

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**



**ТЕХНІЧНИЙ КОЛЕДЖ**

Луцького національного технічного університету

**ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ**

Методичні вказівки до практичних занять  
для здобувачів початкового рівня (короткий цикл) вищої освіти  
освітньо-професійної програми  
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
галузь знань 14 Електрична інженерія  
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
денної форми навчання

Луцьк 2019

УДК 621.397

О-47

До друку

Голова навчально-методичної ради Луцького НТУ \_\_\_\_\_ В.І. Талах

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій Луцького НТУ

Директор бібліотеки \_\_\_\_\_ С.С. Бакуменко

Затверджено навчально-методичною радою Луцького НТУ,  
протокол №\_\_ від «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 року.

Рекомендовано до видання навчально-методичною радою ТК Луцького НТУ,  
протокол №\_\_ від «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 року.

Голова навчально-методичної ради ТК ЛНТУ \_\_\_\_\_ Т.П. Радішук

Розглянуто і схвалено на засіданні випускаючої циклової комісії «Електропостачання» ТК Луцького НТУ,

протокол №\_\_ від «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 року.

Голова ВЦК \_\_\_\_\_ М.М. Євсюк

Укладачі: \_\_\_\_\_ В.В. Лишук, викладач Технічного коледжу Луцького НТУ

\_\_\_\_\_ С.П. Літковець, викладач Технічного коледжу Луцького НТУ

Рецензент: \_\_\_\_\_ Й.Р. Селепина, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій Луцького НТУ

Відповідальний за випуск: \_\_\_\_\_ М.М. Євсюк, голова випускаючої циклової комісії «Електропостачання» Технічного коледжу Луцького НТУ

**Основи електроприводу** [Текст]: Методичні вказівки до практичних занять для здобувачів початкового рівня (короткий цикл) вищої освіти освітньо-професійної програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузь знань 14 Електрична інженерія спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної форми / укладачі В.В. Лишук, С.П. Літковець. – Луцьк : ТК Луцького НТУ, 2019. – 88 с.

Дані методичні вказівки до практичних занять складені на основі робочої програми з дисципліни „Основи електроприводу” і призначені для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка форми навчання.

© В.В. Лишук, 2019, © С.П. Літковець, 2019

## ПЕРЕДМОВА

В наш час для забезпечення зростаючих потреб людства створюються, розробляються і вдосконалюються сотні тисяч робочих машин, виробничих і побутових механізмів, підйомно-транспортних засобів і т.д.

Для функціонування робочих машин і механізмів до їх виконавчих органів від приводу повинна бути підведена механічна енергія, за рахунок якої і відбувається їх рух. Характер цього руху може бути різноманітним: обертальним односпрямованим і реверсивним, поступальним односпрямованим і реверсивним, а також зворотно-поступальним. Основне призначення приводного електродвигуна полягає в перетворенні електричної енергії, споживаної ним із мережі, в механічну, що віддається через вал двигуна.

Механічні характеристики електроприводів необхідні для вибору раціонального електроприводу. Правильне поєднання механічних характеристик електроприводу і робочої машини – одна з неодмінних умов високих техніко-економічних показників роботи виробничого агрегату.

Механічними характеристиками електродвигуна називаються залежності частоти або швидкості обертання від крутного моменту  $n = f(M)$  або  $\omega = f(M)$ . Електромеханічними характеристиками електродвигуна називаються залежності частоти або швидкості обертання від сили струму  $n = f(I)$  або  $\omega = f(I)$ .

Ці характеристики називаються природними, якщо вони отримані при номінальних умовах живлення (при номінальній напрузі і частоті), номінальному збудженні і відсутності додаткових опорів в колах ротора (або якоря) і статора. Характеристики двигуна називаються штучними при зміні будь-якого з перерахованих вище факторів. Зазвичай при дослідженні електроприводів механічні характеристики зображують на графіках у вигляді функції  $\omega = f(M)$ . При дослідженні механічних характеристик електродвигунів необхідно знати опір їх обмоток, а також значення введених в кола обмоток пускових, гальмових і інших опорів.

Методичні вказівки складаються з восьми тем, містять теоретичні положення, приклади розрахунку задач та задачі для самостійного опрацювання. Опрацювання задач сприятиме кращому засвоєнню теоретичного матеріалу.

## ТЕМА 1. МЕХАНІКА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Елементи, які утворюють механічну частину електроприводу, зв'язані між собою та впливають один на одний. Тому, аналізуючи механічний рух того або іншого елемента, необхідно враховувати вплив на нього інших елементів кінематичної схеми електроприводу. Це досягається відповідним перерахунком сил, моментів, мас та моментів інерції, що входять у рівняння руху, до елемента, рух якого розглядається. Такий розрахунок в теорії електроприводу називається операцією приведення, а перераховані змінні та параметри – приведеними.

При визначенні приведенного моменту інерції  $J$  слід моменти інерції обертальних елементів поділити на квадрат передавального числа кінематичної схеми між цими елементами та валом двигуна, а маси елементів, що рухаються поступально, помножити на квадрат радіуса приведення і отримані результати розрахунку до моментів інерції двигуна та елементів, які обертаються з його швидкістю.

Визначення приведенного моменту опору  $M_c$  здійснюється за балансом потужності навантаження електроприводу у реальній та розрахунковій схемах з врахуванням коефіцієнта корисної дії (ККД) втрат потужності у кінематичному колі.

### Задача 1.1.

Для схеми на рис.1.1,а виконати операцію приведення у випадку підйому вантажу при наступних параметрах кінематичної схеми:  $J_D = 0,1 \text{ кгм}^2$ ;  $J_1 = 0,02 \text{ кгм}^2$ ;  $J_2 = 2 \text{ кгм}^2$ ;  $m = 1000 \text{ кг}$ ;  $R_B = 0,15 \text{ м}$ ;  $v_{BO} = 0,9 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;  $z_1 = 14$ ;  $z_2 = 86$ ; ККД редуктора  $\eta_p = 0,97$ ; ККД лебідки  $\eta_L = 0,96$ .

### Розв'язок.

Передавальне число редуктора та радіус приведення кінематичної схеми:

$$i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{86}{14} = 6,14;$$
$$\rho = \frac{R_B}{i} = \frac{0,15}{6,14} = 0,025 \text{ м}.$$

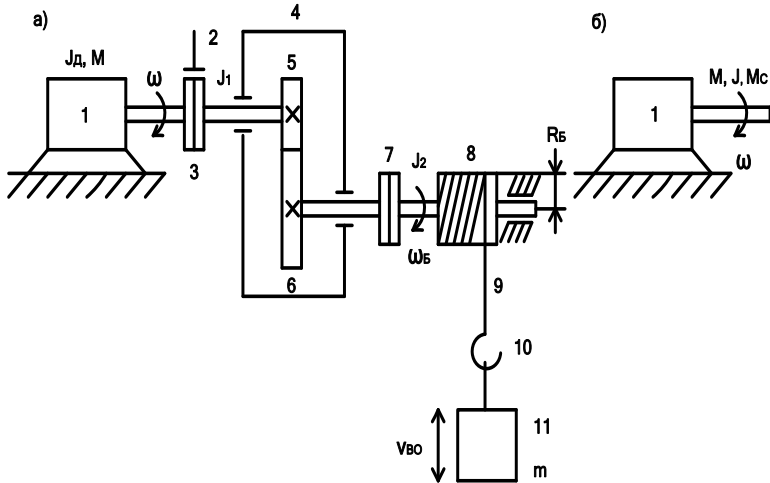


Рис.1.1. Кінематична (а) та розрахункова (б) схеми підйомної лебідки:  
 1 – двигун; 2 – механічне гальмо; 3 та 7 – механічні муфти; 4 – редуктор;  
 5 та 6 – шестерні; 8 – барабан; 9 – трос; 10 – крюк; 11 – вантаж.

Момент інерції системи приведений до валу двигуна:

$$J = J_D + J_1 + \frac{J_2}{i^2} + m\rho^2 = 0,1 + 0,02 + \frac{2}{6,14^2} + 1000 \cdot 0,025^2 = 0,8 \text{ кгм}^2.$$

Приведений до валу двигуна момент опору при підйомі вантажу:

$$M_C = \frac{m \cdot g \cdot \rho}{\eta_P \cdot \eta_B} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 0,025}{0,97 \cdot 0,96} = 263 \text{ Нм}.$$

### Задача 1.2.

Визначити пусковий момент двигуна, постійно діючий на систему підйому, необхідний для того, щоб розігнати її до швидкості  $V = 1,4$  м/с при наступних вихідних даних: час розгону має дорівнювати 2,5 с; вантаж, що піднімається має масу 1 т; маховий момент приводного двигуна потужністю 4,9 кВт ( $n_{\text{ном}} = 900$  об / хв)  $J_D = 1,73$  кг·м<sup>2</sup>; маховий момент барабану  $J_B = 450$  кг·м<sup>2</sup>, його діаметр  $D_6 = 700$  мм; коефіцієнт тертя вантажу об поверхню  $\mu = 0,15$ ; кут підйому похилої площини  $\alpha = 5^\circ$ ; ККД передачі між валом барабана і електродвигуном  $\eta = 0,7$ .

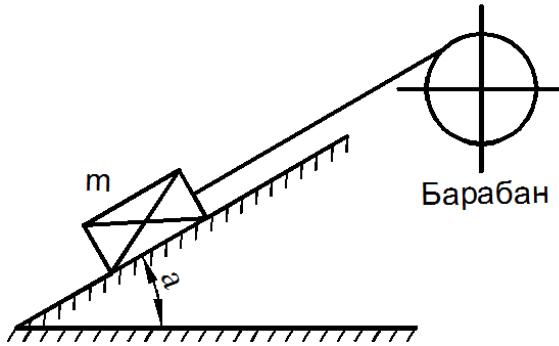


Рис.1.2. Схема електроприводу.

**Розв'язок.**

Визначаємо силу, що необхідна для піднімання маси  $m$  по похилій площині:

$$F_{C1} = m \cdot g \cdot \sin \alpha = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,087 = 855 \text{ Н.}$$

Визначаємо силу тертя вантажу:

$$F_{C2} = m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \mu \cdot \frac{D_B}{2} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,996 \cdot 0,15 \cdot \frac{0,7}{2} = 513 \text{ Н.}$$

Сумарна сила опору:

$$F_C = F_{C1} + F_{C2} = 855 + 513,065 = 1368 \text{ Н.}$$

Момент опору:

$$M_C = \frac{F_C \cdot V}{\omega \cdot \eta} = \frac{1368 \cdot 1,4}{94,25 \cdot 0,7} = 29 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = \frac{3,14 \cdot 900}{30} = 94,25 \text{ с}^{-1}.$$

Сумарний момент інерції системи:

$$J_C = \frac{J_D^2}{4} + \frac{J_B^2}{4} + m \cdot \frac{V}{\omega_H} = \frac{1,73}{4} + \frac{450}{4} + 1000 \cdot \frac{(1,4)^2}{(94,25)^2} = 113,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Визначаємо пусковий момент двигуна, попередньо записавши рівняння динаміки обертового руху

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\Pi} - M_C.$$

Звідси

$$M_{\Pi} = \frac{J_C \cdot \omega_H}{t_{\Pi}} - M_C = \frac{113,2 \cdot 94,25}{2,5} + 29 = 4294,8 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

### Задача №1.3.

Визначити величину моментів опору на валу двигуна при підйомі і опусканні номінального вантажу масою  $m = 10$  т, а також при підйомі і спуску вільного гака з блоками. Дані механізму: маса гака і блоків  $m_0 = 800$  кг, ККД підйомного механізму при підйомі номінального вантажу  $\eta = 0,65$ , ККД підйомного механізму при підйомі пустого крюка  $\eta = 0,225$ , загальне передавальне число зубчастого редуктора  $i = 25$ , діаметр барабана  $D_6 = 0,4$  м.

