеристики дозволяють оцінити його роботу при різних умовах навантаження і схемах підключення.

## 5.2. Завдання

Для ДПС з послідовним збудженням електрична схема вмикання зображена на рис. 5.1. Варіанти даних таких двигунів наведено в табл. 5.2, де позначено:  $P_N$ ,  $U_N$ ,  $n_N$ ,  $\eta_N$  - номінальні потужність, напруга, частота обертання та ККД;  $R_{aE}$  - опір якірного кола, включаючи опір обмотки збудження.

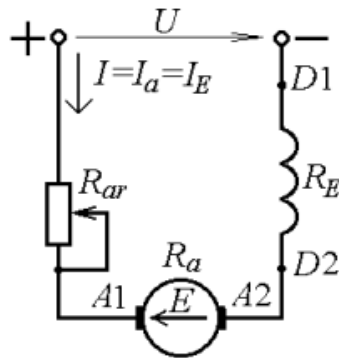


Рис. 5.1 – Схема двигуна постійного струму з послідовним збудженням

Крива намагнічування ДПС  $\Phi(I)$  у відносних величинах  $k_\Phi(k_I)$  зображена на рис. 5.2, де використано кратність струму збудження  $k_I = I/I_N$  (який одночасно є і струмом якоря);  $k_\Phi = \Phi/\Phi_{nom}$  - кратність магнітного потоку збудження ( $I_N$ ,  $\Phi_{nom}$  - номінальні значення цих величин).

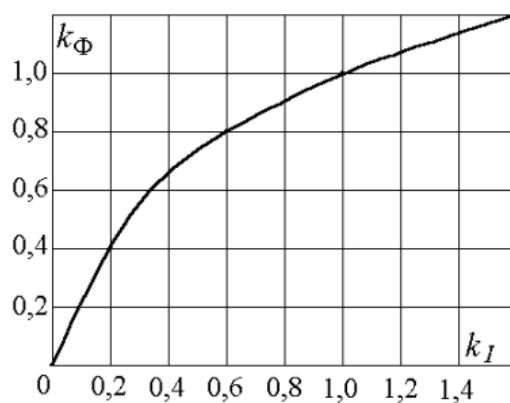


Рис. 5.2 – Магнітна характеристика ДПС

Зобити розрахунок параметрів та характеристик двигуна постійного струму з послідовним збудженням за даними таблиці 1.2. Відповідно обраного варіанту необхідно виконати наступне:

1. Для номінального режиму роботи визначити: потужність, споживану двигуном з мережі  $P_{in\ nom}$ ; струм  $I_N$ ; сумарні втрати потужності в двигуні  $\Delta P_{nom}$ ; ЕРС обмотки якоря  $E_{nom}$ ; електромагнітний момент  $M_{em\ nom}$ ; корисний обертальний момент на валу двигуна  $M_N$ .

2. Побудувати природну механічну характеристику двигуна  $n(M)$ , де  $n$  і  $M$  - частота обертання і обертальний момент якоря.

3. Побудувати штучну механічну характеристику  $n(M)$  при номінальній напрузі  $U_N$ , якщо у коло якоря ввімкнутий регулювальний реостат з опором  $R_{ar} = 2,5 \cdot R_{aE}$  (рис. 5.1).

### 5.3. Приклад виконання практичного завдання

Завдання: Двигун постійного струму з послідовним збудженням (рис. 5.1) має такі номінальні дані: потужність  $P_N = 12$  кВт; напруга  $U_N = 220$  В; частота обертання  $n_N = 600$  об/хв; ККД  $\eta_N = 0,83$ . Опір якорного кола з урахуванням обмотки збудження складає  $R_{aE} = 0,2$  Ом. Характеристику намагнічування ДПС  $\Phi(I)$  - залежність магнітного потоку  $\Phi$  від струму  $I$  у відносних величинах  $k_\Phi$  ( $k_I$ ) зображено на рис. 5.2.

Необхідно визначити для номінального режиму: потужність  $P_{in\ nom}$  і струм  $I_N$ , які двигун споживає з мережі; сумарні втрати потужності в двигуні  $\Delta P_{nom}$ ; ЕРС якоря  $E_{nom}$ ; електромагнітну потужність  $P_{em\ nom}$ ; обертальні електромагнітний  $M_{em\ nom}$  і корисний  $M_N$  моменти. Після чого побудувати при  $U_N$ :

- а) природну механічну характеристику  $n(M)$ ;
- б) штучну механічну характеристику  $n(M)$  при вмиканні в коло якоря регулювального реостата з опором  $R_{ar} = 0,2$  Ом.

Характеристика роботи ДПС під час номінального режиму роботи визначається за наступними показниками:

1. Потужність і струм, які двигун споживає з мережі:

$$P_{in\ nom} = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{12}{0,83} = 14,46 \text{ кВт},$$

$$I_N = \frac{P_{in\ nom}}{U_N} = \frac{14,46 \cdot 10^3}{220} = 65,7 \text{ А},$$

2. Струм обмотки якоря, виводячи з конструктивних особливостей дорівнює:

$$I_{aN} = I_N = 65,7 \text{ А},$$

3. Сумарні втрати потужності в двигуні:

$$\Delta P_{nom} = P_{in\ nom} - P_N = 14,46 - 12 = 2,46 \text{ кВт},$$

4. ЕРС в обмотці якоря:

$$E_{nom} = U_N - I_{aN} \cdot R_{aE} = 220 - 65,7 \cdot 0,2 = 206,86 \text{ кВт},$$

5. Електромагнітна потужність:

$$P_{em\ nom} = E_{nom} \cdot I_{aN} = 206,86 \cdot 65,7 = 13591 \text{ Вт},$$

6. Обертальні електромагнітний і корисний моменти:

$$M_{em\ nom} = 9,55 \frac{P_{em\ nom}}{n_N} = 9,55 \frac{13591}{600} = 216,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_N = 9,55 \frac{P_N}{n_N} = 9,55 \frac{12 \cdot 10^3}{600} = 191 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для побудови механічних характеристик  $n(M)$  ДПС з послідовним збудженням неможна безпосередньо скористатися базовою формулою для механічних характеристик, яка була отримана для ДПС з паралельним збудженням:

$$n = n_N \cdot \frac{U}{E_{nom}} - \frac{I_a \cdot n_N}{E_{nom} \cdot M_{emnom}} \cdot M_{em} \cdot R_a, \quad (5.6)$$

Справа у тому, що тепер у ДПС з послідовним збудженням магнітний потік збудження  $\Phi$  залежить від струму якоря  $I_a$ , що подано на рис. 5.1 у відносних одиницях  $k_\Phi(k_I)$ , і змінюється разом з ним ( $I_a = I = I_E$ , де  $I$ ,  $I_E$  - відповідно, струм, споживаний двигуном з мережі, та струм обмотки збудження). Тому зроблено наступне перетворення формул:

З формули ЕРС обмотки якоря:

$$E = C_E \cdot n \cdot \Phi \quad n = \frac{E}{C_E \cdot \Phi}, \quad (5.7)$$

Підставимо у останнє  $E = U - R_a \cdot I_a$ , і одержимо:

$$n = \frac{U - R_a \cdot I_a}{C_E \cdot \Phi}, \quad (5.8)$$

З використанням відносних значень  $k_I$  і  $k_\Phi$  виражаємо струм якоря і магнітний потік:

$$\begin{aligned} I_a &= k_I \cdot I_{aN} \\ \Phi &= k_\Phi \cdot \Phi_{nom} \end{aligned} \quad (5.9)$$

Тоді частота обертання матиме вид:

$$n = \frac{U - k_a \cdot R_a \cdot I_{aN}}{C_E \cdot k_\Phi \cdot \Phi_{nom}}, \quad (5.10)$$

У номінальному режимі ЕРС обмотки якоря

$$E_{nom} = C_E \cdot n_N \cdot \Phi_{nom}, \quad (5.11)$$

звідкіля  $\Phi_{nom} = \frac{E_{nom}}{C_E \cdot n_N}$  з урахуванням чого отримаємо формулу для розрахунків частоти обертання якоря:

$$n = n_n \frac{U - k_I \cdot R_a \cdot I_{aN}}{k_\Phi \cdot E_{nom}}, \quad (5.12)$$

На основі формули електромагнітного обертового моменту  $M_{em} = C_M \cdot \Phi \cdot I_a$  з урахуванням ( $I_a$  та  $\Phi$ ) маємо  $M_{em} = C_M \cdot k_\Phi \cdot k_I \cdot \Phi_{nom} \cdot I_{aN}$ , і, через те, що  $M_{em nom} = C_M \cdot \Phi_{nom} \cdot I_{aN}$ , отримаємо формулу для розрахунку обертового електромагнітного моменту:

$$M_{em} = k_\Phi \cdot k_I \cdot M_{em nom}, \quad (5.13)$$

8. Для побудови механічних характеристик знайдемо ще такі дані:

- номінальна ЕРС:

$$E_{nom} = U_N - R_a \cdot I_{aN} = 110 - 100 \cdot 0,2 = 90 \text{ В},$$

- номінальна електромагнітна потужність:

$$P_{nom} = E_{nom} \cdot I_{aN} = 90 \cdot 100 = 9000 \text{ В},$$

- номінальний обертальний електромагнітний момент

$$M_{em\ nom} = 9,55 \frac{P_{em\ nom}}{n_N} = 9,55 \frac{9000}{750} = 114,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

9. Для побудови природної механічної характеристики  $n(M_{em})$  скористаємось формулою, яка при номінальній напрузі  $U=U_N$  має вигляд:

$$n = n_n \frac{U - k_I \cdot R_a \cdot R_{aE}}{k_\Phi \cdot E_{nom}}, \quad (5.14)$$

а також формулою

$$M_{em} = k_\Phi \cdot k_I \cdot M_{em\ nom}, \quad (5.15)$$

та ще кривою намагнічування  $k_\Phi (k_I)$  у відносних одиницях, що зображена на рис. 5.2.

Задаючись значеннями  $k_I$ , визначаємо  $k_\Phi$  за рис. 5.2, а величини  $M_{em}$  та  $n$  за формулами (5.14) і (5.15). Дані усіх розрахунків зводимо до табл. 5.1. За результатами розрахунку на рис.3 зображена природна механічна характеристика (крива 1).

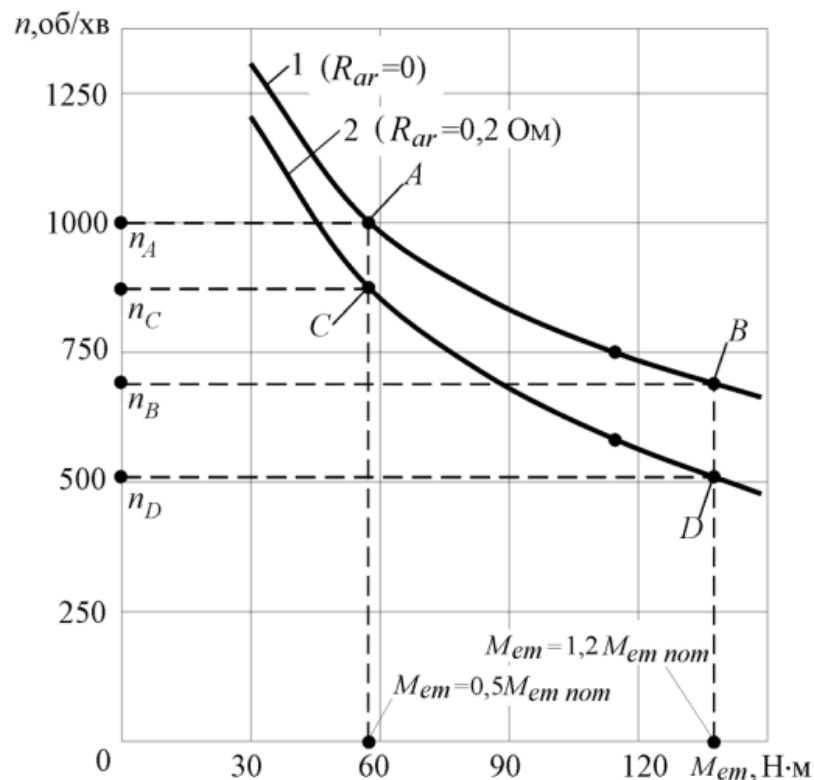


Рис. 5.3 – Механічні характеристики ДПС з послідовним збудженням

Таблиця 5.1 - Дані розрахунку механічних характеристик



|                                 |      |      |      |       |       |
|---------------------------------|------|------|------|-------|-------|
| $k_I$                           | 0,4  | 0,6  | 0,8  | 1,0   | 1,2   |
| $k_\Phi$                        | 0,65 | 0,8  | 0,91 | 1,0   | 1,08  |
| $M_{em}$ , Н·м                  | 29,8 | 55,0 | 83,4 | 114,6 | 148,5 |
| $n$ , об/хв при $R_{ar}=0$      | 1308 | 1021 | 861  | 750   | 664   |
| $n$ , об/хв при $R_{ar}=0,2$ Ом | 1205 | 896  | 714  | 583   | 478   |

Для побудови штучної механічної характеристики  $n(M_{em})$  знов при  $U_N$ , але з додатковим опором у колі якоря  $R_{ar} = 0,2$  Ом, отримуємо:

$$n = n_N \cdot \frac{U_N - k_I \cdot I_{aN} \cdot (R_{aE} + R_{ar})}{k_\Phi \cdot E_{nom}},$$

Решта залишається, як і у попередньому випадку, тобто скористаємося формулою

$$M_{em} = k_I \cdot k_\Phi \cdot M_{emnom},$$

та кривою намагнічування  $k_\Phi(k_I)$ . Задаючись значеннями  $k_I$  визначаємо  $k_\Phi$  за рис. 5.2, а величини  $n$  та  $M_{em}$  за раніше вказаною формулою, усі результати зводимо до табл. 5.1, а за ними на рис. 5.3 зображена штучна механічна характеристика (крива 2).