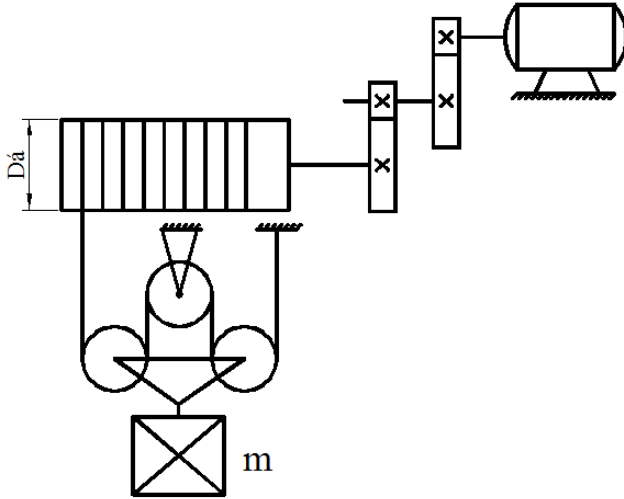


Рис.1.3. Кінематична схема.

#### Розв'язок.

Враховуючи зміну сили опору  $F_C$  двома рухомими блоками, тобто коефіцієнт блоків  $k = 4$ , визначимо величину статичного моменту опору при підйомі і опусканні номінального вантажу:

при підніманні:

$$\uparrow M_c = \frac{F_C \cdot D_B}{2 \cdot i \cdot \eta} = \frac{(m + m_0) \cdot q \cdot D_B}{k \cdot 2 \cdot i \cdot \eta} = \frac{(10000 + 800) \cdot 9,81 \cdot 0,4}{2 \cdot 25 \cdot 0,65 \cdot 4} = 326 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

при опусканні:

$$\downarrow M_c = \frac{F_C \cdot D_B \cdot \eta}{2 \cdot i} = \frac{(m + m_0) \cdot q \cdot D_B \cdot \eta}{k \cdot 2 \cdot i} = \frac{(10000 + 800) \cdot 9,81 \cdot 0,4 \cdot 0,65}{2 \cdot 25 \cdot 4} = 138 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Визначимо величину статичного моменту опору при підніманні і опусканні вільного гака з блоками.

При підніманні:

$$\uparrow M_{CO} = \frac{F_{CO} \cdot D_B}{2 \cdot i \cdot \eta_O} = \frac{m_O \cdot q \cdot D_B}{k \cdot 2 \cdot i \cdot \eta_O} = \frac{800 \cdot 9,81 \cdot 0,4}{2 \cdot 25 \cdot 0,225 \cdot 4} = 69,76 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

при опусканні:

$$\downarrow M_{CO} = \frac{F_{CO} \cdot D_B \cdot \eta_O}{2 \cdot i} = \frac{m_O \cdot q \cdot D_B \cdot \eta_O}{k \cdot 2 \cdot i} = \frac{800 \cdot 9,81 \cdot 0,4 \cdot 0,225}{2 \cdot 25 \cdot 4} = 3,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

#### Задача 1.4.

Визначити момент інерції стругального верстата, приведений до валу шестерні  $Z_8$ . Швидкість різання  $V = 10 \text{ м / хв.}$ , маса столу  $m_C = 3000 \text{ кг}$ , маса оброблюваної деталі  $m_d = 600 \text{ кг}$ , діаметр рейкової шестерні ( $Z_8$ )  $D_8 = 500 \text{ мм}$ , число зубів шестерень передачі:  $Z_1 = 15$ ,  $Z_2 = 47$ ,  $Z_3 = 22$ ,  $Z_4 = 58$ ,  $Z_5 = 18$ ,  $Z_6 = 58$ ,  $Z_7 = 14$ ,  $Z_8 = 46$ ; моменти інерції зубчастих коліс,  $\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ :  $J_1 = 0,0079$ ,  $J_2 = 0,0387$ ,  $J_3 = 0,0204$ ,  $J_4 = 0,0061$ ,  $J_5 = 0,0357$ ,  $J_6 = 0,60968$ ,  $J_7 = 0,0663$ ,  $J_8 = 0,107$ .

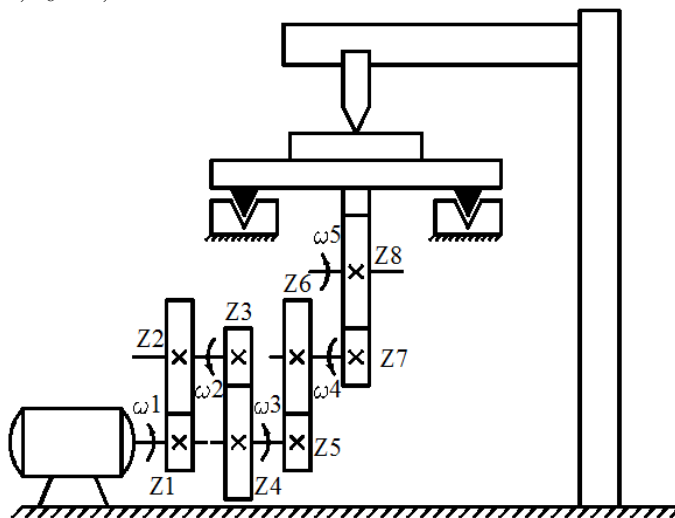


Рис.1.4. Кінематична схема електроприводу.

#### Розв'язок.

Знаходимо кутову швидкість шестерні  $Z_8$ :

$$\omega_5 = \frac{V_5 \cdot 2}{D_8} = \frac{0,167 \cdot 2}{0,5} = 0,667 \text{ с}^{-1}.$$

Знаходимо кутові швидкості інших шестерень:



$$\omega_4 = \frac{\omega_5 \cdot Z_8}{Z_7} = \frac{0,667 \cdot 46}{14} = 2,19 c^{-1}.$$

$$\omega_3 = \frac{\omega_4 \cdot Z_6}{Z_5} = \frac{2,19 \cdot 58}{18} = 7,06 c^{-1}.$$

$$\omega_2 = \frac{\omega_3 \cdot Z_4}{Z_3} = \frac{7,06 \cdot 58}{22} = 18,6 c^{-1}.$$

$$\omega_1 = \frac{\omega_2 \cdot Z_2}{Z_1} = \frac{18,6 \cdot 47}{15} = 58,3 c^{-1}.$$

Визначимо момент інерції стругального станка, приведений до валу шестерні  $Z_8$ :

$$J_{\Sigma} = \frac{J_1 \cdot \omega_1^2 + J_2 \cdot \omega_2^2 + J_3 \cdot \omega_3^2 + J_4 \cdot \omega_4^2 + J_5 \cdot \omega_5^2}{\omega_5^2} +$$

$$+ \frac{J_6 \cdot \omega_4^2 + J_7 \cdot \omega_4^2 + J_8 \cdot \omega_5^2 + (m_C + m_D) \cdot V_8^2}{\omega_5^2}.$$

$$J_{\Sigma} = \frac{0,0079 \cdot 58,3^2 + 0,0387 \cdot 18,6^2 + 0,0204 \cdot 18,6^2 + 0,0061 \cdot 7,06^2 + 0,0357 \cdot 7,06^2}{0,667^2} +$$

$$+ \frac{0,60968 \cdot 2,19^2 + 0,0663 \cdot 2,19^2 + 0,107 \cdot 0,667^2 + (3000 + 600) \cdot 0,1667^2}{0,667^2} = 343,56 \text{ кгм} \cdot \text{с}^2.$$

### Задача 1.5.

Для схеми на рис.1.1,а виконати операцію приведення у випадку спуску вантажу для тих самих параметрів та ККД кінематичної схеми, що і в задачі 1.1.

### Задача №1.6.

Схема механічної частини електроприводу ліфта наведена на рис.1.5. Записати у загальному вигляді формули для визначення приведених до валу двигуна момента інерції  $J$  системи та моменту опору  $M_C$ , якщо задано: вантажопідйомність ліфта  $m_r, \text{кг}$ ; швидкість руху кабіни  $v_{BO}, \text{м/с}$ ; маса кабіни  $m_K, \text{кг}$ ; маса противаги  $m_{PB}, \text{кг}$ ; діаметр канатовідучого шківу  $d_{KШ}, \text{м}$ ; передавальне число редуктора  $i_p$ ; ККД механічної частини  $\eta_{MЧ}$ ;

довжина канатів  $7 L_T, м$ ; маса погонного метра канату  $m_T, \frac{кг}{м}$ ; моменти інерції елементів, що обертаються зі швидкостями  $\omega$  та  $\omega_{кш}$ , відповідно  $J_1$  та  $J_2$ , двигуна 2 -  $J_D$ . Двигун 2 зв'язаний з гальмом 1 та через муфту 3 з редуктором 4.

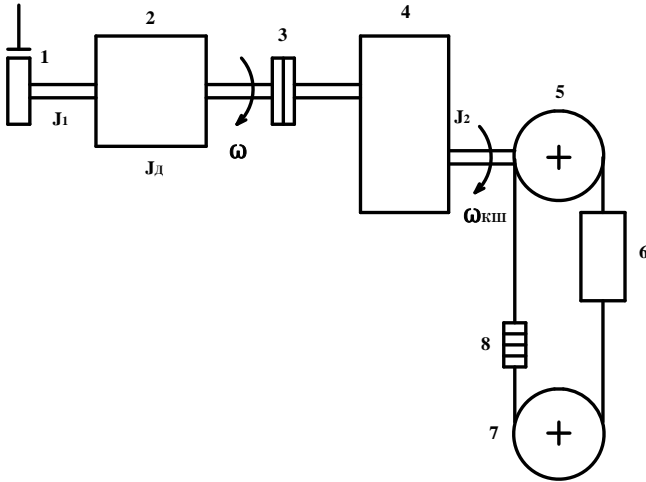


Рис 1.5. Кінематична схема ліфта.

## ТЕМА 2. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Електромеханічні  $\omega(I)$  або механічні  $\omega(M)$  характеристики електроприводів постійного струму визначаються формулами:

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi} = \frac{U - IR}{c}, \quad (2.1)$$

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR}{(k\Phi)^2} = \frac{U}{c} - \frac{MR}{c^2}, \quad (2.2)$$

де  $k$  - конструктивний коефіцієнт двигуна;  $\Phi$  - магнітний потік;  $c$  - коефіцієнт двигуна;  $R$  - повний опір якорного кола.

Природні електромеханічну або механічну характеристики двигуна постійного струму з незалежним збудженням можна побудувати за двома характерними точками за паспортними даними:

- для режиму ідеального неробочого ходу

$$I = M = 0, \quad \omega = \omega_0 = \frac{U_H \omega_H}{U_H - I_H R_{\text{я}}}, \quad (2.3)$$

- для номінального режиму

$$I = I_H, \quad M = M_H = c I_H, \quad \omega = 0, \quad (2.4)$$

де  $c = \frac{U_H - I_H R_{\text{я}}}{\omega_H}$ .

Штучні електромеханічні чи механічні характеристики двигуна постійного струму з незалежним збудженням будують методом пропорцій за формулою

$$R_{\text{д}} = R_{\text{я}} \left( \frac{\Delta \omega_{\text{ш}}}{\Delta \omega_{\text{п}}} - 1 \right), \quad (2.5)$$

де  $\Delta \omega_{\text{ш}}$  та  $\Delta \omega_{\text{п}}$  - перепади швидкості відносно швидкості ідеального неробочого ходу, відповідно, на штучній та природній характеристиках або методом відрізків за формулою

$$\frac{R}{R_H} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{ш}}}{\omega_0} = \delta, \quad (2.6)$$

яка відображає важливу властивість двигуна постійного струму з незалежним збудженням: відносний перепад швидкості  $\delta$  дорівнює відносному активному опору кола якоря  $\frac{R}{R_H}$ . Відмітимо, що ця

властивість характерна і для інших типів двигунів, наприклад асинхронних.