Зробити висновок відповідно до впливу параметрів двигуна на кінцевий результат розрахунків.

#### 5.4. Контрольні питання

1. У чому полягає особливість схеми вмикання двигуна постійного струму з послідовним збудженням?
2. Чому двигун з послідовним збудженням має великий пусковий момент?
3. Як залежить магнітний потік  $\Phi$  від струму якоря у ДПС-ПЗ?
4. Чому механічна характеристика такого двигуна є нелінійною?
5. Які недоліки має робота ДПС-ПЗ при малих навантаженнях?
6. Запишіть рівняння балансу напруги двигуна.

7. Як визначається ЕРС обмотки якоря?
8. Як розрахувати ККД двигуна в номінальному режимі?
9. Що таке природна механічна характеристика ДПС-ПЗ?
10. Як будується штучна механічна характеристика?
11. Як змінюється частота обертання двигуна при зростанні навантажувального моменту?
12. У яких випадках на практиці застосовують двигуни з послідовним збудженням?
13. Чому ці двигуни заборонено запускати без навантаження?
14. Як можна обмежити пусковий струм ДПС-ПЗ?

Таблиця 5.2 – Вихідні данні до практичної роботи №5

| №<br>варіанту | $P_N$ | $U_N$ | $n_N$ | $\eta_N$ | $R_{aE}$ |
|---------------|-------|-------|-------|----------|----------|
|               | кВт   | В     | об/хв | —        | Ом       |
| 1             | 4,25  | 220   | 730   | 0,680    | 1,61     |
| 2             | 3     | 220   | 475   | 0,603    | 3,14     |
| 3             | 3,55  | 220   | 425   | 0,601    | 2,67     |
| 4             | 15    | 220   | 1400  | 0,779    | 0,37     |
| 5             | 7,5   | 220   | 1000  | 0,760    | 0,79     |
| 6             | 6     | 220   | 875   | 0,740    | 0,80     |
| 7             | 4,25  | 220   | 580   | 0,650    | 1,84     |
| 8             | 11    | 220   | 1060  | 0,785    | 0,45     |
| 9             | 8,5   | 220   | 875   | 0,760    | 0,62     |
| 10            | 8     | 220   | 600   | 0,680    | 0,85     |
| 11            | 11    | 220   | 800   | 0,760    | 0,48     |
| 12            | 8,5   | 220   | 515   | 0,680    | 0,93     |
| 13            | 15    | 220   | 850   | 0,807    | 0,21     |
| 14            | 11    | 220   | 530   | 0,705    | 0,56     |
| 15            | 15    | 220   | 580   | 0,753    | 0,34     |

|    |      |     |      |       |      |
|----|------|-----|------|-------|------|
| 16 | 17   | 220 | 500  | 0,730 | 0,33 |
| 17 | 20   | 220 | 475  | 0,750 | 0,26 |
| 18 | 7,5  | 440 | 2120 | 0,871 | 1,54 |
| 19 | 5,5  | 440 | 1450 | 0,814 | 3,06 |
| 20 | 4,25 | 440 | 975  | 0,740 | 5,93 |
| 21 | 3,14 | 440 | 730  | 0,690 | 9,64 |
| 22 | 7,5  | 440 | 1450 | 0,825 | 1,54 |
| 23 | 5,5  | 440 | 900  | 0,741 | 4,96 |
| 24 | 4,25 | 440 | 690  | 0,674 | 6,62 |
| 25 | 10   | 440 | 1320 | 0,812 | 1,23 |
| 26 | 3,60 | 220 | 850  | 0,705 | 1,20 |
| 27 | 5,50 | 220 | 600  | 0,740 | 0,95 |
| 28 | 2,80 | 110 | 950  | 0,665 | 1,85 |
| 29 | 7,20 | 220 | 720  | 0,775 | 0,68 |
| 30 | 6,00 | 220 | 580  | 0,755 | 0,82 |

## ПРАКТИЧНА РОБОТА №6

**Тема:** Розрахунок перехідних процесів та параметрів двигуна постійного струму у складі електропривода вантажопідйомного механізму.

**Мета:** набути практичних навичок проведення розрахунку основних параметрів двигуна постійного струму у складі електропривода вантажопідйомного механізму.

### 6.1. Теоретичні відомості

Перехідні процеси в електроприводі визначаються взаємодією електромагнітної частини двигуна та механічної системи приводу (редуктор, барабан, вантаж). Динаміка описується рівнянням руху:

$$J_{\text{прив}} \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{дв}} - M_{\text{н}}, \quad (6.1)$$

де  $J_{\text{прив}}$  - приведений момент інерції системи до вала двигуна;  $M_{\text{дв}}$  - електромагнітний момент двигуна;  $M_{\text{н}}$  - момент навантаження.

До моменту інерції ротора двигуна  $J_{\text{дв}}$  додаються приведені інерції барабана і маси вантажу:

$$J_{\text{прив}} = J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{б}} + J_{\text{в}}}{i_p^2}, \quad (6.2)$$

де  $J_{\text{б}} = \frac{1}{2} m_{\text{б}} R_{\text{б}}^2$  - інерція барабана;  $J_{\text{в}} = m_{\text{в}} R_{\text{б}}^2$  - інерція вантажу;  $i_p$  - передавальне число редуктора.

Рівняння електромеханічної характеристики:

$$M_{\text{дв}} = \frac{K_t}{R_a} (U - K_e \omega), \quad (6.3)$$

де  $K_t$  - коефіцієнт моменту (Н·м/А);  $K_e$  - коефіцієнт ЕРС (В·с/рад);  $R_a$  - опір якоря;  $U$  - напруга живлення.

Характеристика є майже лінійною: при зростанні швидкості  $\omega$  момент двигуна зменшується.

Природна та пускова механічні характеристики:

- Природна характеристика відповідає роботі двигуна без додаткових опорів у колі якоря.
- Пускова характеристика формується введенням додаткового опору  $R_{\text{доп}}$ , що зменшує пусковий струм і момент. У цьому випадку повний опір кола якоря:

$$R_{\Sigma} = R_a + R_{\text{доп}}, \quad (6.4)$$

Під час пуску двигуна кутова швидкість змінюється за експоненційним законом:

$$\omega(t) = \omega_{\infty} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{ем}}}} \right), \quad (6.5)$$

де  $\omega^{\infty}$  - усталене значення швидкості при даному навантаженні;  $\tau_{\text{ем}} = \frac{J_{\text{прив}} R_{\Sigma}}{K_t K_e}$  - електромеханічна стала часу.

Струм якоря у процесі пуску змінюється за аналогічним законом:

$$I(t) = I_{\infty} + (I(0) - I_{\infty}) e^{-\frac{t}{\tau_{\text{ем}}}}, \quad (6.6)$$

де  $I(0) = \frac{U}{R_{\Sigma}}$  - початковий пусковий струм;  $I_{\infty}$  - усталене значення струму.

Час пуску орієнтовно приймають  $t_{\text{п}} \approx 3\tau_{\text{ем}}$ , оскільки після цього швидкість досягає  $\sim 95\%$  від усталеної.

Перехідний процес гальмування. При відключенні двигуна від мережі електромагнітний момент зникає, а рух уповільнюється під дією моменту навантаження. Кутове прискорення:

$$\alpha = -\frac{M_n}{J_{\text{прив}}}, \quad (6.7)$$

Час зупинки:

$$t_{\text{см}} = \frac{\omega_0}{|\alpha|}, \quad (6.8)$$

де  $\omega_0$  - швидкість у момент відключення.

Побудова графіків:

- Для пуску будують залежності  $\omega(t)$  та  $I(t)$  за вказаними формулами, визначаючи характерні точки:  $t=0$ ,  $t=\tau_{ем}$ ,  $t=2\tau_{ем}$ ,  $t=3\tau_{ем}$ ,  $\omega_{\infty}$ ,  $I_{\infty}$ .
- Для гальмування будують пряму лінію  $\omega(t)$ , яка лінійно знижується від  $\omega_0$  до нуля за час  $t_{ст}$ .

## 6.2. Завдання

Електропривод з двигуном постійного струму з незалежним збудженням приводить у рух вантажопідйомну лебідку (див. рис. 6.1). Після відключення двигуна від мережі система буде вільно гальмувати (без електричного гальмування). До моменту відключення двигун працював на природній механічній характеристиці (тобто на встановленому режимі з номінальною швидкістю і потужністю під навантаженням).

Необхідно:

1. Визначити час, через який швидкість знизиться до нуля, якщо двигун відключається від мережі. До моменту вимкнення двигун працював на природній механічній характеристиці.
2. Використовуючи подані вихідні дані, оцінити час перехідного процесу пуску електропривода та побудувати графіки зміни швидкості і струму якоря у часі. Для обмеження пускового струму та моменту двигуна в ланцюг якоря вмикається додатковий опір.

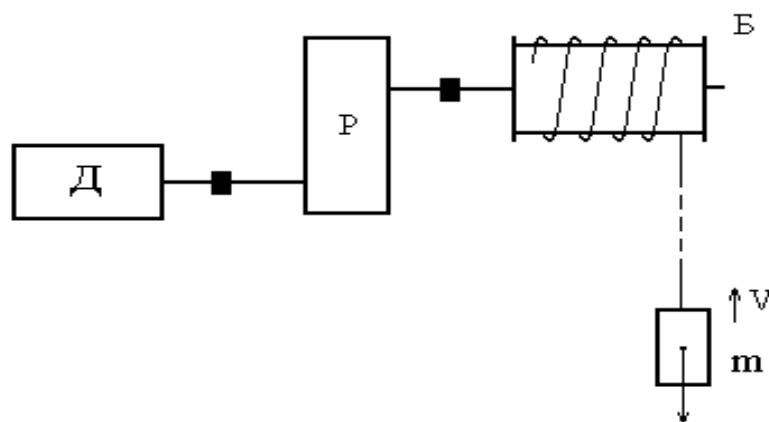


Рис. 6.1 – Кінематична схема електроприводу вантажопідйомної лебідки: Д - двигун; Р - редуктор; Б - барабан

### 6.3. Приклад виконання практичного завдання

**Завдання:** Електропривод з двигуном постійного струму з незалежним збудженням приводить у рух вантажопідйомну лебідку (див. рис. 9.4). Знайти час, через який швидкість знизиться до нуля, якщо двигун відключається від мережі. До вимкнення двигун працював на природній механічній характеристиці.

Дані до розрахунку:  $P_H = 37$  кВт;  $U_H = 220$  В;  $I_H = 192$  А;  $n_H = 575$  об/хв;  $J_{дв} = 2$  кг·м<sup>2</sup>; маса вантажу  $m_r = 1000$  кг; передавальне число редуктора  $P_{ip} = 6.4$ ; маса барабана  $B_{тб} = 300$  кг; радіус барабана  $R_б = 0,3$  м; ККД редуктора  $\eta_p = 0,89$  механічні зв'язки вважатимуться абсолютно жорсткими.

Шуканий час визначимо з рівняння руху електроприводу, підставивши до нього  $\omega_{кон} = 0$  та  $M = 0$ :

$$t_{n.n} = J_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_{нач}}{M_c}, \quad (6.9)$$

Початкова швидкість двигуна виходить із рівняння природної механічної характеристики при  $M = M_c$ :

$$\omega_{нач} = \omega_o - M_c / \beta_e, \quad (6.10)$$

Статичний момент, наведений до валу двигуна:

$$M_c = \frac{m_r \cdot g \cdot R_б}{i_p \cdot \eta_p} = \frac{1000 \cdot 9.81 \cdot 0.3}{6.4 \cdot 0.89} = 516,7 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

Опір якоря двигуна обчислимо за наближеною формулою:

$$\begin{aligned} R_{я} &\approx 0,5 \cdot (1 - \eta_n) \cdot R_n = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{P_n}{U_n \cdot I_n}\right) \cdot \frac{U_n}{I_n} = \\ &+ 0,5 \cdot \left(1 - \frac{37000}{220 \cdot 192}\right) \cdot \frac{220}{192} = 0,071 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Коефіцієнт ЕРС двигуна за номінального потоку

$$k_e = c \cdot \Phi = \frac{U - I \cdot R_{ш}}{\omega} = \frac{220 - 192 \cdot 0,071}{60,2} = 3,43,$$

$$\text{де } \omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 575}{30} = 60,2 \text{ с}^{-1}.$$

Модуль жорсткості природної механічної характеристики

$$\beta_e = \frac{(c \cdot \Phi)^2}{R_{III}} = \frac{3,43^2}{0,071} = 165,7.$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна

$$\omega_o = \frac{U}{c_n \cdot \Phi} = \frac{220}{3,43} = 64,1 \text{ c}^{-1}.$$

Початкова швидкість при знайдених параметрах двигуна становитиме

$$\omega_{нач} = 64,1 - \frac{516,7}{165,7} = 61 \text{ c}^{-1}.$$

Сумарний наведений момент інерції приводу

$$J_{\Sigma} = \delta \cdot J_{\partial\partial} + \frac{J_{\partial}}{i_p^2} + m_r \cdot \rho^2 = 1,15 \cdot 2 + \frac{13,5}{6,4^2} + 1000 \cdot 0,047^2 = 4,83 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

де  $\delta = 1,1 - 1,2$  - коефіцієнт, що враховує інерцію передачі;  
 $J_{\partial} = m_{\partial} \cdot R_{\partial}^2 / 2 = 300 \cdot 0,3^2 / 2 = 13,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  - момент інерції барабана;  
 $\rho = R_{\partial} / i_p = 0,3 / 6,4 = 0,047 \text{ м}$  - радіус приведення мас, що рухаються поступально, до обертального руху.

Час зниження швидкості до нуля після відключення двигуна становитиме

$$t_{nn} = \frac{4,83 \cdot 61}{516,7} = 0,57 \text{ с}.$$

Використовуючи дані попереднього розрахунку, необхідно оцінити час перехідного процесу пуску електроприводу та побудувати графіки перехідного процесу. Для обмеження пускового струму та моменту двигуна в ланцюг якоря вводиться додатковий опір.

Пусковий момент двигуна приймаємо рівним подвійному значенню номінального моменту

$$M_n = 2 \cdot M_{н} = 2 \cdot c \cdot \Phi_{н} \cdot I_{н} = 2 \cdot 3,43 \cdot 192 = 1317 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

Повний опір ланцюга якоря при обмеженні пускового струму

$$R_{я\Sigma} = \frac{U_{н}}{2 \cdot I_{н}} = \frac{220}{2 \cdot 192} = 0,573 \text{ Ом},$$



Модуль жорсткості пускової механічної характеристики

$$\beta_n = \frac{(c \cdot \Phi_n)^2}{R_{\Sigma}} = \frac{3,43^2}{0,573} = 20,5 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}.$$

Електромеханічна постійна часу електроприводу під час пуску

$$T_{mn} = \frac{J_{\Sigma}}{\beta_n} = \frac{4,83}{20,5} = 0,24 \text{ с},$$

Кінцеве значення швидкості при пуску

$$\omega_{\text{кон}} = \omega_o - \frac{M_e}{\beta_n} = 64,1 - \frac{172}{20,5} = 55,7 \text{ с}^{-1},$$

Час пуску електроприводу

$$t_n = T_{mn} \cdot \ln \frac{\omega_{\text{кон}}}{0,05 \cdot \omega_{\text{кон}}} \approx 3 \cdot T_{mn} = 0,72 \text{ с}$$

Криві перехідного процесу розраховуємо за  $\omega_{\text{нач}} = 0$  за формулами:

$$\omega = 55,7 \cdot (1 - e^{-t/0,24}) ;$$

$$M = 172 \cdot (1 - e^{-t/0,24}) + 1317 \cdot e^{-t/0,24} .$$

Графіки перехідного процесу запуску електроприводу побудовані на рис.

6.2.

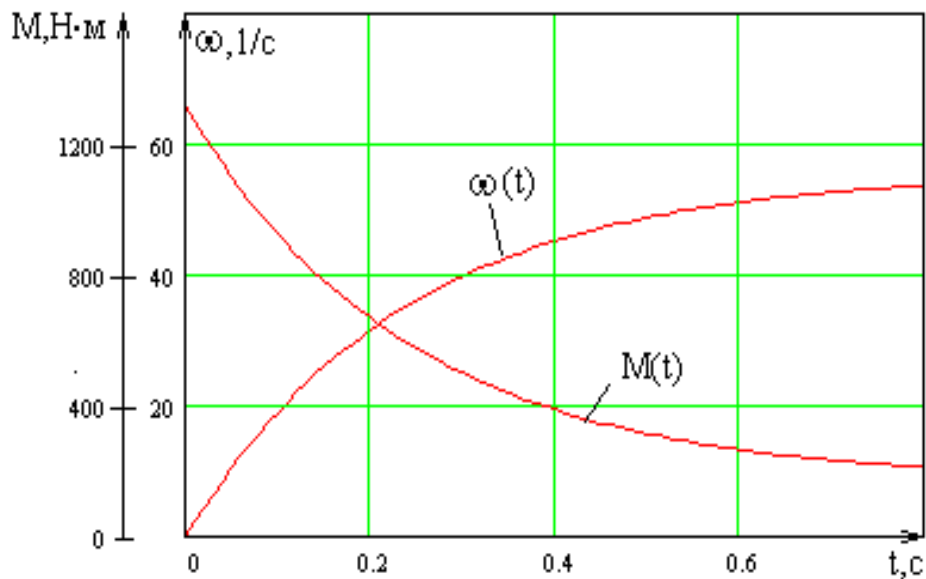


Рис. 6.2 – Перехідний процес пуску електроприводу

Зробити висновок відповідно до впливу параметрів двигуна на кінцевий результат розрахунків.

#### 6.4. Контрольні питання

1. Які основні відмінності двигуна постійного струму з послідовним збудженням від двигуна з паралельним збудженням?
2. Чому механічна характеристика двигуна з послідовним збудженням є нелінійною?
3. Що таке момент інерції приведений до валу двигуна і як він розраховується?
4. Як визначити сумарний момент інерції приводу з урахуванням барабана та вантажу?
5. За якою формулою розраховується статичний момент навантаження, приведений до валу двигуна?
6. Як знаходиться опір якоря двигуна?
7. Як визначити час зупинки двигуна після його відключення від мережі?
8. Як обчислити повний опір кола якоря при введенні додаткового опору?
9. Яким чином будується графік зміни швидкості під час пуску?
10. Як змінюється струм якоря у часі під час пуску двигуна?
11. Яке практичне значення має визначення часу пуску і зупинки двигуна?
12. У яких випадках використовується штучне гальмування двигуна постійного струму?
13. Чому під час пуску вантажопідійомних механізмів важливо обмежувати пусковий струм?
14. Як впливає зменшення ККД редуктора на розрахунки?
15. Чому швидкість двигуна при гальмуванні знижується лінійно, а при пуску – експоненційно?
16. Які практичні висновки можна зробити з побудованих графіків  $\omega(t)$  та  $I(t)$ ?

Таблиця 6.1 – Вихідні данні до практичної роботи №6

| Вар. | $P_N$ (кВт) | $n_N$ (об/хв) | $J_{дв}$ (кг·м <sup>2</sup> ) | $m_g$ (кг) | $i_p$ | $m_b$ (кг) | $R_b$ (м) | $\eta_p$ |
|------|-------------|---------------|-------------------------------|------------|-------|------------|-----------|----------|
| 1    | 37          | 575           | 2,00                          | 1000       | 6.4   | 300        | 0.30      | 0.89     |
| 2    | 37          | 575           | 1,50                          | 800        | 5.0   | 250        | 0.25      | 0.88     |
| 3    | 30          | 600           | 2,50                          | 1200       | 8.0   | 350        | 0.35      | 0.90     |
| 4    | 40          | 540           | 3,00                          | 900        | 6.0   | 280        | 0.28      | 0.87     |
| 5    | 37          | 575           | 2,00                          | 1500       | 6.4   | 300        | 0.30      | 0.89     |
| 6    | 25          | 720           | 1,20                          | 700        | 4.5   | 200        | 0.20      | 0.85     |
| 7    | 50          | 480           | 4,00                          | 2000       | 10.0  | 500        | 0.40      | 0.92     |
| 8    | 37          | 575           | 2,00                          | 500        | 6.4   | 150        | 0.30      | 0.89     |
| 9    | 37          | 650           | 1,80                          | 1100       | 7.0   | 320        | 0.32      | 0.88     |
| 10   | 45          | 520           | 2,20                          | 1300       | 6.8   | 400        | 0.33      | 0.90     |
| 11   | 40          | 600           | 2.10                          | 1100       | 6.8   | 320        | 0.32      | 0.90     |
| 12   | 45          | 590           | 2.30                          | 1200       | 7.0   | 350        | 0.33      | 0.91     |
| 13   | 50          | 620           | 2.50                          | 1300       | 7.2   | 370        | 0.34      | 0.88     |
| 14   | 55          | 640           | 2.70                          | 1400       | 7.5   | 400        | 0.35      | 0.92     |
| 15   | 60          | 660           | 3.00                          | 1500       | 8.0   | 420        | 0.36      | 0.93     |
| 16   | 65          | 700           | 3.20                          | 1600       | 8.2   | 450        | 0.38      | 0.91     |
| 17   | 70          | 720           | 3.40                          | 1700       | 8.5   | 470        | 0.39      | 0.92     |
| 18   | 75          | 740           | 3.60                          | 1800       | 9.0   | 500        | 0.40      | 0.94     |
| 19   | 80          | 760           | 3.80                          | 1900       | 9.5   | 520        | 0.42      | 0.95     |
| 20   | 85          | 780           | 4.00                          | 2000       | 10.0  | 550        | 0.43      | 0.93     |
| 21   | 90          | 800           | 4.20                          | 2100       | 10.2  | 570        | 0.44      | 0.92     |
| 22   | 95          | 820           | 4.40                          | 2200       | 10.5  | 600        | 0.45      | 0.91     |
| 23   | 100         | 840           | 4.60                          | 2300       | 11.0  | 620        | 0.47      | 0.94     |
| 24   | 110         | 860           | 4.80                          | 2400       | 11.5  | 650        | 0.48      | 0.95     |

| Вар. | $P_N$ (кВт) | $n_N$ (об/хв) | $J_{дв}$ (кг·м <sup>2</sup> ) | $m_g$ (кг) | $i_p$ | $m_b$ (кг) | $R_b$ (м) | $\eta_p$ |
|------|-------------|---------------|-------------------------------|------------|-------|------------|-----------|----------|
| 25   | 120         | 880           | 5.00                          | 2500       | 12.0  | 670        | 0.50      | 0.96     |
| 26   | 130         | 900           | 5.20                          | 2600       | 12.5  | 700        | 0.52      | 0.94     |
| 27   | 140         | 920           | 5.40                          | 2700       | 13.0  | 730        | 0.54      | 0.93     |
| 28   | 150         | 940           | 5.60                          | 2800       | 13.5  | 750        | 0.55      | 0.92     |
| 29   | 160         | 960           | 5.80                          | 3000       | 14.0  | 800        | 0.57      | 0.95     |

## ПРАКТИЧНА РОБОТА №7

**Тема:** Розрахунок параметрів та характеристик асинхронного двигуна

**Мета:** набути практичних навичок проведення розрахунку основних параметрів асинхронного двигуна.

### 7.1. Теоретичні відомості

Асинхронний двигун (АД) є найпоширенішим електричним двигуном у промисловості завдяки простій конструкції, надійності та відносно низькій вартості. Основним елементом АД є статор з трифазною обмоткою та ротор, що може бути короткозамкненим («біляче колесо») або фазним. Принцип роботи двигуна ґрунтується на явищі обертального магнітного поля, яке створюється трифазною системою струмів у статорі. Це поле індукуює струми в обмотці ротора, які, взаємодіючи з магнітним полем статора, створюють електромагнітний момент.

Обмотки статора можуть з'єднуватися за схемою «зірка» (Y) або «трикутник» ( $\Delta$ ).

- При з'єднанні за схемою «зірка» фазна напруга обмотки менша за лінійну в  $\sqrt{3}$  рази:

$$U = \frac{U_s}{\sqrt{3}}, \quad (7.1)$$

де  $U$  - лінійна напруга мережі,  $U_s$  - фазна напруга.

- При з'єднанні за схемою «трикутник» фазна і лінійна напруги рівні:

$$U_s = U, \quad (7.2)$$

Обертання магнітного поля статора характеризується синхронною частотою:

$$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{p}, \quad (7.3)$$

де  $f$  - частота живильної мережі,  $p$  - кількість пар полюсів статора.

Ротор обертається зі швидкістю, дещо меншою за синхронну. Відносна різниця визначається ковзанням:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}, \quad (7.4)$$

де  $n$  - частота обертання ротора.

Для номінального режиму ковзання  $s_N$  становить 0,02–0,08. Номінальна швидкість визначається як:

$$n_N = n_s \cdot (1 - s_N), \quad (7.5)$$

Максимальний момент АД досягається при критичному ковзанні  $s_{cr}$ . Для його визначення застосовують формулу Клосса, яка встановлює залежність моменту від ковзання:

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{2 \cdot \frac{s}{s_{cr}}}{1 + \left( \frac{s}{s_{cr}} \right)^2}, \quad (7.6)$$

При номінальному моменті та ковзанні можна визначити  $s_{cr}$ , розв'язавши відповідне рівняння. Критична частота обертання ротора:

$$n_{cr} = n_s \cdot (1 - s_{cr}), \quad (7.7)$$

Номінальний струм визначають через активну потужність:

$$P_N = \sqrt{3} \cdot U \cdot \eta_N \cdot \cos \varphi_{sN}, \quad (7.8)$$

Звідки

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \eta_N \cdot \cos \varphi_{sN}}, \quad (7.9)$$

Пусковий струм оцінюється як кратний номінальному:

$$I_{start} = k_{I1} \cdot I_N, \quad (7.10)$$

де  $k_{I1}$  - коефіцієнт кратності пускового струму (зазвичай 4–7).

Енергетичні характеристики:

- ККД ( $\eta$ ) показує відношення корисної потужності на валу до спожитої з мережі.
- Коефіцієнт потужності ( $\cos \varphi$ ) характеризує зсув фаз між струмом і напругою.

- Перевантажувальна здатність за моментом ( $kM_m$ ) відображає, у скільки разів максимальний момент перевищує номінальний.

Таким чином, знання основних параметрів і характеристик асинхронного двигуна дає можливість розраховувати його робочі режими, визначати оптимальні умови експлуатації та аналізувати вплив зовнішніх факторів на роботу машини.