Іноді для обмеження струму та моменту у коло якоря вводиться регульований резистор, що дозволяє реалізувати дві та більше штучні характеристики, звзвити межі змін струму та моменту, тим самим підвищити точність їх регулювання. У цих випадках резистор секціонується на відповідне число ступенів, які закорочуються послідовно по мірі розгону або гальмування двигуна.

Число ступенів  $m$  додаткового резистора зв'язано з межами зміни струму в якоря від пускового  $I_1 = I_{доп}$  до струму перемикання  $I_2$

$$m = \frac{\lg\left(\frac{I_2}{I_1}\right)}{\lg\left(\frac{I_1 R_я}{U}\right)}. \quad (2.7)$$

Сукупність двох або більше штучних характеристик, які використовуються при пуску двигуна, називається пусковою діаграмою. При її розрахунку та побудові заданими параметрами є: допустимий струм  $I_{доп}$  або момент  $M_{доп}$ , момент навантаження  $M_c$ ; границі зміни струму (момента) або число штучних характеристик  $m$ , яке відповідає числу ступенів пускового резистора.

Опір резистора при пуску розраховується за формулою

$$R_{д1} = \frac{U}{I_{доп}} - R_я. \quad (2.8)$$

Опір резистора при динамічному гальмуванні визначається за формулою

$$R_{д2} = \frac{E}{I_{доп}} - R_я \approx \frac{U}{I_{доп}} - R_я. \quad (2.9)$$

Опір резистора при реверсі або гальмуванні проти вмиканням

$$R_{д3} = \frac{2U}{I_{доп}} - R_я. \quad (2.10)$$

Основною особливістю двигунів постійного струму з послідовним збудженням є вмикання обмотки збудження послідовно з обмоткою якоря, внаслідок чого струм якоря одночасно є й струмом збудження.

Для точних практичних розрахунків використовуються так звані універсальні характеристики двигунів з послідовним збудженням, які наведені на рис.2.1. Вони являють собою

залежності відносної швидкості  $\omega^* = \frac{\omega}{\omega_H}$  (криві 1) та момента

$$M^* = \frac{M}{M_H} \text{ (крива 2) від відносного струму } I^* = \frac{I}{I_H}.$$

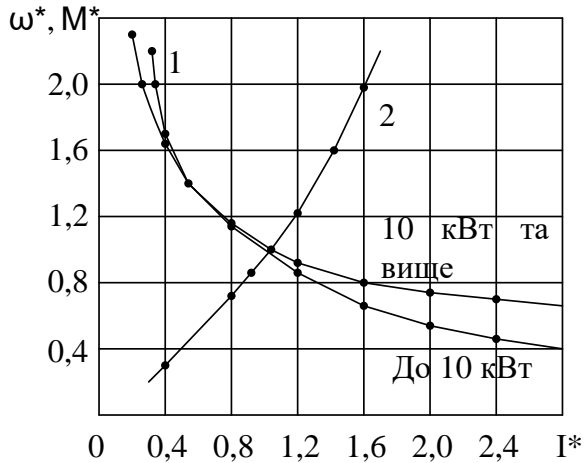


Рис.2.1. Універсальні характеристики двигунів постійного струму з послідовним збудженням.

Для отримання характеристик з більшою точністю залежність  $\omega^*(I^*)$  подана двома кривими – для двигунів до 10 кВт та вище.

### Задача 2.1.

Для двигуна постійного струму з незалежним збудженням П-72 розрахувати та побудувати природні електромеханічну та механічну характеристики, використовуючи його паспортні дані:  $P_n = 14 \text{ кВт}$ ,  $I_n = 78 \text{ А}$ ,  $U_n = 220 \text{ В}$ ,  $\omega_n = 104,7 \text{ с}^{-1}$ ,  $R_{\text{я}} = 0,172 \text{ Ом}$ .

### Розв'язок.

Для побудови характеристик, які являють собою прямі лінії, достатньо розрахувати координати двох точок: ідеального неробочого ходу та номінального режиму.

Для режиму ідеального неробочого ходу за формулами (2.3) маємо

$$I = M = 0, \omega = \omega_0 = \frac{220 \cdot 104,7}{220 - 78 \cdot 0,172} = 111,5 \text{ с}^{-1}.$$

Номінальні швидкість двигуна та момент за формулами (2.4)

$$I = I_n = 78 \text{ А}, \quad M = M_n = c I_n = 1,971 \cdot 78 = 153,7 \text{ Нм}, \quad \omega = 0,$$

де коефіцієнт двигуна  $c = \frac{220 - 78 \cdot 0,172}{104,7} = 1,971 \text{ Вс}$ .

За координатами цих точок можна побудувати природні електромеханічну  $\omega(I)$  та механічну  $\omega(M)$  характеристики.

### Задача 2.2.

Побудувати природну механічну характеристику двигуна постійного струму незалежного збудження. Паспортні дані.

$P_{\text{ном}}$ , кВт	$U_{\text{ном}}$ , В	$I_{\text{я ном}}$ , А	$R_{\text{я ном}}$ , Ом	$n_{\text{ном}}$ , об/хв.
13,3	230	58	0,465	1460

### Розв'язок.

Для побудови природної характеристики ДПС НЗ необхідно мати дві точки: точка ідеального холостого ходу ( $\omega_0, M = 0$ ) та точка при номінальному моменті ( $\omega_{\text{ном}}, M_{\text{ном}}$ ). Знайдемо точку ідеального холостого ходу ДПС НЗ

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{ном}}}{k\Phi_{\text{ном}}},$$

де  $k\Phi_{\text{ном}}$  – коефіцієнт двигуна, Вc.

$$k\Phi_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{я ном}} R_{\Sigma}}{\omega_{\text{ном}}},$$

де  $\omega_{\text{ном}}$  – номінальна швидкість ДПС НЗ, 1/с.

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{2\pi \cdot n_{\text{ном}}}{60}.$$

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1460}{60} = 152,8 / \text{с}.$$

$$k\Phi_{\text{ном}} = \frac{230 - 58 \cdot 0,465}{152,8} = 1,33 \text{ Вc}.$$

$$\omega_0 = \frac{230}{1,33} = 173 \text{ 1/с}.$$

Знайдемо електромагнітний номінальний момент

$$M_{\text{enom}} = k\Phi_{\text{ном}} \cdot I_{\text{я ном}}.$$

$$M_{\text{enom}} = 1,33 \cdot 58 = 77 \text{ Нм}.$$

Знайдемо номінальний момент ДПС НЗ

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}}$$

$$M_{ном} = \frac{13300}{152,8} = 87 \text{ Нм.}$$

Механічна характеристика ДПС НЗ приведена на рисунку 2.2.

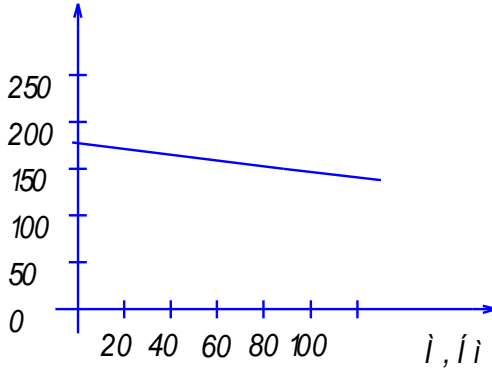


Рисунок 2.2. Природна механічна характеристика ДПС НЗ.

### Задача 2.3.

Розрахувати та побудувати характеристики  $\omega(I)$  та  $\omega(M)$  при динамічному гальмуванні, якщо додатковий опір у колі якоря  $R_d = 0,128 \text{ Ом}$ . Дані двигуна відповідають задачі 2.1.

### Задача 2.4.

Двигун постійного струму з незалежним збудженням марки ПБСТ-53 має такі паспортні дані:  $P_H = 4,8 \text{ кВт}$ ,  $I_H = 24,2 \text{ А}$ ,  $U_H = 220 \text{ В}$ ,  $n_H = 1500 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ ,  $R_{я} = 0,38 \text{ Ом}$ . Визначити опір резистора, ввімкнення якого забезпечить проходження штучної характеристики через точку з координатами:  $\omega_{шт} = 90 \text{ с}^{-1}$ ;  $M_{шт} = 25 \text{ Нм}$ .

**Розв'язок.**

Для знаходження опору використаємо метод пропорцій, попередньо визначивши основні параметри двигуна, а саме - номінальні швидкість та коефіцієнт двигуна:

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30} = \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 157c^{-1},$$

$$c = \frac{220 - 24,2 \cdot 0,38}{157} = 1,343Bc;$$

-номінальний момент та швидкість ідеального неробочого ходу:

$$M_H = cI_H = 1,343 \cdot 24,2 = 32,5Hm,$$

$$\omega_0 = \frac{U_H}{c} = \frac{220}{1,343} = 163,8c^{-1}.$$

Перепади швидкості при моменті  $M_H = 32,5Hm$  на природній та на штучній характеристиках

$$\Delta\omega_{\Pi} = \frac{M_H R_{\text{я}}}{c^2} = \frac{32,5 \cdot 0,38}{1,343^2} = 6,85c^{-1},$$

$$\Delta\omega = \omega_0 - \omega = 163,8 - 90 = 73,8^{-1}.$$

Шуканий опір резистора за формулою (2.5)

$$R_{\text{д}} = R_{\text{я}} \left( \frac{\Delta\omega_{\text{шт}}}{\Delta\omega_{\Pi}} - 1 \right) = 0,38 \left( \frac{73,8}{6,85} - 1 \right) = 3,714Om.$$

### **Задача 2.5.**

Визначити, яким має бути опір додаткового резистора порівняно з опором якоря двигуна для того, щоб перепад швидкості при заданому струмі збільшився у три рази.

### **Задача 2.6.**

Для двигуна типу ПБСТ-53 (задача 2.3) визначити опори резисторів, включення яких обмежить струм при пуску та гальмуванні проти вмиканням до рівня  $I_{\text{доп}} = 3I_H$ .

### **Розв'язок.**

Опір пускового резистора за формулою (2.8)



$$R_{Д1} = \frac{U}{I_{доп}} - R_{я} = \frac{220}{3 \cdot 24,2} - 0,38 = 2,65 \text{ Ом}.$$

Опір резистора, який використовується при гальмуванні проти вмиканням, за формулою (2.10)

$$R_{Д3} = \frac{2U}{I_{доп}} - R_{я} = \frac{2 \cdot 220}{3 \cdot 24,2} - 0,38 = 5,68 \text{ Ом}.$$

### **Задача 2.7.**

Для двигуна типу ПБСТ-53 (задача 2.3) побудувати пускову діаграму за наступними умовами:  $m = 2$ ;  $I_{доп} = 2,8I_H$ ;  $M_C = 30Hm$  та розрахувати опори додаткових резисторів.

### **Задача 2.8.**

Для двигуна типу ПБСТ-53 (задача 2.4) визначити число характеристик  $m$  пускової діаграми, при якому зміна струму буде здійснюватись у межах від  $I_1 = 60A$  до  $I_2 = 10A$ .

### **Задача 2.9.**

Розрахувати опір резистора, при якому характеристика двигуна у режимі динамічного гальмування пройде через точку з координатами:  $\omega_{ш} = 100c^{-1}$ ,  $I_{ш} = -20A$ . Дані взяті із задачі 2.4.

### **Задача 2.10.**

Розрахувати та побудувати природні характеристики двигуна постійного струму з послідовним збудженням типу ДЗ1, який має дані:  $P_H = 8кВт$ ,  $I_H = 46,5A$ ,  $U_H = 220V$ ,  $n_H = 800 \frac{об}{хв}$ ,  $\eta_H = 0,78$ .