## 7.2. Завдання

Зробити розрахунок параметрів та характеристик асинхронного двигуна за даними таблиці 7.1. Відповідно обраного варіанту необхідно виконати наступне:

1. Визначити співвідношення між фазною та лінійною напругою АД в залежності від схеми з'єднання обмоток.
2. Визначити синхронну частоту обертання магнітного поля статора  $n_s$ , номінальну  $n_N$  і критичну  $n_{cr}$  частоти обертання ротора.
3. Визначити номінальні  $I_N$  та пускові струми обмотки статора  $I_1$ .

Електричну схему трифазного асинхронного двигуна зображено на рис. 7.1. Номінальна лінійна напруга  $U_N$  цих двигунів складає 220/380 В при частоті  $f = 50$  Гц. Перше значення напруги відповідає схемі «трикутник» (рис. 7.1, б), у цьому випадку номінальні лінійна і фазна напруги однакові, тобто  $U_{sN} = U_N$ . Друге значення напруги відповідає схемі «зірка» (рис. 7.1, а), у цьому випадку номінальна лінійна і фазна напруга пов'язані співвідношенням  $U_{sN} = U_N / \sqrt{3}$ .

В табл. 7.1 позначено:  $P_N$  - номінальна потужність;  $p$  - кількість пар полюсів, утворюваних обмоткою статора;  $s_N$  - номінальне ковзання;  $\eta_N$  - номінальний ККД;  $k_{Mm} = M_{max}/M_N$  - перевантажувальна здатність з обертового моменту ( $M_{max}$ ,  $M_N$  - його максимальне і номінальне значення);  $k_{I1} = I_1/I_N$  - кратність пускового струму ( $I_1$ ,  $I_N$  - пускове і номінальне значення струму, споживаного з мережі);  $\cos\phi_{sN}$  - номінальний коефіцієнт потужності. Також задано схему з'єднання обмотки статора (Y - «зірка», рис. 7.1 ,а,  $\Delta$  - «трикутник», рис. 7.1 ,б).

## 7.3. Приклад виконання практичного завдання

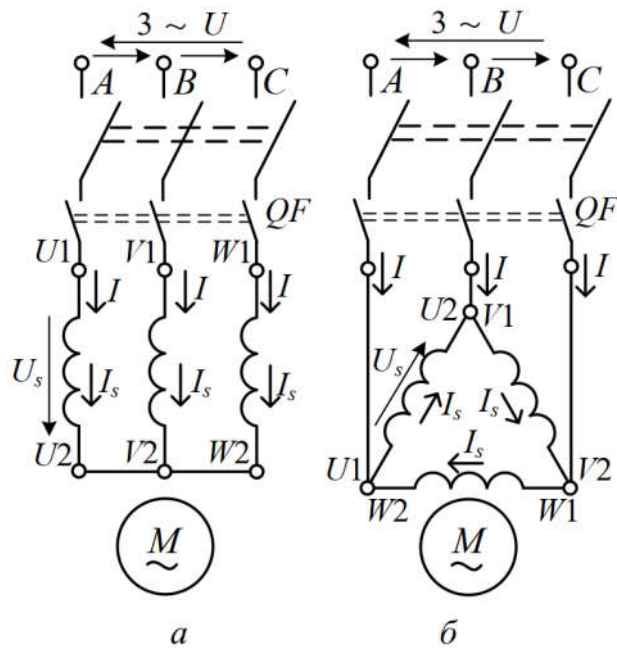


Рис. 7.1 – Схема вмикання трифазного асинхронного двигуна

Трифазний асинхронний двигун має такі дані: номінальна напруга 220/380 В при частоті  $f_s = 50$  Гц; номінальне ковзання  $s_N = 0,05$ ; кількість пар полюсів  $p = 6$ ; перевантажна здатність з обертового моменту  $k_{Mm} = 1,8$ . Схема з'єднання обмоток статора - зірка (рис. 7.1,а). Вибрати лінійну напругу живильної мережі  $U_{nw}$  і визначити синхронну частоту обертання поля статора  $n_s$ , номінальну  $n_N$  і критичну  $n_{cr}$  частоти обертання ротора.

1. При з'єднанні обмоток статора зіркою, напруга буде рівна:

$$U = \sqrt{3} \cdot U_s,$$

де  $U$  і  $U_s$  - відповідно лінійна та фазна напруги обмотки статора. Тому лінійна напруга мережі  $U_{nw} = U = 380$  В.

2. Синхронна частота обертання поля статора:

$$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{p} = \frac{60 \cdot 50}{6} = 500 \text{ об/хв.},$$

3. Номінальна частота обертання ротора:

$$n_N = n_s \cdot (1 - s_N) = 500 \cdot (1 - 0,05) = 475 \text{ об/хв.},$$

4. Щоб визначити критичну частоту обертання ротора  $n_{cr} = n_s(1 - s_{cr})$  необхідно знати критичне ковзання двигуна  $s_{cr}$ . Це таке значення ковзання  $s$ , при



якому обертальний момент  $M$  досягає максимального значення  $M_{max}$ . Для визначення  $s_{cr}$  використовуємо відому формулу Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_{max}}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}},$$

і номінальний режим роботи двигуна, при якому номінальному значенню ковзання відповідає номінальне значення обертального моменту:

$$M = \frac{2 \cdot M_{max}}{\frac{s_N}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s_N}},$$

Зважаючи на те, що перевантажна здатність з обертального моменту  $k_{Mm} = \frac{M_{max}}{M_N}$ , з попередньої формули маємо:

$$\frac{s_{cr}}{s_N} + \frac{s_N}{s_{cr}} = 2 \cdot k_{Mm},$$

звідки отримуємо квадратне рівняння

$$s_{cr}^2 - 2 \cdot k_{Mm} \cdot s_N \cdot s_{cr} + s_N^2 = 0,$$

розв'язання якого дає вираз та значення критичного ковзання:

$$s_{cr} = s_N \left( k_{Mm} + \sqrt{k_{Mm}^2 - 1} \right) = 0,05 \left( 1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1} \right) = 0,165$$

5. Таким чином, критична частота обертання ротора:

$$n_{cr} = n_s \cdot (1 - s_{cr}) = 500 \cdot (1 - 0,165) = 417,5 \text{ об/хв.},$$

Для розрахуноу пускових струмів асинхронного двигуна необхідно виконати наступне:

1. При з'єднанні обмотки статора трикутником  $U = U_s$ , лінійна напруга АД дорівнює фазній, звідси:  $U_{nw} = U = U_s = 220 \text{ В}$ .

2. Зважаючи на те, що потужність, яка споживається двигуном з мережі, має вираз, з одного боку

$$P_{in.nom} = \frac{P_N}{\eta_N},$$

а з іншого -  $P_{in.nom} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi_{sN}$ , отримуємо номінальні лінійний та фазний струми обмотки статора двигуна

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \eta_N \cdot \cos \varphi_{sN}} = \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 0,88} = 73 \text{ А},$$

$$I_{sN} = \frac{I_N}{\sqrt{3}} = \frac{73}{\sqrt{3}} = 41,7 \text{ А},$$

3. Пусковий лінійний струм статора обмотки двигуна:

$$I_{start} = k_{I1} \cdot I_N = 5,5 \cdot 73 = 401 \text{ А},$$

4. Фазний струм статора обмотки двигуна:

$$I_{start} = k_{I1} \cdot I_{sN} = 5,5 \cdot 42 = 229 \text{ А},$$

5. Зробити висновок відповідно до впливу параметрів двигуна на кінцевий результат розрахунків.

#### 7.4. Контрольні питання

1. Чим відрізняється схема з'єднання обмоток статора «зірка» від «трикутника»?
2. Як пов'язані фазна та лінійна напруги при різних схемах з'єднання?
3. Від чого залежить синхронна частота обертання магнітного поля статора?
4. Що таке ковзання асинхронного двигуна і який його фізичний зміст?
5. Як визначається номінальна частота обертання ротора?
6. Яке значення має критичне ковзання і що воно характеризує?
7. У чому полягає суть формули Клосса?
8. Як визначити критичну частоту обертання ротора?
9. Що таке номінальний струм статора і за якою формулою він розраховується?

10. Як визначається пусковий струм і чому він значно перевищує номінальний?
11. Від яких параметрів залежить коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна?
12. Що таке коефіцієнт потужності та яку роль він відіграє в роботі двигуна?
13. Як перевантажувальна здатність за моментом впливає на експлуатаційні характеристики двигуна?
14. Які фактори знижують енергоефективність роботи асинхронного двигуна?
15. Як впливає кількість пар полюсів на синхронну швидкість двигуна?
16. У яких випадках доцільно застосовувати з'єднання обмоток статора «зірка», а коли – «трикутник»?

Таблиця 7.1 – Вихідні данні до практичної роботи №7

| № варіанту | Схема обмотки | $P_N$ | $p$ | $s_N$ | $\eta_N$ | $k_{Mm}$ | $kI_1$ | $\cos \varphi_{sN}$ |
|------------|---------------|-------|-----|-------|----------|----------|--------|---------------------|
|            |               | кВт   | —   | —     | —        | —        | —      | —                   |
| 1          | $\Delta$      | 0,09  | 1   | 0,086 | 0,600    | 2,2      | 5,0    | 0,700               |
| 2          | Y             | 0,12  | 1   | 0,097 | 0,630    | 2,2      | 5,0    | 0,700               |
| 3          | $\Delta$      | 0,18  | 1   | 0,080 | 0,660    | 2,2      | 5,0    | 0,760               |
| 4          | Y             | 0,25  | 1   | 0,080 | 0,680    | 2,2      | 5,0    | 0,770               |
| 5          | $\Delta$      | 0,37  | 1   | 0,083 | 0,700    | 2,2      | 5,0    | 0,860               |
| 6          | Y             | 0,55  | 1   | 0,085 | 0,730    | 2,2      | 5,0    | 0,860               |
| 7          | $\Delta$      | 0,75  | 1   | 0,080 | 0,770    | 2,2      | 5,5    | 0,870               |
| 8          | Y             | 1     | 1   | 0,065 | 0,720    | 2,2      | 5,5    | 0,870               |
| 9          | $\Delta$      | 1,1   | 1   | 0,075 | 0,775    | 2,2      | 5,5    | 0,870               |
| 10         | Y             | 1,5   | 1   | 0,072 | 0,810    | 2,2      | 6,5    | 0,850               |
| 11         | $\Delta$      | 2,2   | 1   | 0,069 | 0,830    | 2,2      | 6,5    | 0,870               |

|    |   |      |   |       |       |     |     |       |
|----|---|------|---|-------|-------|-----|-----|-------|
| 12 | Y | 3    | 1 | 0,067 | 0,845 | 2,2 | 6,5 | 0,880 |
| 13 | Δ | 4    | 1 | 0,065 | 0,865 | 2,2 | 7,5 | 0,890 |
| 14 | Y | 5,5  | 1 | 0,064 | 0,875 | 2,2 | 7,5 | 0,910 |
| 15 | Δ | 11   | 1 | 0,050 | 0,840 | 2,4 | 7,5 | 0,890 |
| 16 | Y | 0,09 | 2 | 0,086 | 0,550 | 2,2 | 5,0 | 0,600 |
| 17 | Δ | 0,12 | 2 | 0,080 | 0,630 | 2,2 | 5,0 | 0,660 |
| 18 | Y | 0,18 | 2 | 0,087 | 0,640 | 2,2 | 5,0 | 0,640 |
| 19 | Δ | 0,25 | 2 | 0,080 | 0,680 | 2,2 | 5,0 | 0,650 |
| 20 | Y | 0,37 | 2 | 0,090 | 0,680 | 2,2 | 5,0 | 0,690 |
| 21 | Δ | 0,55 | 2 | 0,087 | 0,705 | 2,2 | 4,5 | 0,700 |
| 22 | Y | 0,75 | 2 | 0,087 | 0,720 | 2,2 | 4,5 | 0,730 |
| 23 | Δ | 1,1  | 2 | 0,067 | 0,750 | 2,2 | 5,0 | 0,810 |
| 24 | Y | 1,5  | 2 | 0,067 | 0,770 | 2,2 | 5,0 | 0,830 |
| 25 | Δ | 2,2  | 2 | 0,066 | 0,800 | 2,2 | 6,0 | 0,830 |
| 26 | Y | 3    | 2 | 0,066 | 0,820 | 2,2 | 6,5 | 0,830 |
| 27 | Δ | 4    | 2 | 0,065 | 0,840 | 2,2 | 6,0 | 0,840 |
| 28 | Y | 5,5  | 2 | 0,065 | 0,855 | 2,2 | 7,0 | 0,860 |
| 29 | Δ | 7,5  | 2 | 0,064 | 0,875 | 2,2 | 7,5 | 0,860 |
| 30 | Y | 11   | 2 | 0,060 | 0,875 | 2,4 | 7,5 | 0,870 |

## ПРАКТИЧНА РОБОТА № 8

**Тема:** Розрахунок природної та штучної механічної характеристики асинхронного двигуна.

**Мета:** набути практичних навичок проведення розрахунку та побудови механічних характеристик асинхронного двигуна.

### 8.1. Теоретичні відомості

Природна механічна характеристика – це залежність між обертовим моментом і швидкістю ротора при номінальній напрузі живлення та номінальних параметрах двигуна. Вона визначає реальний робочий режим машини без застосування додаткових засобів регулювання. Такі характеристики відзначаються малим ковзанням у робочій зоні, високим коефіцієнтом корисної дії та стабільністю швидкості при зміні навантаження.