### **Розв'язок.**

Визначаємо номінальні швидкість  $\omega_H$  та момент  $M_H$

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30} = \frac{\pi \cdot 800}{30} = 83,8c^{-1},$$

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{8000}{83,8} = 95,5 \text{ Нм}.$$

Скористаємось універсальними характеристиками двигуна на рис.2.1 та розрахуємо природні електромеханічну та механічну характеристики двигуна. Результати зведемо у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1

$I^*$	0,4	0,8	1,2	1,6	2
$M^*$	0,3	0,7	1,3	1,9	2,6
$\omega^*$	1,8	1,1	0,9	0,8	0,6
$\omega = \omega^* \omega_H, \text{с}^{-1}$	151	92	75	63	50
$M = M^* M_H, \text{Нм}$	28,7	66,9	124	181	248
$I = I^* I_H, \text{А}$	18,6	37,2	55,8	74,7	93

За отриманими даними будуюмо природні електромеханічну  $\omega(I)$  - 1 та механічну  $\omega(M)$  - 2 характеристики двигуна (рис.2.3,а,б).

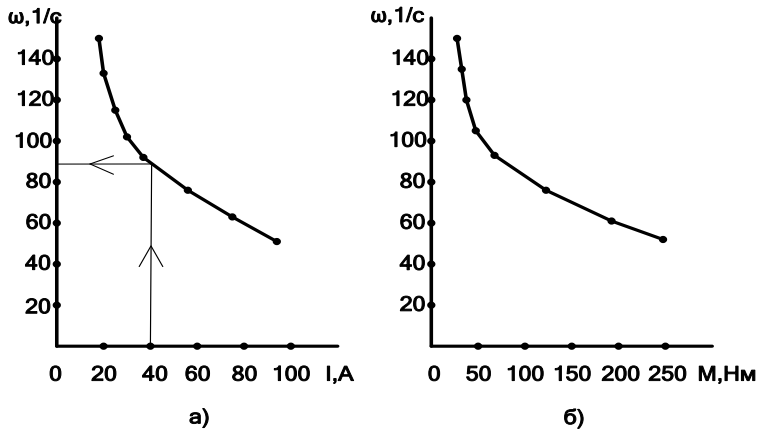


Рис.2.3. Природні електромеханічна (а) та механічна (б) характеристики двигуна Д31.

### Задача 2.11.

Для електроприводу механізму прийнятий двигун постійного струму з незалежним збудженням серії П-61:  $P_H = 14 \text{ кВт}$ ,

$I_H = 78A$ ,  $U_H = 220B$ ,  $\omega_H = 104,7c^{-1}$ ,  $R_{Я} = 0,172Ом$ ,  $R_{ДП} = 0,0655Ом$ ,  
 $J_{Д} = 0,4кгм^2$ .

Побудувати пускову діаграму електроприводу та визначити величини опорів ступенів пускового резистору.

**Розв'язок.**

Пусковий струм двигуна:

$$I_1 = (2...2,5)I_H = (2...2,5) \cdot 78 = 156...195A.$$

Струм перемикання двигуна:

$$I_2 = (1,1...1,2)I_H = (1,1...1,2) \cdot 78 = 85,8...93,6A.$$

Нехай  $I_1 = 165A$ , тоді при трьох ступенях пускового резистора струм перемикання:

$$I_2 = \sqrt[3]{\frac{I_1^4 R}{U_H}} = \sqrt[3]{\frac{165^4 \cdot 0,2375}{220}} = 92,8A$$

входить у заданий діапазон.

На рис.2.4 наведена пускова діаграма електроприводу.

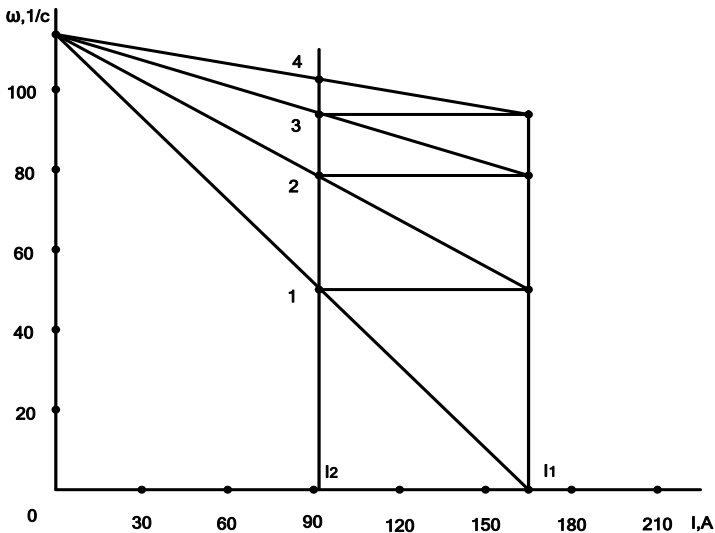


Рис.2.4. Пускова діаграма електроприводу.

Перепади швидкості між точками 1-2, 2-3, 3-4 за рис.2.4:

$$\Delta\omega_{12} = 28c^{-1}, \Delta\omega_{23} = 15c^{-1}, \Delta\omega_{34} = 9,5c^{-1}.$$

Величини опорів ступенів пускового резистора:

$$R_1 = \frac{c\Delta\omega_{12}}{I_2} = \frac{1,924 \cdot 28}{92,8} = 0,581 \text{ Ом},$$

$$R_2 = \frac{c\Delta\omega_{23}}{I_2} = \frac{1,924 \cdot 15}{92,8} = 0,311 \text{ Ом},$$

$$R_3 = \frac{c\Delta\omega_{34}}{I_2} = \frac{1,924 \cdot 9,5}{92,8} = 0,197 \text{ Ом}.$$

Опір пускового резистора:

$$R_{II} = R_1 + R_2 + R_3 = 0,581 + 0,311 + 0,197 = 1,089 \text{ Ом}.$$

Перевірка пускового струму за формулою:

$$I_1 = \frac{U_H}{R + R_{II}} = \frac{220}{0,2375 + 1,089} = 165,8 \text{ А}$$

свідчить про достатню точність розрахунку.

### **Задача 2.12.**

Для електроприводу механізму використовується електродвигун постійного струму незалежного збудження. Тип електродвигуна: П101.  $K_1=0,6$ ;  $K_2=0,6$ . Потрібно:

а) визначити час пуску електроприводу до кутової швидкості, що дорівнює номінальній кутовій швидкості обертання електродвигуна;

б) розрахувати і побудувати природню електромеханічну (швидкісну) характеристику двигуна;

в) визначити величини додаткових опорів, що включаються в коло якоря двигуна при переході його в режими динамічного гальмування і противмикання при умові, щоб пік струму, що виникає при цьому, не перевищував  $2I_n$ , а двигун при переключенні його в гальмівні режими працював на природній характеристиці з навантаженням:  $M_{c1} = k_1 M_n$ ;

г) визначити потужність двигуна в режимі його рекуперативного гальмування з активним моментом статичного опору  $M_{c2} = k_2 M_n$  при умові, що двигун працює в гальмівному режимі на природній механічній характеристиці.

Паспортні дані двигуна марки П101:  $U = 220 \text{ В}$ ;  $P_n = 55 \text{ кВт}$ ;

$n_{ном} = 1000 \text{ об/хв}$ ;  $I_{ном} = 286 \text{ А}$ ;  $n_{max} = 1500 \text{ об/хв}$ ;  $\eta = 0,875$ ;  $J = 2,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

**Розв'язок.**

Визначаємо час пуску двигуна:

$$t = J \frac{\omega_n}{M - M_c},$$

де  $\omega_n = \frac{\pi n_{ном}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ c}^{-1}$  - номінальна кутова частота обертання якоря двигуна.

Момент інерції приводу:

$$J = 1,5 \cdot J_{об} = 1,5 \cdot 2,5 = 3,75 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Номінальний момент двигуна

$$M_n = 9,55 \cdot \frac{P_n}{n_n} = 9,55 \cdot \frac{55000}{1000} = 525 \text{ Нм}.$$

Для нашого випадку час пуску двигуна визначиться за виразом

$$t = J \frac{\omega_n}{2M_n - M_c} = J \frac{\omega_n}{2M_n - k_1 M_n} = 3,75 \cdot \frac{104,7}{2 \cdot 525 - 0,6 \cdot 525} = 0,68 \text{ с}.$$

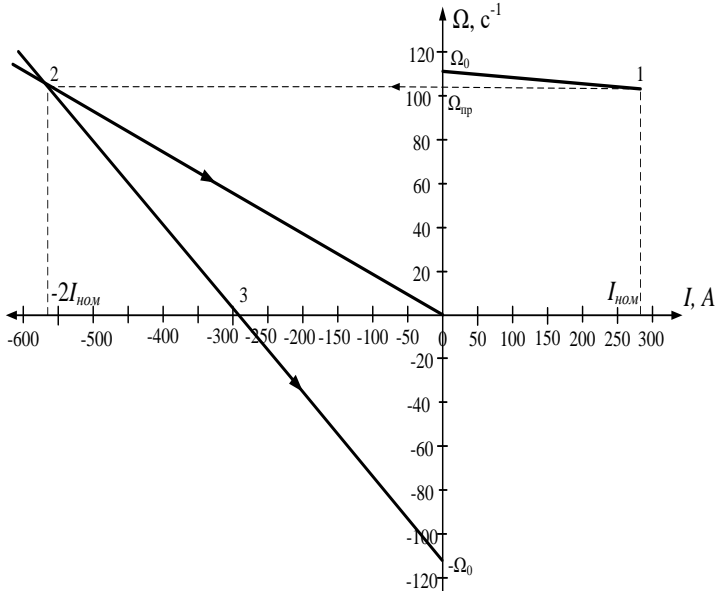


Рис.2.5. Електромеханічні характеристики ДПС.

*Розрахунок природньої електромеханічної характеристики двигуна:*

Опір якірного кола двигуна:

$$R_{я} = 0,5(1-\eta) \frac{U_{ном}}{I_{ном}} = 0,5 \cdot (1-0,875) \cdot \frac{220}{286} = 0,048 \text{ Ом.}$$

Рівняння характеристики має вигляд прямої:

$$c = \frac{U_{ном} - I_{ном} \cdot R_{я}}{\omega_{ном}} = \frac{220 - 286 \cdot 0,048}{104,7} = 1,97.$$

$$\omega = \frac{U_{ном} - I_{ном} \cdot R_{я}}{c} = \omega_0 - \Delta\omega = \frac{220}{1,97} - \frac{286 \cdot 0,048}{1,97} = 111,6 - 6,9 = 104,7 \text{ с}^{-1}.$$

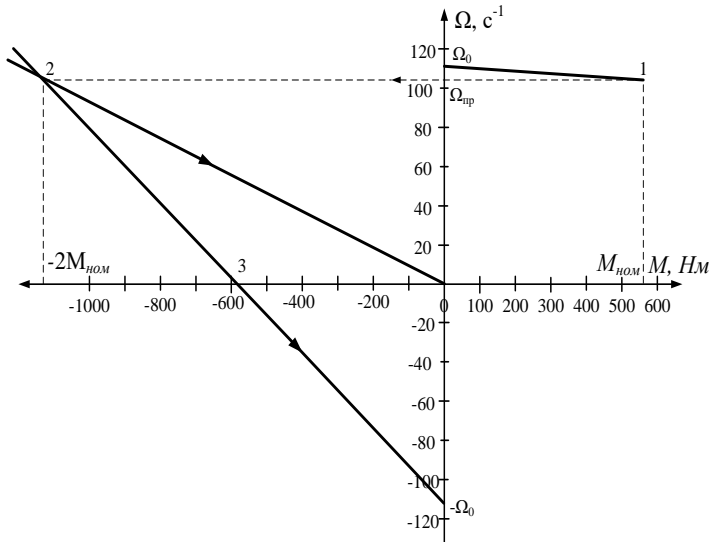


Рис.2.6. Механічні характеристики ДПС.

Опір динамічного гальмування

$$\omega_c = \frac{U_{ном} - I_{c1} \cdot (R_{я} + R_{\partial z})}{c} = \frac{U_{ном} - 2I_{н} \cdot (R_{я} + R_{\partial z})}{c};$$

$$R_{\partial z} = \frac{c \cdot \omega_c}{2I_{ном}} - R_{я} = \frac{1,97 \cdot 107,5}{2 \cdot 286} - 0,048 = 0,32 \text{ Ом.}$$

$$\omega_c = \frac{U_{ном} - I_{c1} \cdot R_{я}}{c} = \frac{U_{ном} - k_1 I_{н} \cdot R_{я}}{c} = \frac{220 - 0,6 \cdot 286 \cdot 0,048}{1,97} = 107,5 \text{ с}^{-1}.$$

Номинальна ЕРС якоря

$$E_{н} = K_E \Phi n_{ном} = \frac{pN}{60a} \frac{c2\pi a}{pN} n_{ном} = c\omega_{ном} = 1,97 \cdot 104,7 = 206 \text{ В.}$$

$$E_n = c\omega_c = 1,97 \cdot 107,5 = 211 \text{ В.}$$

Рівняння характеристики противмикання

$$\omega = -\omega_0 - \Delta\omega = -\omega_0 - \frac{-2I_{ном}(R_{я} + R_{ГП})}{c}.$$

Опір в режимі противмикання

$$R_{ГП} = \frac{c(\omega_0 + \omega_c)}{2I_{ном}} - R_{я} = \frac{1,97 \cdot (104,7 + 107,5)}{2 \cdot 286} - 0,048 = 0,73 - 0,048 = 0,68 \text{ Ом.}$$

### Задача 2.13.

Для електроприводу компресора вибрати двигун постійного струму незалежного збудження. Розрахувати та побудувати природну та штучні механічні характеристики при регулюванні швидкості: 1) напругою ( $U = 200 \text{ В}$ ), 2) введеним додатковим опором в колі якоря ( $R_{дод} = 10R_{ном}$ ), 3) зміною магнітного потоку ( $k\Phi = 0,75k\Phi_{ном}$ ).

#### Розв'язок.

Для побудови природної характеристики ДПС НЗ необхідно мати дві точки: точка ідеального холостого ходу ( $\omega_0$ ,  $M = 0$ ) та точка при номінальному моменті ( $\omega_{ном}$ ,  $M_{ном}$ ). Для побудови штучної характеристики двигуна необхідно дві точки  $\omega_0$  та  $\omega_c$ .

Розрахуємо характеристику при регулюванні швидкості підвведеною напругою.

Знайдемо точку ідеального холостого ходу ДПС НЗ

$$\omega_{0U} = \frac{U}{k\Phi_{ном}}.$$

$$\omega_{0U} = \frac{200}{1,33} = 150,4 \text{ 1/с.}$$

Так як при регулюванні швидкості підвведеною напругою величина падіння швидкості під навантаженням  $\Delta\omega_c$  не залежить від напруги живлення, тому

$$\omega_{cU} = \omega_{0U} - \frac{M_{ном} R_{я\sigma}}{k\Phi_{ном}^2}.$$

$$\omega_{cU} = 150,4 - \frac{87 \cdot 0,465}{1,33^2} = 127,5 \text{ с}^{-1}.$$

Розрахуємо характеристику двигуна при введенні додаткового

опору в колі якоря.

При регулюванні швидкості додатковим опором в ланцюзі якоря швидкість ідеального холостого ходу не залежить від сумарного опорю, тому

$$\omega_{0R} = \frac{U_{ном}}{k\Phi_{ном}}. \quad \omega_{0R} = \frac{230}{1,3} = 173 \text{ 1/с.}$$

Швидкість під навантаженням

$$\omega_{cR} = \omega_{0R} - \frac{M_{ном} \cdot (R_{я\Sigma} + R_{дод})}{k\Phi_{ном}^2}.$$

$$\omega_{cR} = 173 - \frac{87 \cdot (0,465 + 10 \cdot 0,465)}{1,33^2} = -78,61 \text{ /с.}$$

$$\omega_{cR} = 0, \quad M = 60 \text{ Нм.}$$

Розрахуємо характеристику при регулюванні швидкості двигуна при зміні магнітного потоку.

Швидкість ідеального холостого ходу

$$\omega_{0\Phi} = \frac{U_{ном}}{k\Phi}.$$

$$\omega_{0\Phi} = \frac{230}{0,75 \cdot 1,33} = 230,6 \text{ 1/с.}$$

Швидкість під навантаженням

$$\omega_{c\Phi} = \omega_{0\Phi} - \frac{M_{ном} \cdot R_{я\Sigma}}{k\Phi^2}.$$

$$\omega_{c\Phi} = 230,6 - \frac{87 \cdot 0,465}{(0,75 \cdot 1,33)^2} = 190 \text{ 1/с.}$$

За результатами будуємо характеристики (рис.2.7).

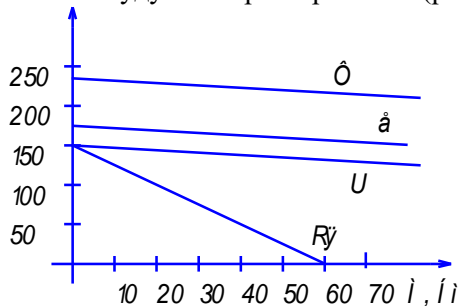


Рисунок 2.7. Механічні характеристики ДПС НЗ.



### ТЕМА 3. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

Трифазний асинхронний двигун має обмотку статора, що підключається до трифазної мережі змінного струму з напругою  $U_1$  та частотою  $f_1$ , й обмотку ротора, яка може бути виконана за двома варіантами: з фазним або з короткозамкненим ротором.

Електромеханічна характеристика асинхронного двигуна  $I'_2(s)$  може бути подана у вигляді

$$I'_2 = \frac{U_\phi}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + x_K^2}}, \quad (3.1)$$

де  $x_K = x_1 + x'_2$  - індуктивний фазний опір фази при короткому замиканні;  $U_\phi$  - фазна напруга;  $s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$  - ковзання.

На підставі закону енергетичного балансу та з врахуванням формули (3.1) можна отримати механічну характеристику асинхронного двигуна  $M(s)$ :

$$M = \frac{3U_\phi^2 R'_2}{\omega_0 s \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + x_K^2 \right]}. \quad (3.2)$$

Дослідження залежності (3.2) на екстремум свідчить про наявність двох екстремальних точок:

$$M_K = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 \left( R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + x_K^2} \right)}, \quad (3.3)$$

$$s_K = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + x_K^2}}, \quad (3.4)$$

причому знак «+» в (3.3) та (3.4) відноситься до області ковзання  $s > 0$ , а знак «-» - до  $s < 0$ .

Механічну характеристику можна подати по-іншому, а саме

$$M = \frac{2M_K(1 + as_K)}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} + 2as_K}, \quad (3.5)$$

де  $a = \frac{R_1}{R'_2}$ .

У деяких випадках при побудові механічної характеристики використовують наближені формули. В цьому випадку нехтують активним опором статора. Тоді вирази (3.5), (3.3) та (3.4) набувають вигляду

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}, \quad (3.6)$$

$$M_K = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 x_K}, \quad (3.7)$$

$$s_K = \pm \frac{R'_2}{x_K}. \quad (3.8)$$

Якщо в (3.6) підставити  $M = M_H$  й  $s = s_H$  та позначити кратність максимального моменту  $\lambda_M = \frac{M_K}{M_H}$ , то критичне ковзання

можна знайти за формулою

$$s_K = s_H \left( \lambda_M \pm \sqrt{\lambda_M^2 - 1} \right). \quad (3.9)$$

Формулу (3.9) можна використовувати при визначенні  $s_K$  за каталожними (паспортними) даними асинхронного двигуна.

### **Задача 3.1.**

Асинхронний двигун типу МТН-312-6 має такі паспортні дані:  $P_H = 17,5 \text{ кВт}$ ,  $U_{1H} = 380 \text{ В}$ ,  $n_H = 940 \text{ об/хв}$ ,  $f_{1H} = 50 \text{ Гц}$ ;  $I_{1H} = 43 \text{ А}$ ;  $R_1 = 0,34 \text{ Ом}$ ;  $x_1 = 0,43 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 0,12 \text{ Ом}$ ;  $x_2 = 0,25 \text{ Ом}$ ;  $k = 2,66$ .

Розрахувати та побудувати природні електромеханічну та механічну характеристики двигуна.

### **Розв'язок.**

Синхронна швидкість:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_{1H}}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{3} = 104,7 \text{ c}^{-1}.$$

Приведені до статора значення індуктивного та активного опорів обмотки ротора й індуктивний опір короткого замикання:

$$x'_2 = x_2 k^2 = 0,25 \cdot 2,66^2 = 1,769 \text{ Ом};$$

$$R'_2 = R_2 k^2 = 0,12 \cdot 2,66^2 = 0,849 \text{ Ом};$$

$$x_K = x_1 + x'_2 = 0,43 + 1,769 = 2,199 \text{ Ом}.$$

Для розрахунку електромеханічної характеристики  $I'_2(s)$  застосуємо формулу (2.11):

$$I'_2 = \frac{U_\phi}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + x_K^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(0,34 + \frac{0,849}{s}\right)^2 + 2,199^2}}.$$

Критичний момент та критичне ковзання двигуна за формулами (3.3) та (3.4)

$$M_K = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_K^2}\right)} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104,7 \cdot \left(0,34 + \sqrt{0,34^2 + 2,199^2}\right)} = 270 \text{ Нм}.$$

$$s_K = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + x_K^2}} = \frac{0,849}{\sqrt{0,34^2 + 2,199^2}} = 0,382.$$

Розрахунок механічної характеристики доцільно вести за формулою (3.2)

$$M = \frac{3U_\phi^2 R'_2}{\omega_0 s \left[ \left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + x_K^2 \right]} = \frac{1177,4/s}{\left(0,34 + \frac{0,849}{s}\right)^2 + 2,199^2}.$$

Результати розрахунку електромеханічної та механічної характеристики зведені у таблицю 3.1.

Таблиця 3.1

$s$	-2,6	-0,5	0	0,055	0,382	1	1,5
$\omega, \text{c}^{-1}$	376,9	157,1	104,7	98,9	64,7	0	-52,4
$I'_2, A$	100	85,1	0	13,8	65,2	88	92,5
$M, \text{Нм}$	-93,6	-353	0	84,4	270	188,4	138,8

За даними таблиці 3.1 будемо природні електромеханічну 1 та механічну 2 характеристики (рис.3.1)

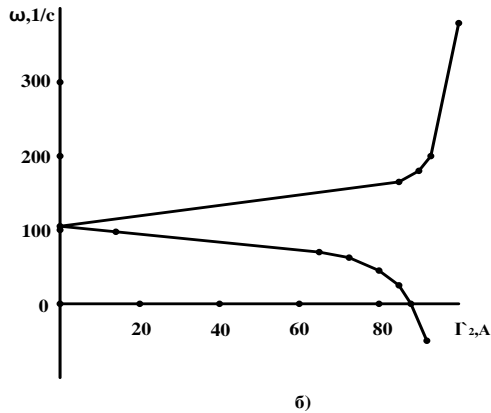
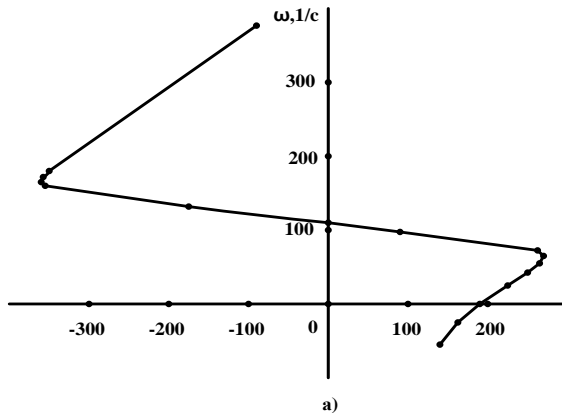


Рис.3.1. Електромеханічна та механічна характеристики асинхронного двигуна МТН-312-6.