Штучні механічні характеристики отримуються у випадках, коли на двигун діють спеціальні умови, що змінюють його електромагнітні параметри:

- При зниженні напруги живлення максимальний момент зменшується пропорційно квадрату напруги, а критичне ковзання залишається незмінним. Це призводить до зниження навантажувальної здатності двигуна та погіршення пускових властивостей.
- При збільшенні опору ротора (у фазних двигунах за допомогою додаткових резисторів) критичне ковзання зростає, що дозволяє підвищити пусковий момент. Проте швидкість у сталому режимі стає нижчою, а втрати енергії у роторному колі зростають.
- При використанні перетворювачів частоти (частотне регулювання) синхронна швидкість  $n_s$  змінюється пропорційно частоті живлення, що дозволяє плавно регулювати оберти двигуна у широкому діапазоні, зберігаючи високу ефективність.

Природна механічна характеристика - це залежність між частотою обертання ротора  $n$  і електромагнітним моментом  $M$  при номінальній напрузі живлення  $U$  та паспортних параметрах двигуна. Вона визначається співвідношеннями:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}, \quad n = n_s (1 - s), \quad (8.1)$$

де  $s$  - ковзання,  $n_s$  - синхронна частота обертання (залежить від частоти живлення  $f$  та кількості пар полюсів  $p$ ).

Механічна характеристика описується рівнянням Клосса:

$$M(s) = M_{\max} \frac{2s_{cr}}{s^2 + s_{cr}^2}, \quad (8.2)$$

де  $M_{\max}$  - критичний момент,  $s_{cr}$  - критичне ковзання.

При цьому:

$$s_{cr} = \frac{R_r}{X_{\sigma k}}, \quad M_{\max} \propto U^2, \quad (8.3)$$

де  $R_r$  - активний опір ротора,  $X_{\sigma k}$  - індуктивний опір розсіювання.

Штучні механічні характеристики отримуються у випадках зміни параметрів двигуна чи умов живлення. Основні способи:

1. Зміна напруги живлення:

$$M_{\max}(k_U U) = k_U^2 M_{\max}(U), \quad s_{cr} = \text{const}, \quad (8.4)$$

При зниженні напруги  $U$  максимальний момент зменшується пропорційно  $U^2$ , а критичне ковзання не змінюється.

2. Збільшення опору ротора (у фазних двигунах):

$$s'_{cr} = \frac{R'_r}{X_{\sigma k}}, \quad M_{\max} = \text{const}, \quad (8.5)$$

Додавання резистора збільшує критичне ковзання, але величина критичного моменту не змінюється. Це покращує пускові властивості, але знижує швидкість у робочій зоні.

3. Зміна частоти живлення (частотне регулювання):

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad M \propto \frac{U^2}{f^2}, \quad (8.6)$$

Зменшення частоти  $f$  знижує синхронну швидкість і дозволяє плавно регулювати оберти. Щоб зберегти момент, напруга має змінюватися пропорційно частоті (закон  $U/f = \text{const}$ ).

Таким чином, природна характеристика відображає роботу двигуна у номінальному режимі, а штучні характеристики створюються для забезпечення потрібних умов пуску чи регулювання швидкості. Їхнє практичне застосування залежить від вимог електропривода - необхідності високого пускового моменту, плавного регулювання швидкості або стабільності роботи при зміні навантаження.

## 8.2. Завдання

Зробити розрахунок параметрів та характеристик асинхронного двигуна за даними таблиці 8.1.

Відповідно обраного варіанту необхідно розрахувати і побудувати в одній координатній системі три механічні характеристики – залежності частоти обертання ротора від обертового моменту  $n(M)$  за такими умовами:

а) природну механічну характеристику при напрузі мережі  $U_{nw} = 380$  В, а також визначити з неї діапазон частот обертання ротора, при яких можлива стійка робота двигуна;

б) штучну механічну характеристику при зниженій напрузі живильної мережі на 10 %, тобто при  $U_{nw} = 0,9 \cdot U$ ;

в) штучну механічну характеристику при номінальній напрузі  $U_N$ , але при умові, що сумарний активний опір у кожній фазі обмотки ротора став у двічі більшим, ніж у двигуна, для якого розраховані попередні характеристики, тобто  $R_r + R_{rr} = 2 \cdot R_r$ : це можливо, якщо б цей двигун був двигуном з фазним ротором (рис. 8.1) і тоді у фазні обмотки ротора можна було б увімкнути регулювальні реостати з опорами  $R_{rr}$ , які дорівнюють  $R_r$ , індуктивний опір фаз обмотки нерухомого ротора  $X_{\sigma rk}$  не змінюється.

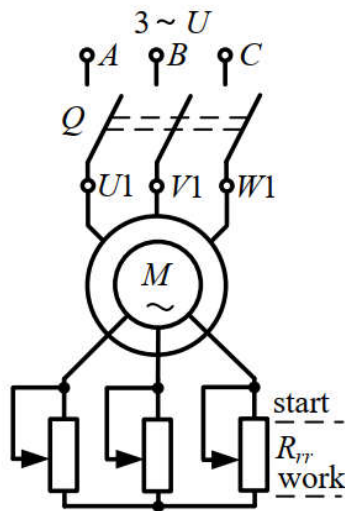


Рис. 8.1 – Схема трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором

Електричну схему трифазного асинхронного двигуна зображено на рис. 8.2. Номінальна лінійна напруга  $U_N$  цих двигунів складає 220/380 В при частоті  $f = 50$  Гц. Перше значення напруги відповідає схемі «трикутник» (рис. 8.2, б), у цьому випадку номінальні лінійна і фазна напруги однакові, тобто  $U_{sN} = U_N$ . Друге значення напруги відповідає схемі «зірка» (рис. 8.2, а), у цьому випадку номінальна лінійна і фазна напруга пов'язані співвідношенням  $U_{sN} = U_N / \sqrt{3}$ .

В табл. 8.1 позначено:  $P_N$  - номінальна потужність;  $p$  - кількість пар полюсів, утворюваних обмоткою статора;  $s_N$  - номінальне ковзання;  $\eta_N$  - номінальний ККД;  $k_{Mm} = M_{max}/M_N$  - перевантажувальна здатність з обертового моменту ( $M_{max}$ ,  $M_N$  - його максимальне і номінальне значення);  $k_L = I_1/I_N$  - кратність пускового струму ( $I_1$ ,  $I_N$  - пускове і номінальне значення струму, споживаного з мережі);  $\cos\varphi_{sN}$  - номінальний коефіцієнт потужності. Також задано схему з'єднання обмотки статора (Y - «зірка», рис. 8.2 ,а,  $\Delta$  - «трикутник», рис. 8.2 ,б).

### 8.3. Приклад виконання практичного завдання



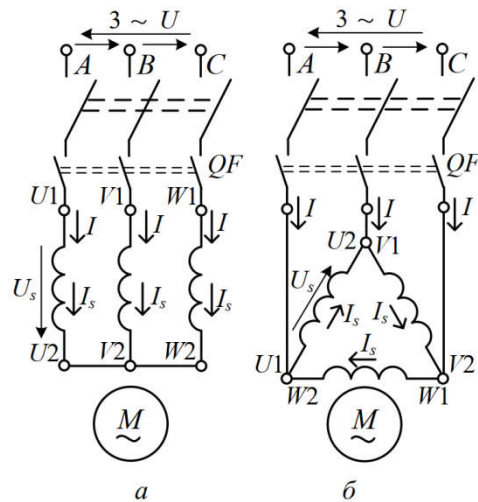


Рис. 8.2 – Схема вмикання трифазного асинхронного двигуна

### Завдання:

Трифазний асинхронний двигун має такі дані у номінальному режимі: потужність на валу  $P_N = 11$  кВт; частота обертання магнітного поля статора  $n_s = 1000$  об/хв.; ковзання ротора  $s_N = 0,06$ . Перевантажна здатність з обертового моменту  $k_{Mm} = 2,5$ . Розрахувати і побудувати в одній координатній системі три механічні характеристики – залежності частоти обертання ротора від обертового моменту  $n(M)$  за такими умовами:

1) природну механічну характеристику при напрузі мережі  $U_{nw} = 380$  В, а також визначити з неї діапазон частот обертання ротора, при яких можлива стійка робота двигуна;

2) штучну механічну характеристику при зниженій напрузі живильної мережі на 10 %, тобто при  $U_{nw} = 0,9 \cdot U$ ;

3) штучну механічну характеристику при номінальній нарузі  $U_N$ , але при умові, що сумарний активний опір у кожній фазі обмотки ротора став у двічі більшим, ніж у двигуна, для якого розраховані попередні характеристики, тобто  $R_r + R_{rr} = 2 \cdot R_r$ : це можливо, якщо б цей двигун був двигуном з фазним ротором (рис. 8.1) і тоді у фазні обмотки ротора можна було б увімкнути регульовальні реостати з опорами  $R_{rr}$ , які дорівнюють  $R_r$ , індуктивний опір фаз обмотки нерухомого ротора  $X_{\sigma rk}$  не змінюється.

1. Номінальна частота обертання ротора двигуна:

$$n_N = n_S \cdot (1 - s_N) = 1000 \cdot (1 - 0,06) = 940 \text{ об/хв},$$

2. Критичне ковзання:

$$s_{cr} = s_N \cdot (k_{Mm} + \sqrt{k_{Mm}^2 - 1}) = 0,06 \cdot (2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1}) = 0,288,$$

3. Номінальний і максимальний обертальні моменти:

$$M_N = 9,55 \cdot \frac{P_N}{n_N} = 9,55 \cdot \frac{11,10^3}{940} = 112 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\max} = k_{Mm} \cdot M_N = 2,5 \cdot 112 = 280 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

4. Природну механічну характеристику  $n(M)$  при  $U=U_N$  отримуємо шляхом окремих розрахунків частоти обертання і обертального моменту на основі виразів, у які входить один аргумент – ковзання  $s$ :

$$n = n_S \cdot (1 - s) = 1500 \cdot (1 - s)$$

$$M = \frac{2 \cdot M_{\max}}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}} = \frac{2 \cdot 280}{\frac{s}{0,288} + \frac{0,288}{s}}$$

Тепер, щоб отримати природну механічну характеристику, достатньо задати ряд значень  $s$  від 0 до 1 і виконати розрахунки за наведеними формулами. Значення ковзання  $s$  для механічної характеристики вибирається таким же чином, як і у попередній практичній роботі. У тому числі, завжди треба робити розрахунок для значень ковзання  $s_N$  і  $s_{cr}$ .

Задаючись значеннями  $s$  від 0 до 1, необхідно визначити значення обертального моменту за формулою Клосса. При цьому зауважимо, що на частині залежності  $M(s)$ , яка відповідає стійким режимам роботи двигуна ( $0 \leq s \leq s_{cr}$ ), достатньо мати чотири точки при:

$$s = 0; \quad s = s_N; \quad s_N \leq s \leq s_{cr}; \quad s = s_{cr}.$$

На ділянці залежності  $M(s)$  з нестійкими режимами роботи двигуна ( $s_{cr} < s \leq 1$ ) можна задатися значеннями ковзання  $s$ : 0,3; 0,4; 0,6; 0,8; 1.

Результати розрахунку зведено до табл. 8.2.

Таблиця 8.2 - Дані розрахунку залежності  $M(s)$

|                              |   |            |     |               |     |     |     |     |     |
|------------------------------|---|------------|-----|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| $s$                          | 0 | $s_N=0,05$ | 0,1 | $s_{cr}=0,24$ | 0,3 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 |
| $M, \text{Н} \cdot \text{м}$ | 0 | 100        | 178 | 250           | 244 | 221 | 172 | 137 | 113 |

Результати розрахунку зведено до табл. 8.3, де ще додано значення,  $s_{cr} = 0,576$ , яке визначається далі для однієї з штучних характеристик.

За даними табл. 8.3 на рис. 8.3 зображено природну механічну характеристику  $n(M)$  при  $U_{nw} = U_N$ .

5. Щоб отримати штучну механічну характеристику при зниженні напруги живильної мережі на 10 %, тобто при  $U_{nw} = 0,9 \cdot U_N$ , скористаємось такими ж формулами, що і у попередньому випадку для природної механічної характеристики. Але при цьому треба враховувати те, що максимальний обертальний момент змінюється залежно від цієї напруги таким чином:

$$M'_{\max} = \left( \frac{U}{U_N} \right)^2 \cdot M_{\max} = 0,81 \cdot M_{\max} = 0,81 \cdot 280 = 227$$

Тобто штучну механічну характеристику при таких умовах визначаємо для тих же значень ковзання  $s$  і частоти обертання  $n$ , розраховуючи обертальний момент за формулою:

$$M = \frac{2 \cdot M'_{\max}}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}} = \frac{2 \cdot 227}{\frac{s}{0,288} + \frac{0,288}{s}}$$

(як відомо, значення  $s_{cr}$  не залежить від величини напруги живлення).

Результати розрахунків зведено до табл. 8.3.

Таблиця 8.3 - Дані для механічних характеристик асинхронного двигуна

|                                                       |      |      |     |     |       |     |       |     |     |     |
|-------------------------------------------------------|------|------|-----|-----|-------|-----|-------|-----|-----|-----|
| $s$                                                   | 0    | 0,06 | 0,1 | 0,2 | 0,288 | 0,4 | 0,576 | 0,6 | 0,8 | 1,0 |
| $n$ , об/хв                                           | 1000 | 940  | 900 | 800 | 712   | 600 | 434   | 400 | 200 | 0   |
| $M$ , Н·м при<br>$U_{nw} = U_N, R_{rr} = 0$           | 0    | 112  | 173 | 262 | 280   | 265 | 223   | 218 | 178 | 149 |
| $M$ , Н·м при<br>$U_{nw} = 0,9 \cdot U_N, R_{rr} = 0$ | 0    | 90   | 140 | 212 | 227   | 215 | 201   | 177 | 144 | 120 |
| $M$ , Н·м при<br>$U_{nw} = U_N, R_{rr} = R_r$         | 0    | 58   | 94  | 173 | 223   | 262 | 280   | 278 | 265 | 242 |

За її даними на рис. 8.3 зображено штучну механічну характеристику  $n(M)$  при  $U = 0,9 \cdot U_N$ . Ця і попередня механічні характеристики отримані при умові, що фазні обмотки ротора мають тільки свій активний опір  $R_r$ , тобто  $R_{rr} = 0$ . Щоб отримати штучну механічну характеристику при введенні у фази обмотки ротора регулювальних реостатів з опорами  $R_{rr} = R_r$ , скористаємось такими ж формулами, що і для природної механічної характеристики. Але при цьому треба враховувати те, що тепер змінюється критичне ковзання, яке взагалі визначається за відомою формулою:

$$s_{cr} = \frac{R_r}{X_{\sigma rk}}$$

де  $X_{\sigma rk}$  - реактивний опір розсіювання обмотки ротора у нерухомому стані.

Тому, при додаванні до  $R_r$  ще регулювального реостата з опором  $R_{rr} = R_r$  та з урахуванням, що індуктивний опір фази обмотки статора  $X_{\sigma rk}$  при цьому не змінюється, складемо пропорцію і отримуємо нове значення критичного ковзання для нової штучної механічної характеристики

$$s'_{cr} = \frac{R_r + R_{rr}}{R_r} \cdot s_{cr} = \frac{R_r + R_r}{R_r} \cdot s_{cr} = 2 \cdot s_{cr} = 2 \cdot 0,288 = 0,576$$

При цьому максимальний обертальний момент  $M_{max}$  не залежить від  $R_r$  та  $R_{rr}$  і зберігається таким, що і для природної механічної характеристики (його тепер буде отримано при новому значенні критичного ковзання  $s_{cr}$ ). Зауважимо, що ця штучна механічна характеристика розраховується при напрузі живлення  $U_{nw} = U_N$ .

Таким чином, штучну механічну характеристику при визначених умовах ( $R_{rr} = R_r$ ,  $U = U_N$ ) отримуємо для тих же значень ковзання  $s$  і частоти обертання  $n$ , що і в попередніх випадках, розраховуючи обертальний момент за модифікованою формулою:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\max}}{\frac{s}{s'_{cr}} + \frac{s'_{cr}}{s}} = \frac{2 \cdot 280}{\frac{s}{0,576} + \frac{0,576}{s}},$$

Результати розрахунків зведені до табл. 8.3. За її даними на рис. 8.3 зображено штучну механічну характеристику  $n(M)$  при  $U = U_N$  і  $R_{rr} = R_r$ .

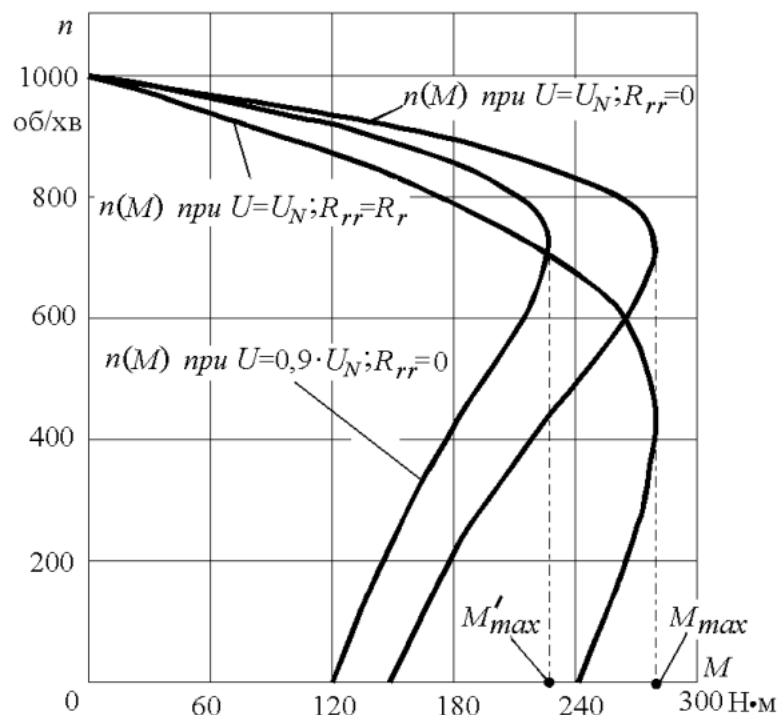


Рис. 8.3 – Сім'я механічних характеристик асинхронного двигуна

Зауважимо, що механічні характеристики на рис. 8.3 в зоні за критичною точкою є фактично тільки ілюстративними через неврахування явища витіснення струму в провідниках обмотки ротора при підвищеній частоті  $f_r = s \cdot f_s$  цього струму.

6. Зробити висновок відповідно до впливу параметрів двигуна на кінцевий результат розрахунків.

## 8.4. Контрольні питання

1. Що таке природна механічна характеристика асинхронного двигуна?
2. Як визначається синхронна частота обертання ротора?
3. Дайте визначення ковзання та наведіть його формулу.
4. Яке фізичне значення має ковзання у номінальному режимі?
5. Що таке критичне ковзання та від чого воно залежить?
6. Як змінюється максимальний момент двигуна при зміні напруги живлення?
7. Як впливає збільшення опору ротора на механічну характеристику?
8. Чим відрізняється природна характеристика від штучної?
9. Які основні способи отримання штучних характеристик асинхронного двигуна ви знаєте?
10. Чому при зменшенні напруги критичне ковзання не змінюється?
11. Як змінюється робоча швидкість двигуна при підключенні додаткового опору до ротора?
12. Чому у фазних асинхронних двигунах використовують реостати?
13. Як частота живлення впливає на синхронну швидкість двигуна?
14. У чому полягає закон  $U/f = \text{const}$  при частотному регулюванні?
15. Які переваги та недоліки має зниження напруги як метод отримання штучної характеристики?

Таблиця 8.1 – Вихідні данні до практичної роботи №8

| № варіанту | Схема обмотки | $P_N$ | $p$ | $s_N$ | $\eta_N$ | $k_{Mm}$ | $k_{I_1}$ | $\cos \varphi_{sN}$ |
|------------|---------------|-------|-----|-------|----------|----------|-----------|---------------------|
|            |               | кВт   | —   | —     | —        | —        | —         | —                   |
| 1          | $\Delta$      | 0,09  | 1   | 0,086 | 0,600    | 2,2      | 5,0       | 0,700               |
| 2          | Y             | 0,12  | 1   | 0,097 | 0,630    | 2,2      | 5,0       | 0,700               |
| 3          | $\Delta$      | 0,18  | 1   | 0,080 | 0,660    | 2,2      | 5,0       | 0,760               |
| 4          | Y             | 0,25  | 1   | 0,080 | 0,680    | 2,2      | 5,0       | 0,770               |
| 5          | $\Delta$      | 0,37  | 1   | 0,083 | 0,700    | 2,2      | 5,0       | 0,860               |

|    |   |      |   |       |       |     |     |       |
|----|---|------|---|-------|-------|-----|-----|-------|
| 6  | Y | 0,55 | 1 | 0,085 | 0,730 | 2,2 | 5,0 | 0,860 |
| 7  | Δ | 0,75 | 1 | 0,080 | 0,770 | 2,2 | 5,5 | 0,870 |
| 8  | Y | 1    | 1 | 0,065 | 0,720 | 2,2 | 5,5 | 0,870 |
| 9  | Δ | 1,1  | 1 | 0,075 | 0,775 | 2,2 | 5,5 | 0,870 |
| 10 | Y | 1,5  | 1 | 0,072 | 0,810 | 2,2 | 6,5 | 0,850 |
| 11 | Δ | 2,2  | 1 | 0,069 | 0,830 | 2,2 | 6,5 | 0,870 |
| 12 | Y | 3    | 1 | 0,067 | 0,845 | 2,2 | 6,5 | 0,880 |
| 13 | Δ | 4    | 1 | 0,065 | 0,865 | 2,2 | 7,5 | 0,890 |
| 14 | Y | 5,5  | 1 | 0,064 | 0,875 | 2,2 | 7,5 | 0,910 |
| 15 | Δ | 11   | 1 | 0,050 | 0,840 | 2,4 | 7,5 | 0,890 |
| 16 | Y | 0,09 | 2 | 0,086 | 0,550 | 2,2 | 5,0 | 0,600 |
| 17 | Δ | 0,12 | 2 | 0,080 | 0,630 | 2,2 | 5,0 | 0,660 |
| 18 | Y | 0,18 | 2 | 0,087 | 0,640 | 2,2 | 5,0 | 0,640 |
| 19 | Δ | 0,25 | 2 | 0,080 | 0,680 | 2,2 | 5,0 | 0,650 |
| 20 | Y | 0,37 | 2 | 0,090 | 0,680 | 2,2 | 5,0 | 0,690 |
| 21 | Δ | 0,55 | 2 | 0,087 | 0,705 | 2,2 | 4,5 | 0,700 |
| 22 | Y | 0,75 | 2 | 0,087 | 0,720 | 2,2 | 4,5 | 0,730 |
| 23 | Δ | 1,1  | 2 | 0,067 | 0,750 | 2,2 | 5,0 | 0,810 |
| 24 | Y | 1,5  | 2 | 0,067 | 0,770 | 2,2 | 5,0 | 0,830 |
| 25 | Δ | 2,2  | 2 | 0,066 | 0,800 | 2,2 | 6,0 | 0,830 |
| 26 | Y | 3    | 2 | 0,066 | 0,820 | 2,2 | 6,5 | 0,830 |
| 27 | Δ | 4    | 2 | 0,065 | 0,840 | 2,2 | 6,0 | 0,840 |
| 28 | Y | 5,5  | 2 | 0,065 | 0,855 | 2,2 | 7,0 | 0,860 |
| 29 | Δ | 7,5  | 2 | 0,064 | 0,875 | 2,2 | 7,5 | 0,860 |
| 30 | Y | 11   | 2 | 0,060 | 0,875 | 2,4 | 7,5 | 0,870 |

## ПРАКТИЧНА РОБОТА № 9

**Тема:** Дослідження природних та штучних механічних характеристик асинхронного двигуна з фазним ротором та розрахунок пускових опорів

**Мета:** набути практичних навичок розрахунку та побудови природних і штучних механічних характеристик асинхронного двигуна з фазним ротором, дослідити вплив додаткового опору та зміни напруги живлення на робочі характеристики двигуна, а також засвоїти методи визначення опорів пускового реостата аналітичним і наближеним графічним методами.

### 9.1. Теоретичні відомості

Асинхронний двигун з фазним ротором є однією з різновидностей трифазних електричних машин змінного струму, в якому до роторного кола можна підключати додатковий опір. Це дозволяє регулювати пускові та робочі характеристики двигуна, зокрема змінювати форму його механічної характеристики.

Механічна характеристика асинхронного двигуна – це залежність електромагнітного моменту МММ від частоти обертання ротора  $n$  або ковзання  $s$ . Для її визначення використовують уточнену формулу Клоса, яка враховує електричні параметри двигуна, опір статора і ротора, а також індуктивні опори.

Природна механічна характеристика відповідає режиму роботи двигуна при номінальній напрузі живлення та без додаткових опорів у роторному колі. Вона характеризується високою жорсткістю (невелика зміна швидкості при зміні навантаження) і використовується для аналізу номінальних параметрів роботи.

Для двигунів з фазним ротором можливе формування штучних механічних характеристик, які отримують у двох основних випадках:

1. Реостатна характеристика – формується при введенні додаткового опору у роторне коло. У цьому випадку критичний момент двигуна практично не змінюється, але критичне ковзання збільшується, а робоча частина характеристики



стає більш пологою. Це дозволяє зменшити пусковий струм і плавно регулювати швидкість у зоні малих обертів.

2. Характеристика при зниженій напрузі живлення – отримується при зменшенні фазної напруги на обмотці статора. Критичний момент при цьому зменшується пропорційно квадрату напруги, але форма характеристики зберігається.

Ключові параметри, які визначають форму механічної характеристики:

- Критичний момент  $M_k$  - найбільший електромагнітний момент, який може розвинути двигун.
- Критичне ковзання  $s_k$  - значення ковзання, при якому двигун розвиває критичний момент.
- Номінальний момент  $M_n$  - момент, що відповідає номінальній потужності двигуна.

Під час пуску двигуна з фазним ротором у коло ротора вводиться пусковий реостат, який дозволяє знизити пусковий струм і забезпечити плавний розгін. Для підбору опорів пускового реостата застосовують аналітичний метод, що базується на співвідношеннях між максимальним, номінальним і перемикаючими моментами, та наближений графічний метод, у якому пускові характеристики розраховують за аналогією з двигуном постійного струму з паралельним збудженням.

Таким чином, дослідження природних і штучних механічних характеристик асинхронного двигуна з фазним ротором дозволяє оцінити вплив додаткового опору та напруги живлення на його робочі параметри, а також визначити оптимальні умови пуску та вибір опорів пускового реостата.