### Задача 3.2.

Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу 4А160S має такі паспортні дані:  $P_H = 15 \text{кВт}$ ,  $U_{1H} = 380 \text{В}$ ,  $n_H = 1465 \text{об/хв}$ ,  $\lambda_M = \frac{M_K}{M_H} = 2,3$ ,  $\lambda_I = \frac{M_{1H}}{M_{1H}} = 7$ ;  $f_{1H} = 50 \text{Гц}$ ;  $I_{1H} = 29,3 \text{А}$ ;  $p = 2$ . Розрахувати природну механічну характеристику двигуна.

### Задача 3.3.

Трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором серії 4А має наступні номінальні дані, які вказані в таблиці.

Тип АД	$U_{1\text{нф}}$ , В	$P_{2\text{н}}$ , кВт	$s_{\text{н}}$ , %	$\eta_{\text{н}}$	$\cos\phi_{\text{н}}$	$K_{\text{п}}$	$K_{\text{мін}}$	$K_{\text{мак}}$
4АА56В4	220	0,18	8,9	0,64	0,64	2,1	1,5	2,2

де  $K_{\text{п}} = M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}}$  – пусковий коефіцієнт;  $K_{\text{мін}} = M_{\text{мін}} / M_{\text{ном}}$  – коефіцієнт мінімального моменту;  $K_{\text{мак}} = M_{\text{кр}} / M_{\text{ном}}$  – коефіцієнт перевантажувальної властивості.

Знайти швидкість ідеального холостого ходу ( $\omega_0$  і  $n_0$ ), номінальну швидкість АД ( $\omega_{\text{ном}}$  і  $n_{\text{ном}}$ ), номінальний момент ( $M_{\text{ном}}$ ), номінальний струм фази ( $I_{\text{ном}}$ ). За допомогою спрощеної формули Клосса розрахувати та побудувати механічну характеристику АД.

#### Розв'язок.

Визначимо швидкість холостого ходу ( $\omega_0$  і  $n_0$ ) АД.

Для визначення швидкості необхідно знати число пар полюсів. Для цього з типу АД знаходимо число полюсів  $2p = 4$  та число пар полюсів  $p = 2$ .

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f}{p}; \quad n_0 = \frac{60f}{p},$$

$$\omega_0 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 / 2 = 154 \text{ рад} / \text{с}, \quad n_0 = 60 \cdot 50 / 2 = 1500 \text{ об} / \text{хв}.$$

Визначимо номінальну швидкість ( $\omega_{\text{ном}}$  і  $n_{\text{ном}}$ ) АД

$$\omega_{\text{н}} = \omega_0 \cdot (1 - S_{\text{ном}} / 100), \quad n_{\text{н}} = n_0 \cdot (1 - S_{\text{ном}} / 100),$$

$$\omega_{\text{н}} = 154 \cdot (1 - 8,9 / 100) = 140,3 \text{ рад} / \text{с}$$

$$n_{\text{н}} = 1500 \cdot (1 - 8,9 / 100) = 1366,5 \text{ об} / \text{хв}$$

Визначимо номінальний момент

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}},$$

$$M_{\text{ном}} = 180 / 140,3 = 1,28 \text{ Нм}.$$

Визначимо номінальний струм фази АД

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{mU_{\phi} \cos\phi_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}}},$$

$$I_{\text{ном}} = \frac{180}{3 \cdot 220 \cdot 0,64 \cdot 0,64} = 0,67 \text{ А}.$$

За допомогою спрощеної формули Клосса розраховуємо

координати точок механічної характеристики та зносимо результати розрахунку в таблицю 3.2.

$$M_i = \frac{2 \cdot M_{кр}}{\frac{S_i}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S_i}},$$

де  $M_{кр} = K_M \cdot M_{ном} = 2,2 \cdot 1,28 = 2,82$  Нм.

$$S_{кр} = S_{ном} \cdot (K_M + \sqrt{K_M^2 - 1}) = 0,089 \cdot (2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,37.$$

Результати розрахунку механічної характеристики за формулою Клосса зносимо в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2. Механічна характеристика АД типу 4А80А2

$S_i$	0	0,089	0,1	0,37	0,4	0,6	0,8	0,9	1
$M_i$ , Нм	0	1,28	1,42	2,82	2,8	2,5	2,15	2	1,84

За даними розрахунку (табл.3.2) будемо природну механічну характеристику АД.

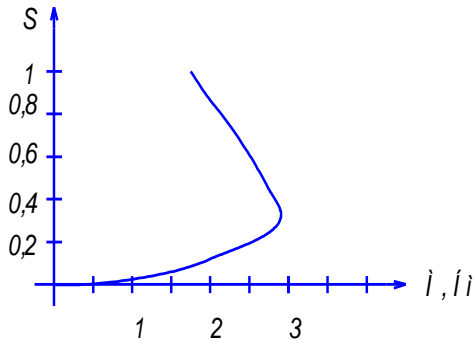


Рис.3.2. Природна механічна характеристика АД.

#### Задача 3.4.

Вибрати трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором серії 4А для приводу металорізального верстату. Розрахувати та побудувати механічну характеристику при регулюванні швидкості напругою ( $U = 0,75U_{ном}$ ,  $f = f_{ном}$ ).

#### Розв'язок.

Регулювання швидкості АД напругою живлення ( $U = 0,75U_{ном}$ ,  $f = f_{ном}$ ).

Згідно задачі 3.3 для розрахунку механічної характеристики АД при пониженій напрузі та незмінній частоті необхідно тільки перерахувати точки штучної характеристики за формулою

$$M_{ш} = M_n \cdot \left( \frac{U}{U_n} \right)^2$$

де  $M_{ш}$  – момент двигуна на штучній характеристиці при  $S_{ш}$ , Нм;  $M_n$  – момент на природній характеристиці, Нм;  $U$  – величина пониженої напруги, В;  $U_n$  – величина номінальної напруги, В.

Результати розрахунку штучної характеристики заносимо в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3. Механічна характеристика АД при  $U = 0,75U_{ном}, f = f_{ном}$ .

$S_n$	0	0,089	0,1	0,37	0,4	0,6	0,8	0,9	1
$M_n$ , Нм	0	1,28	1,42	2,82	2,81	2,52	2,15	2	1,84
$(U/U_n)^2$	$0,75^2$	$0,75^2$	$0,75^2$	$0,75^2$	$0,75^2$	$0,75^2$	$0,75^2$	$0,75^2$	$0,75^2$
$M_{ш}$ , Нм	0	0,72	0,8	1,59	1,58	1,42	1,2	1,12	1

За даними таблиць характеристики АД.

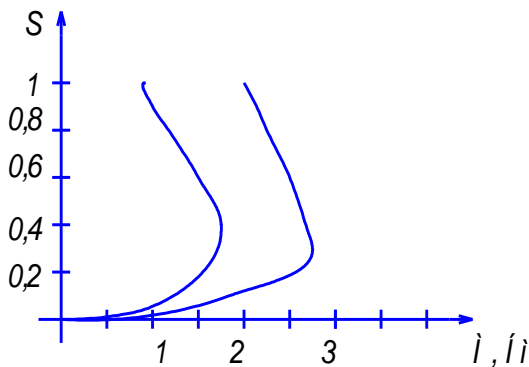


Рис.3.3. Природна та штучна характеристики АД.

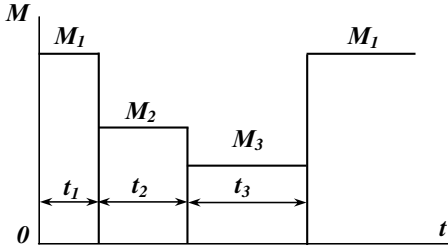
### Задача 3.5.

Визначити розрахункову потужність асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором для приводу механізму, за графіком моменту навантаження на валу двигуна, зображеному на рис.3.4. Швидкість обертання вала двигуна  $n_2 = 1470 \text{ об/хв}$ . Вибрати двигун за каталогом.

### Розв'язок.

Визначимо еквівалентний момент

$$M_E = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \sqrt{\frac{120^2 \cdot 80 + 80^2 \cdot 15 + 60^2 \cdot 10}{8 + 15 + 10}} = 86,6 \text{ Нм.}$$



$$M_1 = 120 \text{ Нм}; t_1 = 8 \text{ хв.}$$

$$M_2 = 80 \text{ Нм}; t_1 = 15 \text{ хв.}$$

$$M_3 = 60 \text{ Нм}; t_1 = 10 \text{ хв.}$$

Рис.3.4. Графік зміни навантажувального моменту на валу двигуна.

Розрахункова потужність двигуна дорівнює

$$P_p = P_E = 0,105 M_E. \quad n_{2H} = 0,105 \cdot 86,6 \cdot 1470 = 13,37 \text{ кВт.}$$

За величиною  $P_p = 13,37 \text{ кВт}$  вибираємо двигун 4А160S4У3,

що має такі дані:  $P_H = 15 \text{ кВт}$ ,  $n_2 = 1465 \text{ об/хв}$ ,  $K_M = 2,3$ .

Максимальний момент двигуна

$$M_{\max} = M_H K_M = 97,8 \cdot 2,3 = 225 \text{ Нм,}$$

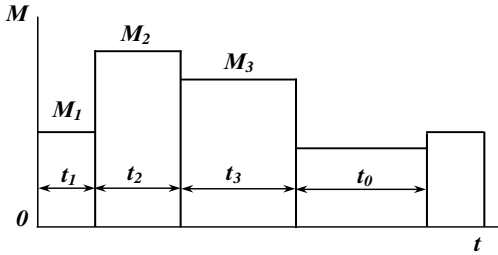
$$\text{де } M_H = 9,55 \frac{P_H}{n_{2H}} = 9,55 \frac{15 \cdot 10^3}{1465} = 97,8 \text{ Нм.}$$

Із графіка зміни навантажувального моменту величина найбільшого моменту дорівнює  $120 \text{ Нм}$ . Перевантажувальна здатність двигуна буде достатня, оскільки  $120 < 0,81 \cdot 225$ , де коефіцієнт  $0,81$  враховує пониження напруги на  $10\%$ .

### Задача 3.6.

Визначити розрахункову потужність та вибрати за каталогом трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором для приводу механізму, що працює у повторно-короткочасному режимі з графіком зміни навантажувального моменту на валу зображеним на рис.3.5. Швидкість обертання вала механізму дорівнює  $930 \text{ об/хв}$ . Перевірити двигун на перевантажувальну здатність.





$$M_1 = 40 \text{ Нм}; t_1 = 10 \text{ хв.}$$

$$M_2 = 80 \text{ Нм}; t_2 = 15 \text{ хв.}$$

$$M_3 = 60 \text{ Нм}; t_3 = 20 \text{ хв.}$$

$$t_0 = 35 \text{ с.}$$

Рис.3.5 Графік зміни навантажувального моменту на валу двигуна.

### Розв'язок.

Еквівалентний момент на валу дорівнює

$$M_E = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \sqrt{\frac{40^2 \cdot 10 + 80^2 \cdot 15 + 60^2 \cdot 20}{10 + 15 + 20}} = 63,9 \text{ Нм.}$$

Тривалість вмикання

$$TB = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_0} \cdot 100\% = \frac{10 + 15 + 20}{10 + 15 + 20 + 35} \cdot 100\% = 56,3\%.$$

Еквівалентна потужність дорівнює

$$P_E = 0,105 M_E n_2 = 0,105 \cdot 63,9 \cdot 930 = 6,24 \text{ кВт.}$$

Розрахункова потужність для стандартного  $TB_{CT} = 60\%$

$$P_P = P_E \sqrt{\frac{TB}{TB_{CT}}} = 6,24 \cdot \sqrt{\frac{56,3\%}{60\%}} = 6,0 \text{ кВт.}$$

Для  $TB_{CT} = 60\%$  вибираємо двигун 4АС132S6У3 з технічними даними:  $P_H = 6,0 \text{ кВт}$ ,  $n_{2H} = 935 \text{ об/хв}$ ,  $\eta_H = 0,8$ ,  $K_M = 2,1$ ,  $s_H = 6,4$ .

Максимальний момент двигуна дорівнює

$$M_{\max} = K_M M_H = 2,1 \cdot 61,3 = 128,7 \text{ Нм,}$$

$$\text{де } M_H = 9,55 \frac{P_H}{n_{2H}} = 9,55 \frac{6 \cdot 10^3}{935} = 61,3 \text{ Нм.}$$

Отже, перевантажувальна здатність двигуна достатня, оскільки  $80 \text{ Нм} < 0,81 \cdot 128,7 \text{ Нм}$ , де коефіцієнт 0,81 враховує пониження напруги на 10%.

### Задача 3.7.

Визначити розрахункову потужність асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором для приводу горизонтального транспо-

ртера, якщо момент статичного опору транспортера  $M_{CT} = 2000 \text{ Нм}$ , а частота обертання вала транспортера  $n_{BT} = 12 \text{ об/хв}$ . Передатне відношення редуктора  $i = 80$ ,  $\eta_{II} = 0,85$ .

**Розв'язок.**

Швидкість обертання ротора двигуна дорівнює

$$n_d = n_{BT} i = 12 \cdot 80 = 960 \text{ об/хв}.$$

Визначаємо момент статичного опору двигуна

$$M_{cd} = \frac{M_{CT}}{i \cdot \eta_{II}} = \frac{2000}{80 \cdot 0,85} = 29,4 \text{ Нм}.$$

Розрахункова потужність асинхронного двигуна

$$P_p = \frac{M_{cd} \cdot n_d}{9550} = \frac{29,4 \cdot 960}{9550} = 2,96 \text{ кВт}.$$

За каталогом вибираємо найближчий, більший за потужністю асинхронний двигун з короткозамкненим ротором з номінальною швидкістю обертання, що відповідає визначеній швидкості. Вибраним буде двигун типу 4АС112МА6У3 потужністю  $3 \text{ кВт}$  з швидкістю обертання ротора  $955 \text{ об/хв}$ .

**Задача 3.8.**

Розрахувати потужність асинхронного двигуна з фазним ротором кранової серії типу МТ111-6 для приводу транспортера.

Паспортні дані двигуна типу МТ111-6:

$P_n=3,5 \text{ кВт}$	Статор:	Ротор:
$n_n=915 \text{ об/хв}$ .	$I_{сн}=10,5 \text{ А}$	$I_{pn}=13,7 \text{ А}$
$U_n=380 \text{ В}$	$I_{сх}=6,6 \text{ А}$	$E_{pn}=181 \text{ В}$
$M_k/M_n=2,3$	$r_c=2,16 \text{ Ом}$	$r_p=0,525 \text{ Ом}$
$\cos \varphi_n = 0,70$	$x_c=2,03 \text{ Ом}$	$x_p=0,755 \text{ Ом}$
$\cos \varphi_n = 0,11$		$k_e=1,96$

Розрахунок і побудова природних і реостатних характеристик  $\omega = f(M)$  і  $\omega = f(I_2)$ .

Якщо механічна характеристика проходить через точку  $\omega_c = 0,5\omega_n$ ,  $M_c = M_n$ . Визначимо параметри резистора. Побудуємо пускову діаграму при пуску в 3 ступені. Визначимо параметри пускових резисторів:

$$r'_p = r_p \cdot k_e^2 = 0,525 \cdot 1,96^2 = 2,017 \text{ Ом.}$$

$$x'_p = x_p \cdot k_e^2 = 0,755 \cdot 1,96^2 = 2,9 \text{ Ом.}$$

$$x_{\Sigma} = x_c + x'_p = 2,03 + 2,9 = 4,93 \text{ Ом.}$$

Природня механічна характеристика будується за чотирма точками

$$1) \omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,141 \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ с}^{-1}.$$

$$2) \omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,141 \cdot 915}{30} = 95,82 \text{ с}^{-1}.$$

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{3500}{95,82} = 36,53 \text{ Нм.}$$

$$3) M_{\max} = 2,3 \cdot M = 2,3 \cdot 36,53 = 84,01 \text{ Нм.}$$

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{104,7 - 95,82}{104,7} = 0,085.$$

$$S_{\max} = S_{\text{ном}} \left( \lambda_{\max} + \sqrt{\lambda_{\max}^2 - 1} \right) = 0,085 \cdot \left( 2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1} \right) = 0,371.$$

$$\omega_{\max} = \omega_0 (1 - S_{\max}) = 104,7 \cdot (1 - 0,371) = 65,86 \text{ с}^{-1}.$$

$$4) M_{\Pi} = 1,2 M_{\text{ном}} = 1,2 \cdot 36,53 = 43,84 \text{ Нм.}$$

Електромеханічна характеристика побудована за формулою

$$I_2' = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{(r_c + r'_p / S)^2 + x_{\Sigma}^2}} = \frac{220}{\sqrt{(2,16 + 2,017 / S)^2 + 4,93^2}}.$$

Пускова діаграма:

$$M_1 = 0,8 M_K = 67 \text{ Нм; } M_2 = 40 \text{ Нм.}$$

Графічно визначимо  $r_1 = 1,31 \text{ Ом; } r_2 = 0,787 \text{ Ом; } r_3 = 0,682 \text{ Ом.}$

$$r_{\Pi} = r_{\text{оод}} = r_1 + r_2 + r_3 = 1,312 + 0,7875 + 0,6825 = 2,782 \text{ Ом.}$$

Для розрахунку реостатної характеристики, що проходить через точку  $\omega_c = 0,5 \cdot \omega_H = 47,91 \text{ с}^{-1}$ ;  $M_c = M_H$  визначимо додатковий опір

$$R'_o = r'_p \cdot \left( \frac{S_u}{S_e} - 1 \right) = 2,017 \cdot \left( \frac{0,542}{0,085} - 1 \right) = 10,84 \text{ Ом.}$$

де

$$S_u = \frac{\omega_0 - \omega_u}{\omega_0} = \frac{104,7 - 47,91}{104,7} = 0,542.$$

$$S_{ки} = \frac{r'_p + r'_d}{\sqrt{r'_c{}^2 + x'_k{}^2}} = \frac{2,017 + 10,84}{\sqrt{2,16^2 + 4,93^2}} = 2,388.$$

$$a = \frac{r'_c}{r'_p + r'_d} = \frac{2,16}{2,017 + 10,84} = 0,168.$$

$$M_{max} = 2,3 \cdot M_n = 2,3 \cdot 36,53 = 84,01 \text{ Нм}.$$

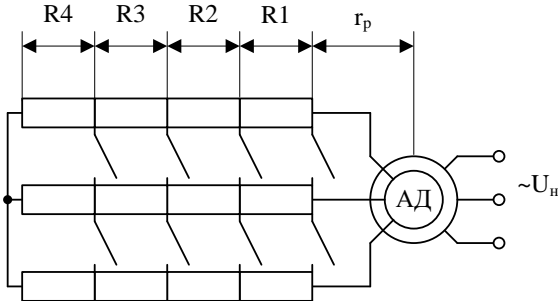


Рис.3.6. Схема ввімкнення АД з пусковими опорами в чотири ступені.

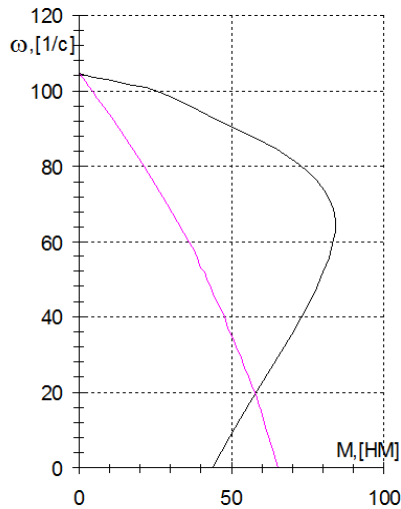


Рис.3.7. Природня і реостатна механічні характеристики АД.

Рівняння механічної характеристики:

$$M = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + a \cdot S_{ки})}{\frac{S}{S_{ки}} + \frac{S_{ки}}{S} + 2 \cdot a \cdot S_{ки}} = \frac{2 \cdot 84,01 \cdot (1 + 0,168 \cdot 2,388)}{\frac{S}{2,388} + \frac{2,388}{S} + 2 \cdot 0,168 \cdot 2,388}.$$

Рівняння електромеханічної характеристики

$$I_2' = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(r_c + \frac{r_p' + r_d'}{S}\right)^2 + x_k'^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(2,16 + \frac{2,017 + 10,84}{S}\right)^2 + 4,93^2}}$$

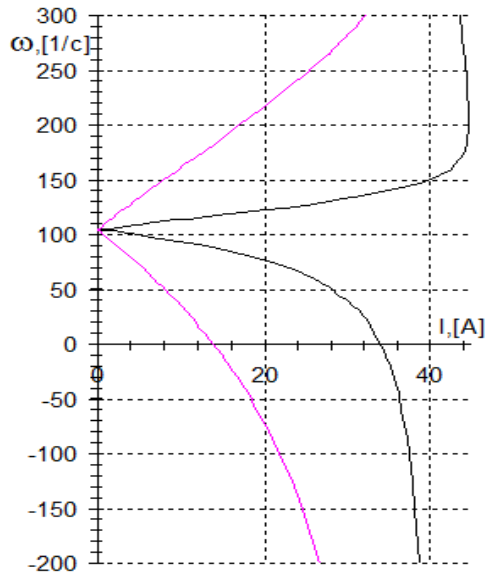


Рис.3.8. Природня і реостатна електромеханічні характеристики.

#### ТЕМА 4. РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Регулювання швидкості руху виконавчих органів здійснюється у багатьох механізмах. За допомогою електроприводу забезпечуються різні швидкості руху виконавчих органів, стабілізація швидкості на заданому рівні, а також зміна швидкості. Керування рухом виконавчих органів сучасних робочих машин та механізмів у більшості випадків досягається за рахунок цілеспрямованої дії на двигун за допомогою системи керування, що дозволяє регулювати швидкості двигуна та виконавчого органу.

Регулювання швидкості оцінюється шістьма основними показниками.

*Діапазон регулювання.* Цей показник визначається відношенням максимальної швидкості  $\omega_{\max}$  до мінімальної  $\omega_{\min}$  :

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}$$

при заданій точності регулювання та ладанних межах зміни статичного моменту  $M_C$ .

*Стабільність швидкості.* Цей показник характеризує зміну швидкості  $\Delta\omega$  при можливих коливаннях статичного моменту  $\Delta M_C$  на валу двигуна та визначається жорсткістю механічних характеристик двигуна. Чим вона більша, тим стабільніша швидкість при змінах статичного момента й навпаки.

*Плавність регулювання швидкості.* Цей показник визначається зміною швидкості при переході від одної штучної характеристики на іншу. Часто для оцінки показника вводять поняття коефіцієнта плавності регулювання:

$$\varphi_{\omega} = \frac{\omega_i}{\omega_{i-1}},$$

де  $\omega_i, \omega_{i-1}$  - значення швидкості двигуна на  $i$ - й та  $i-1$ -й ступенях регулювання, причому  $\omega_i > \omega_{i-1}$ ;  $\lim_{\omega_i \rightarrow \omega_{i-1}} \varphi_{\omega} = 1$ . Чим більше в заданому діапазоні регулювання швидкості може бути отримано штучних характеристик, тим плавніше буде здійснюватись регулювання швидкості.

*Напрямок регулювання швидкості.* Залежно від способу впливу на двигун розрізняють регулювання швидкості ввєрх від основної та вниз від основної.