## 9.2. Завдання

Для асинхронного двигуна з фазним ротором необхідно виконати такі дії. Спочатку провести попередні розрахунки: визначити коефіцієнт приведення опорів, знайти наведені значення опорів ротора та обчислити індуктивний опір

короткого замикання. Далі розрахувати критичний момент і критичне ковзання двигуна при номінальній напрузі живлення, записати рівняння природної механічної характеристики та побудувати її графік. Для режиму з додатковим опором у роторному колі  $R_{2\text{дод}} = 0,3 \cdot R_{2\text{н}}$  потрібно визначити сумарний опір роторного кола, знайти критичне ковзання та побудувати реостатну механічну характеристику. Для режиму зі зниженою напругою живлення  $U_1 = 0,7 \cdot U_{1\text{н}}$  слід обчислити критичний момент, записати рівняння відповідної штучної механічної характеристики та побудувати її графік. На одному рисунку (рис. 9.1) необхідно зобразити три характеристики: природну, реостатну (при  $R_{2\text{дод}} = 0,3 \cdot R_{2\text{н}}$  та характеристику при зменшеній напрузі живлення ( $U_1 = 0,7 \cdot U_{1\text{н}}$ ).

Окрім цього, потрібно розрахувати опори пускового реостата у три ступені для нормального режиму пуску ( $M_{\text{с}} = M_{\text{н}}$ ) аналітичним методом, визначивши моменти перемикання та перевіривши умову  $M_2^* = 1,2$ , після чого знайти опори кожного ступеня пускового реостата. Далі необхідно виконати розрахунок пускових опорів наближеним графічним методом та побудувати пускові характеристики двигуна (рис. 9.2). У завершенні роботи слід порівняти результати, отримані аналітичним і графічним методами, та зробити висновки щодо доцільності використання реостатного пуску і впливу додаткового опору на механічні характеристики асинхронного двигуна.

### 9.3. Приклад виконання практичного завдання

Для асинхронного двигуна з фазним ротором розрахувати та побудувати природну та штучні механічні характеристики:

а) при введенні в ланцюг ротора  $R_{2\text{доб}} = 0,3 \cdot R_{2\text{ном}}$ ;

б) при зменшеному значенні напруги живлення  $U_1 = 0,7 \cdot U_{1\text{н}}$ .

Дані двигуна:  $U_{1\text{н}} = 380/220$ ;  $P_{\text{н}} = 11 \text{ кВт}$ ;  $n_{\text{н}} = 953 \text{ об/хв}$ ;  $R_1 = 0,41 \text{ Ом}$ ;  $x_1 = 0,46 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 0,13 \text{ Ом}$ ;  $x_2 = 0,27 \text{ Ом}$ ;  $E_{2\text{н}} = 200 \text{ В}$ ;  $I_{2\text{н}} = 35,4 \text{ А}$ ;  $M_{\text{к}}/M_{\text{н}} = 3,1$ .

Розрахунок механічних характеристик асинхронного двигуна будемо вести за уточненою формулою Клоса:

$$M = \frac{2 M_{\kappa} (1 + \alpha \cdot S_{\kappa})}{\frac{S}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S} + 2\alpha \cdot S_{\kappa}}, \quad (9.1)$$

де  $M_{\kappa}$  - критичний момент;  $S_{\kappa}$  - критичне ковзання;  $\alpha = R_1/R'_2$ .

Коефіцієнт приведення опорів:

$$K_R = (0.95 \frac{U_{1H}}{E_{2H}})^2 = (0.95 \frac{380}{220})^2 = 3.26, \quad (9.2)$$

Наведені значення опорів ротора:

$$\begin{aligned} R'_2 &= R_2 K_R = 0.132 \cdot 3.26 = 0.43 \text{ Ом}; \\ x'_2 &= x_2 K_R = 0.27 \cdot 3.26 = 0.88 \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (9.3)$$

Індуктивний опір короткого замикання

$$x_K = x_1 + x'_2 = 0.465 + 0.88 = 1.345 \text{ Ом}. \quad (9.4)$$

Критичний момент двигуна при номінальному значенні напр.яженні:

$$M_{KE} = \frac{3U_{1\Phi H}^2}{2\omega_0 (R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_K^2})} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104.7 (0.415 + \sqrt{0.415^2 + 1.345^2})} = 381 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (9.5)$$

де  $\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_{1H}}{p_{\Pi}} = \frac{2\pi \cdot 50}{3} = 104.7 \text{ с}^{-1}$  - швидкість ідеального холостого ходу.

Критичне ковзання на природній характеристиці:

$$S_{KE} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + x_K^2}} = \frac{0.43}{\sqrt{0.415^2 + 1.345^2}} = 0.306, \quad (9.6)$$

Рівняння природної механічної характеристики

$$M = \frac{2 \cdot 381 (1 + 0.965 \cdot 0.306)}{\frac{S}{0.306} + \frac{0.306}{S} + 2 \cdot 0.965 \cdot 0.306}, \quad (9.7)$$

За допомогою цього рівняння розраховано природну механічну характеристику асинхронного двигуна, яка побудована на рис. 9.1 (крива 1).

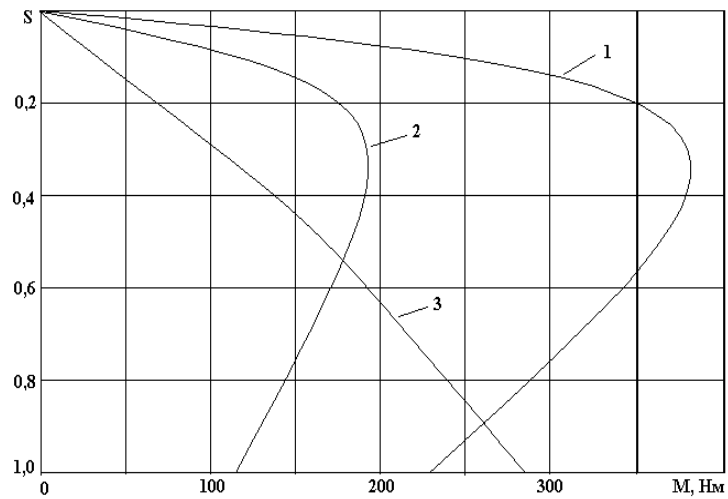


Рис. 9.1 – Механічні характеристики асинхронного двигуна: 1 - природна;  
2,3 - штучні

Для побудови реостатної механічної характеристики  $R_{2доб} = 0,3 \cdot R_{2н}$  визначимо сумарний наведений опір роторного ланцюга:

$$R_{2\Sigma}' = (R_2 + R_{2доб})K_R = (0.132 + 0.978)3.26 = 3.62 \text{ Ом}, \quad (9.8)$$

де  $R_{2доб} = 0.3R_{2н} = \frac{0.3 \cdot E_{2н}}{\sqrt{3}I_{2н}} = \frac{0.3 \cdot 200}{\sqrt{3} \cdot 35.54} = 0.978 \text{ Ом}$  - величина додаткового опору, що вводиться в ланцюг ротора.

Критичне ковзання на реостатній характеристиці:

$$s_{жC} = \frac{R_{2\Sigma}'}{\sqrt{R_1' + x_K'}} = \frac{3.62}{\sqrt{0.415^2 + 1.345^2}} = 2.57, \quad (9.10)$$

Рівняння реостатної характеристики:

$$M = \frac{2 \cdot 381(1 + 0.295)}{\frac{s}{2.57} + \frac{2.57}{s} + 2 \cdot 0.295}, \quad (9.11)$$

Реостатна механічна характеристика, що відповідає цьому рівнянню, побудована на рис. 9.1 (крива 2).

Для побудови механічної характеристики при  $U_{1н} = 0.7 \cdot 220 = 154 \text{ В}$ . Визначимо критичний момент:

$$M_{KE} = \frac{3U_1^2}{2\omega_0(R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_K^2})} = \frac{3 \cdot 154^2}{2 \cdot 104,7(0,415 + \sqrt{0,415^2 + 1,345^2})} = 186,7 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

Рівняння штучної механічної характеристики при  $U_1 = 154$  має вигляд:

$$M = \frac{2 \cdot 186,7(1 + 0,295)}{\frac{S}{0,306} + \frac{0,306}{S} + 2 \cdot 0,295}$$

Відповідну механічну характеристику побудовано на рис. 9.1 (крива 3).

Далі виконайте розрахувати опори пускового реостата при нормальному режимі пуску в три ступені і  $M_c = M_n$ , користуючись аналітичним методом.

Так як режим пуску нормальний, то момент, що перемикає  $M_2$  повинен перевищувати статичний (10-20)%.

Приймаємо  $M_{2*} = 1,2$ . Відношення максимального моменту при пуску  $M_1$  на момент перемикавання  $M_2$  знаходимо як:

$$\lambda = \frac{M_1}{M_2} = \sqrt[m+1]{\frac{1}{S_n \cdot M_{2*}}} = \sqrt[3+1]{\frac{1}{0,047 \cdot 1,2}} = 2,052, \quad (9.12)$$

Здійснюємо перевірку на максимальний (піковий) момент, який має бути менше критичного:

$$\frac{M_1}{M_2} = M_{2*} \cdot \lambda = 1,2 \cdot 2,052 = 2,46 < 3,1, \quad (9.13)$$

Опір щаблів пускового реостату при включенні їх у одинарну зірку:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_p (\lambda - 1) = 0,132(2,052 - 1) = 0,139 \text{ Ом}; \\ R_2 &= R_1 \cdot \lambda = 0,139 \cdot 2,052 = 0,285 \text{ Ом}; \\ R_3 &= R_2 \cdot \lambda = 0,285 \cdot 2,052 = 0,585 \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (9.14)$$

Для двигуна, розрахувати опори пускового реостату за умов пуску, користуючись наближеним графічним методом.

При розрахунку пускових опорів наближеним графічним методом тасходять із прямолінійності механічної характеристики і розрахунок ведеться як для двигуна постійного струму з паралельним збудженням.

На рис. 9.2 побудовано пускові характеристики двигуна для зазначених умов пуску.

Максимальний момент при пуску:

$$M_1 = M_{1*} \cdot M_H = 2.46 \cdot 136 = 334.6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Перемикаючий момент:

$$M_2 = M_{2*} \cdot M_H = 1.2 \cdot 136 = 163.2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

За графіком рис. 9.2 визначаємо опори ступенів пускового реостату:

$$R_1 = R_p \cdot \frac{bc}{ab} = 0.132 \frac{12}{12} = 0.132 \text{ Ом};$$

$$R_2 = R_p \cdot \frac{cd}{ab} = 0.132 \frac{25}{12} = 0.275 \text{ Ом};$$

$$R_3 = R_p \cdot \frac{de}{ab} = 0.132 \frac{51}{12} = 0.561 \text{ Ом}.$$

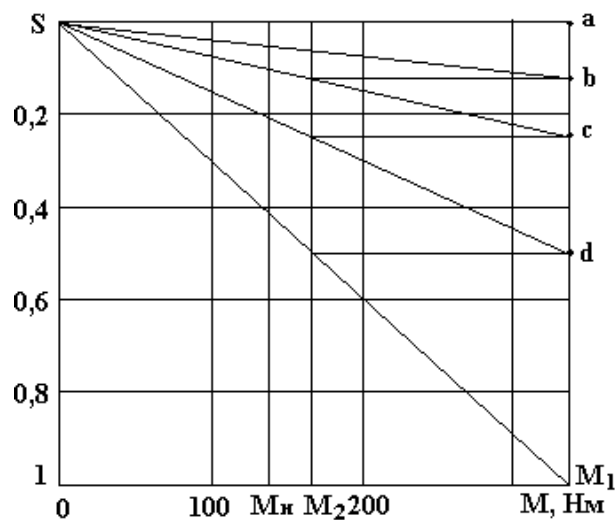


Рис. 9.2 – Пускові характеристики АД, побудовані наближеним способом

#### 9.4. Контрольні питання

1. Що таке механічна характеристика асинхронного двигуна?
2. Чим відрізняється природна механічна характеристика від штучної?
3. Як впливає введення додаткового опору в ротор на механічну характеристику двигуна?
4. Що таке критичне ковзання та як воно змінюється при збільшенні опору ротора?
5. Як визначається критичний момент асинхронного двигуна?

6. Як впливає зміна напруги живлення на максимальний момент і на форму механічної характеристики?
7. Які параметри двигуна необхідні для побудови природної механічної характеристики?
8. У чому полягає суть формули Клосса та які її обмеження?
9. Як визначається рівняння природної механічної характеристики?
10. Як змінюється швидкість ротора при введенні додаткового опору?
11. У чому полягає практичне застосування штучних механічних характеристик?
12. Які переваги має асинхронний двигун з фазним ротором порівняно з короткозамкненим?
13. Для чого застосовуються пускові реостати у фазних асинхронних двигунах?
14. Чому при пуску двигуна необхідно обмежувати пусковий струм?
15. Як визначаються опори ступенів пускового реостату аналітичним методом?

Таблиця 9.1 – Вихідні данні до практичної роботи №9

| Вар. | $U_{1н}, В$ | $P_{н}, кВт$ | $n_{н},$<br>об/хв | $R_1, Ом$ | $x_1, Ом$ | $R_2,$<br>Ом | $x_2, Ом$ | $E_{2н}, В$ | $I_{2н}, А$ |
|------|-------------|--------------|-------------------|-----------|-----------|--------------|-----------|-------------|-------------|
| 1    | 380/220     | 11,0         | 953               | 0,41      | 0,46      | 0,13         | 0,27      | 200         | 35,4        |
| 2    | 380/220     | 12,0         | 960               | 0,44      | 0,48      | 0,14         | 0,28      | 210         | 36,0        |
| 3    | 380/220     | 10,5         | 945               | 0,39      | 0,45      | 0,12         | 0,25      | 190         | 34,0        |
| 4    | 400/230     | 11,5         | 950               | 0,42      | 0,47      | 0,13         | 0,27      | 205         | 35,8        |
| 5    | 380/220     | 9,8          | 940               | 0,37      | 0,44      | 0,11         | 0,24      | 185         | 33,0        |
| 6    | 400/230     | 13,0         | 955               | 0,46      | 0,50      | 0,15         | 0,30      | 215         | 37,5        |
| 7    | 380/220     | 11,2         | 948               | 0,43      | 0,46      | 0,14         | 0,28      | 200         | 35,2        |
| 8    | 400/230     | 12,5         | 960               | 0,45      | 0,49      | 0,14         | 0,29      | 210         | 36,8        |

| Вар. | $U_{1H}, B$ | $P_H, \text{кВт}$ | $n_H,$<br>об/хв | $R_1, \text{Ом}$ | $x_1, \text{Ом}$ | $R_2,$<br>$\text{Ом}$ | $x_2, \text{Ом}$ | $E_{2H}, B$ | $I_{2H}, A$ |
|------|-------------|-------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------------|------------------|-------------|-------------|
| 9    | 380/220     | 10,2              | 942             | 0,38             | 0,44             | 0,12                  | 0,25             | 188         | 34,2        |
| 10   | 380/220     | 11,8              | 955             | 0,42             | 0,47             | 0,13                  | 0,27             | 205         | 36,0        |
| 11   | 400/230     | 10,0              | 940             | 0,37             | 0,43             | 0,11                  | 0,24             | 180         | 32,5        |
| 12   | 380/220     | 12,2              | 958             | 0,44             | 0,48             | 0,14                  | 0,28             | 208         | 36,5        |
| 13   | 400/230     | 11,3              | 950             | 0,41             | 0,46             | 0,13                  | 0,26             | 200         | 35,0        |
| 14   | 380/220     | 10,8              | 947             | 0,40             | 0,45             | 0,12                  | 0,25             | 195         | 34,5        |
| 15   | 400/230     | 12,8              | 962             | 0,45             | 0,49             | 0,15                  | 0,30             | 212         | 37,0        |
| 16   | 380/220     | 9,6               | 938             | 0,36             | 0,42             | 0,11                  | 0,23             | 182         | 32,8        |
| 17   | 400/230     | 11,7              | 952             | 0,43             | 0,47             | 0,13                  | 0,27             | 206         | 36,2        |
| 18   | 380/220     | 10,4              | 944             | 0,39             | 0,44             | 0,12                  | 0,25             | 190         | 34,0        |
| 19   | 400/230     | 12,4              | 957             | 0,44             | 0,48             | 0,14                  | 0,28             | 210         | 36,8        |
| 20   | 380/220     | 11,1              | 949             | 0,41             | 0,46             | 0,13                  | 0,26             | 198         | 35,0        |
| 21   | 400/230     | 9,9               | 939             | 0,36             | 0,42             | 0,11                  | 0,23             | 182         | 32,0        |
| 22   | 380/220     | 13,0              | 960             | 0,47             | 0,51             | 0,15                  | 0,31             | 218         | 38,0        |
| 23   | 400/230     | 11,6              | 951             | 0,42             | 0,47             | 0,13                  | 0,27             | 204         | 36,0        |
| 24   | 380/220     | 10,7              | 946             | 0,40             | 0,44             | 0,12                  | 0,25             | 193         | 34,3        |
| 25   | 400/230     | 12,6              | 959             | 0,46             | 0,49             | 0,14                  | 0,29             | 212         | 37,2        |
| 26   | 380/220     | 11,4              | 951             | 0,42             | 0,47             | 0,13                  | 0,26             | 200         | 35,6        |
| 27   | 400/230     | 10,3              | 943             | 0,38             | 0,43             | 0,12                  | 0,24             | 188         | 33,4        |
| 28   | 380/220     | 12,1              | 956             | 0,44             | 0,48             | 0,14                  | 0,28             | 208         | 36,5        |
| 29   | 400/230     | 11,9              | 954             | 0,43             | 0,47             | 0,13                  | 0,27             | 206         | 36,4        |
| 30   | 380/220     | 10,1              | 941             | 0,37             | 0,43             | 0,11                  | 0,24             | 186         | 33,0        |



**ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ З ПРАКТИЧНИХ РОБІТ  
з дисципліни «Теорія електроприводу» для підготовки до практичних занять  
здобувачами за першим(бакалаврським) рівнем вищої освіти спеціальності  
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**

1. Практична робота пишеться кожним студентом власноруч (одним коляром пасти) та починається з номеру практичної роботи та її найменування. Листи заповнюються лише з однієї сторони.

2. Робота оформлюється на листах А4: полем ліворуч – 2,5 см; полем праворуч – 1 см; полем внизу/верху – 2 см.

3. Кожна сторінка повинна бути пронумерована та підписана відповідним шифром (див. додаток 2.)

3. Звіт з практичної роботи повинен мати: титульний лист, теоретичну частину, розрахункову частину, відповіді на контрольні питання, висновки.

4. Титульний аркуш є першою сторінкою практичної роботи і містить основні дані про звіт роботи та її автора. Титульний аркуш заповнюється за строго визначеною формою (див. додаток 1) та повинна містити:

- найменування вищого навчального закладу, факультету та кафедри;
- назву практичної роботи;
- допуски до виконання та захисту;
- відведену графу для оцінки студента;
- прізвище, ім'я автора;
- шифр групи в якій навчається автор;
- науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я викладача;
- рік виконання.

Слід пам'ятати, що титульний лист не підлягає нумерації, однак включається до загальної нумерації сторінок практичної роботи.

5. Розрахункова частина практичної роботи повинна виконуватися з урахуванням загальних вимоги до оформлення звіту та оформлюватися у рамці з відповідним шифром (див. додаток 2).

6. Захист практичної роботи відбувається у наступні послідовності:

1) оформлення звіту практичної роботи (титульний лист та теоретична частина), після чого студент отримує допуск до виконання роботи;

2) виконання або розрахунок завдання практичної роботи, після перевірки якої студент готується та відповідає письмово на контрольні питання. Отримується можливість до захисту практичної роботи;

3) захист практичної роботи відбувається усно, за питаннями по темі практичної роботи та відповідного лекційного матеріалу.

## **ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ПІДГОТОВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАННЯТЬ**

### **з дисципліни «Теорія електроприводу»**

На практичному занятті студент повинен закріпити одержані теоретичні знання і набути практичних навичок з розрахунку параметрів роботи електроприводу.

При виконанні практичних робіт з дисципліни теорія електроприводу студент повинен самостійно вирішувати практичні інженерні задачі, уміти застосовувати методики розрахунку параметрів для дослідження роботи електроприводу.

Одержавши графік виконання практичних робіт з дисципліни, студент самостійно готується до кожної з них, вивчаючи відповідні розділи теоретичного матеріалу.

Для роботи студент отримує варіант індивідуального завдання і необхідну нормативно-довідкову літературу. При розрахунках студентам рекомендується використовувати мікрокалькулятори. Студент самостійно виконує розрахунки відповідно з темою практичного заняття та при необхідності отримує допомогу викладача. Після виконання необхідних розрахунків здобувач складає звіт по роботі, який вміщує всі фактичні дані (схеми, таблиці, графіки) та аналіз результатів розрахунку. Для економії часу графіки краще виконувати на міліметровому папері, або побудувати за допомогою комп'ютерних програм.

В кінці заняття студент повинен представити викладачу результати індивідуальної роботи, при необхідності виконати необхідні виправлення та захистити практичну роботу за тематичними питаннями для одержання оцінки від викладача.

Перед захистом практичної роботи перевіряється готовність студента до практичного заняття (наявність оформленого звіту) та за темою практичного заняття, використовуючи контрольні питання, які приводяться в практичній роботі. Лише після перевірки викладачем ступеня підготовки, студент допускається до занять, і може захищати практичну роботу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

### Основна

1. Авдєєва О. А., Садовий О. С. Електропривід і автоматизація: конспект лекції. Миколаїв : МНАУ, 2018. 98 с. URL: <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/3743>
2. Василєга П. О. Електропривод робочих машин : підручник. Суми, 2022. 290 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/88282/3/Vasilega.pdf>
3. Видмиш А. А., Ярошенко Л. В. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1 : навч. посібник. Вінниця : ВНАУ, 2020. 387 с. URL: <https://repository.vsau.org/getfile.php/25015.pdf>
4. Донець О. В., Колотіло В. І. Теорія електропривода : конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 148 с. URL: <https://surl.li/mcbgwu>
5. Красношاپка Н. Д. Автоматизований електропривод розділ 1. Теорія електропривода : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 100 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/57270>
6. Красношاپка Н. Д. Автоматизований електропривод. Розділ 1. Теорія електропривода : навчальний посібник / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Н. Д. Красношاپка. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 101 с. <https://ela.kpi.ua/items/0d4ea828-349e-4aa0-9050-ca2b21c29ff9>
7. Красношاپка Н., Пижов В. Електропривод: Механіка електроприводу. Електромеханічне перетворення енергії та електромеханічні властивості двигунів постійного струму: навч. посіб. Київ, 2019. 198 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/b88af571-a07f-4926-8e23-07a11228deb7/content>
8. Красношاپка Н., Пушкар М., Пижов В. Електропривод : лаборатор. практикум. Київ, 2022. 54 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/c4262f9f-0f7e-4fba-9d92-0974b8a6cbe9/content>
9. Лукавенко В. П., Зілінський А. І. Основи промислового електроприводу лабораторний практикум : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського,

2022. 72 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/e68021fb-f64c-450a-bea6-421644246fcb/content>
- 10.Методологія наукових досліджень : навч. посіб. / В. І. Ладики, Л. З. Шильман, Ф. В. Пивоваров. П. П. Перцевой та ін. ; за заг. ред. В. І. Ладики. Херсон : Олді-плюс, 2022. 222 с.
- 11.Основи промислового електроприводу: лабораторний практикум : навчальний посібник / уклад. В. П. Лукавенко, А. І. Зілінський. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 72 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/e68021fb-f64c-450a-bea6-421644246fcb/content>
- 12.Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посіб. / за ред. В. І. Мілих. Київ : Каравела, 2018. 454 с. URL: [https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2019/Ostashev\\_2018\\_452.pdf](https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2019/Ostashev_2018_452.pdf)
- 13.Скляр О. Г., Болтянська Н. І. Технології наукових досліджень : підручник. Мелітополь : ФОП Однорог Т.В., 2022. 682 с.
- 14.Ставинський А. А., Циганов О. М. Спеціальні електричні машини. Частина 1 "Електричні машини систем автоматики" : навчальний посібник. Миколаїв : МНАУ, 2025. 77 с. URL:<https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/21980>
- 15.Теоретичні основи електротехніки - 2: Лабораторний практикум : навч. посіб. / М. П. Бурик, Л. Ю. Спінул, В. Ю. Лободзинський ; Н. В. Беленок, Ю. М. Чуняк КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 96 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/f8ebe919-c814-4e26-abe1-60e492c23f76/content>
- 16.Теряєв В. І. Автоматизований електропривод. Ч. 2 : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 204 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/73e51e44-c55f-4e5f-b00a-a0ad60d200a8/content>
11. Leonhard W. Control of Electrical Drives. Springer, 2014. 460 p.
- 17.The influence of the design of the stator winding of a synchronous-reactive generator on increasing its energy efficiency / M. Kundenko et al. *Electrical engineering and electromechanics*. 2025. P. 3–9.

## Електронні ресурси

1. ДСТУ 2313-93 Електроприводи. Терміни та визначення. *БУДСТАНДАРТ Online* - нормативні документи будівельної галузі України. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=60224](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60224).
2. ДСТУ 2649-94 Електродвигуни асинхронні заглибні. Загальні технічні умови (ГОСТ 30195-94). *БУДСТАНДАРТ Online* - нормативні документи будівельної галузі України. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=93694](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=93694).
3. ДСТУ 8312:2015 Машини електричні малої потужності. Двигуни. Загальні технічні умови. *БУДСТАНДАРТ Online* - нормативні документи будівельної галузі України. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=72817](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=72817).
4. ДСТУ 2.701:2011. Єдина система конструкторської документації. Схеми. Види та типи. Київ : Держспоживстандарт України, 2012. 28 с.

## ДОДАТКИ

Додаток 1

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**ІНЖЕНЕРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

### **ПРАКТИЧНА РОБОТА №1**

з дисципліни

Теорія електроприводу

на тему: “Розрахунок параметрів електроприводу для тягової установки”

Допуск до виконання \_\_\_\_\_

Допуск до захисту \_\_\_\_\_

Захист \_\_\_\_\_

Виконав студент групи: Ен 1/1

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Олексій ХАРІТОН

(імя, прізвище)

Керівник:

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Віталій МАРДЗЯВКО

(імя, прізвище)

2025

|     |      |          |        |      |                           |      |
|-----|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|     |      |          |        |      | 141 Ен 1/1. 11. ПР01. ТЕП | Лист |
| Ізм | Лист | № докум. | Підпис | Дата |                           | 96   |



Навчальне видання

## **ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ (ЧАСТИНА І)**

Методичні рекомендації

Укладач: **Ставинський** Ростислав Андрійович  
**Мардзявко** Віталій Анатолійович

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 6.

Тираж 20 прим. Зам. № \_\_\_\_\_

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

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.02.2013 р.