*Допустиме навантаження двигуна.* Електричний двигун розрахований й спроектований таким чином, що, працюючи на природній характеристиці з номінальними швидкістю, струмом, моментом та потужністю, він не нагрівається вище допустимої температури, на яку розрахована його ізоляція. Оскільки нагрів двигуна визначається втратами енергії у ньому, пропорційним квадрату струму, його нормативний нагрів буде мати місце при протіканні допустимого струму двигуна. Зазначимо при цьому, що крім величини струму нагрів визначається й умовами охолодження.

При регулюванні швидкості двигун працює вже на штучних характеристиках. Для збереження нормативного нагріву двигуна

навантаження двигуна має бути таким, при якому в двигуні протікає струм не вище допустимого. При правильному виборі способу регулювання швидкості двигун повністю використовується за своїми енергетичними показниками на всьому діапазоні зміни.

*Економічність регулювання швидкості.* Цей показник оцінюється за капітальними та експлуатаційними витратами.

У ряді випадків капітальні витрати оцінюються непрямими методами, наприклад за встановленою потужністю.

Експлуатаційні витрати, як правило, оцінюються непрямим методом, головним чином за енергетичними показниками: коефіцієнтом корисної дії (ККД) й коефіцієнтом потужності при регулюванні швидкості. У загальному випадку ККД та коефіцієнт потужності є функціями кутової швидкості  $\eta(\omega)$  й  $\cos \varphi(\omega)$ , в їх середні значення визначаються за формулами:

$$\eta_{CP} = \frac{1}{\omega_{\max} - \omega_{\min}} \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \eta(\omega) d\omega,$$

$$\cos \varphi_{CP} = \frac{1}{\omega_{\max} - \omega_{\min}} \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \cos \varphi(\omega) d\omega.$$

#### **Задача 4.1.**

Паспортні дані двигуна постійного струму з незалежним збудженням подані у задачі 2.4. Визначити магнітний потік та струм збудження, за якими штучна механічна характеристика пройде через точку з координатами  $\omega_{III} = 250 \text{ c}^{-1}$ ,  $M_{III} = 15 \text{ Нм}$ .

#### **Розв'язок.**

Рівняння (2.2) з врахуванням того, що  $R = R_{\mathcal{R}}$  та  $U = U_H$ , можна подати таким чином

$$\omega_{III} (k\Phi_{III})^2 - U_H k\Phi_{III} + M_{III} R_{\mathcal{R}} = 0.$$

Це рівняння має два кореня:

$$(k\Phi_{III})_{1,2} = \frac{U_H}{2\omega_{III}} \pm \sqrt{\frac{U_H^2}{4\omega_{III}^2} - \frac{M_{III} R_{\mathcal{R}}}{\omega_{III}}} = \frac{220}{2 \cdot 250} \pm \sqrt{4 \cdot 250^2 - \frac{4 \cdot 15 \cdot 0,38}{250}};$$

$$(k\Phi_{III})_1 = 0,12 \text{ Вс}; (k\Phi_{III})_2 = 0,76 \text{ Вс}.$$

Доцільно вибрати більший корень, оскільки при цьому

момент двигуна  $M_{ш}$  буде забезпечений при меншому струмі якоря.

Для визначення струму збудження  $I_{зш}$  розрахуємо відносну величину знайденого магнітного потоку  $\frac{(k\Phi_{ш})_2}{(k\Phi_H)} = \frac{0,76}{1,343} = 0,566$ , за якою за допомогою кривої намагнічування на рис.4.1. визначаємо відносний струм збудження  $I_{зш}^* = \frac{I_{зш}}{I_{зН}} = 0,54$ . Шуканий струм збудження

$$I_{зш} = I_{зш}^* I_{зН} = 0,54 \cdot 0,8 = 0,432 A.$$

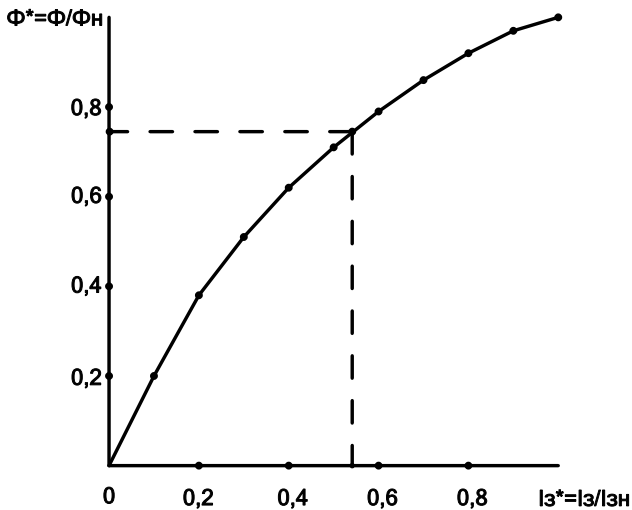


Рис.4.1. Крива намагнічування двигуна постійного струму у відносних одиницях.

#### Задача 4.2.

Для розглянутого в задачі 4.1 двигуна постійного струму з незалежним збудженням визначити магнітний потік, струм збудження та опір додаткового резистора у колі обмотки збудження, при яких швидкість ідеального неробочого ходу на природній характеристиці буде на 75% більше за швидкість ідеального неробочого ходу на природній характеристиці.



### Задача 4.3.

Двигун постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПФ250 має такі паспортні дані:  $P_H = 45 \text{ кВт}$ ,  $I_H = 233 \text{ А}$ ,  $U_H = 220 \text{ В}$ ,  $n_H = 1000 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ ,  $R_{\text{я}} = 0,07 \text{ Ом}$ . Розрахувати та побудувати електромеханічну й механічну характеристики двигуна при його живленні від тиристорного перетворювача з внутрішнім опором  $R_{\text{п}} = 0,1 \text{ Ом}$  при  $E_{\text{п}} = U_H$ . Визначити величину  $E_{\text{п}}$  при якій механічна характеристика пройде через точку з координатами  $\omega_{\text{ш}} = 30 \text{ с}^{-1}$ ;  $M_{\text{ш}} = 400 \text{ Нм}$  та побудувати цю характеристику. Визначити для розрахованої  $E_{\text{п}}$  кут керування тиристорами  $\alpha$ , прийнявши  $E_{\text{ср0}} = 220 \text{ В}$ .

### Задача 4.4.

Для двигуна Д31 (задача 2.11) розрахувати опір додаткового опору  $R_{\text{д}}$ , при якому електромеханічна характеристика пройде через точку з координатами  $\omega_{\text{ш}} = 50 \text{ с}^{-1}$ ,  $I_{\text{ш}} = 40 \text{ А}$ , та побудувати цю характеристику.

#### Розв'язок.

Сумарний опір обмоток якоря та збудження двигуна

$$R_{\text{я}} + R_{\text{оз}} = \frac{0,75 U_H (1 - \eta_H)}{I_H} = \frac{0,75 \cdot 220 (1 - 0,78)}{46,5} = 0,78 \text{ Ом.}$$

За природною характеристикою 1 (див. рис.2.2,а) для струму  $I_{\text{ш}} = 40 \text{ А}$  знайдемо  $\omega_{\text{п}} = 90 \text{ с}^{-1}$ .

Додатковий опір

$$R_{\text{д}} = \left( 1 - \frac{\omega_{\text{ш}}}{\omega_{\text{п}}} \right) \left( \frac{U_H}{I_{\text{ш}}} - R_{\text{я}} - R_{\text{з}} \right) = \left( 1 - \frac{50}{90} \right) \left( \frac{220}{40} - 0,78 \right) = 2,1 \text{ Ом.}$$

Задавшись низкою значень струму, за природною характеристикою 1 (рис.2.2,а) визначимо значення швидкості  $\omega_{\text{п}}$ . Далі за формулою

$$\omega_{\text{ш}} = \omega_{\text{п}} \frac{U_H - I_{\text{ш}} (R_{\text{я}} + R_{\text{оз}} + R_{\text{д}})}{U_H - I_{\text{ш}} (R_{\text{я}} + R_{\text{оз}})}$$

обчислимо швидкості на штучній характеристиці 2  $\omega_{\text{ш}}$  для тих

самих струмів. Результати розрахунків зведемо у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1

$I, A$	20	40	60	80	100
$\omega_{II}, c^{-1}$	130	90	74	60	48
$\omega_{III}, c^{-1}$	103	50	20	-4	-23

На підставі табл.4.1 можна побудувати природну електро-механічну характеристику.

#### **Задача 4.5.**

Для двигуна ДЗ1 (задача 4.4) розрахувати  $R_d$ , вмикання якого у коло якоря двигуна дозволить знизити швидкість двигуна у 3 рази при номінальному моменті навантаження.

#### **Задача 4.6.**

Для двигуна ДЗ1 (задача 4.4) знайти величину резистора  $R_d$ , вмикання якого у коло якоря двигуна дозволить знизити струм двигуна у перший момент пуску до рівня  $2I_H$ .

#### **Задача 4.7.**

Для двигуна ДЗ1 (задача 4.4) визначити опір резистора  $R_d$ , при вмиканні якого механічна характеристика пройде через точку з координатами  $\omega_{III} = 0, 2\omega_H$ ,  $M_{III} = 0, 9M_H$ .

#### **Задача 4.8.**

Для асинхронного двигуна типу 4A160S (задача 3.1) розрахувати  $R_{1d}$ , вмикання якого у три фази обмотки статора двигуна зменшить пусковий струм у 2 рази ( $\alpha = 0,5$ ).

#### **Розв'язок.**

Пусковий струм асинхронного двигуна при відсутності резисторів у колі статора

$$I_{1III} = \lambda_1 I_{1H} = 7 \cdot 29,3 = 205 A.$$

Повний опір короткого замикання

$$z_K = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3}I_{1III}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 205} = 1,07 \text{ Ом}.$$

За рис.4.2 знайдемо  $\cos \varphi_{II} = 0,4$ . Після цього визначаємо активний та реактивний опори короткого замикання

$$r_K = z_K \cos \varphi_{II} = 1,07 \cdot 0,4 = 0,428 \text{ Ом},$$

$$x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2} = \sqrt{1,07^2 - 0,428^2} = 0,981 \text{ Ом}.$$

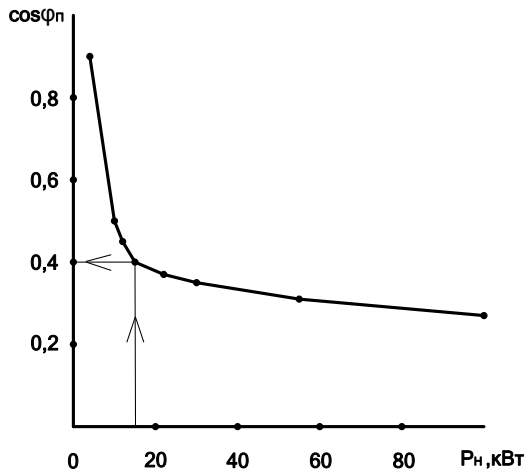


Рис.4.2. Графік залежності коефіцієнта потужності асинхронних двигунів від номінальної потужності в режимі короткого замикання.

Шуканий опір дорівнює

$$R_{1Д} = \sqrt{\left(\frac{z_K}{\alpha}\right)^2 - x_K^2} - r_K = \sqrt{\left(\frac{1,07}{0,5}\right)^2 - 0,981^2} - 0,428 = 1,474 \text{ Ом}.$$

#### Задача 4.9.

Для асинхронного двигуна типу МТН-312-6 (задача 3.1) розрахувати додатковий опір  $R_{2Д}$ , при вмиканні якого у коло ротора механічна характеристика пройде через точку з координатами  $\omega_{III} = 0,6\omega_H$ ,  $M_{III} = 0,9M_H$ . Розрахувати та побудувати цю штучну характеристику.

#### Задача 4.10.

Для асинхронного двигуна типу 4A160S (задача 2.12) розрахувати опір  $R_{1д}$ , вмикання якого у коло обмотки статора двигуна забезпечить зниження пускового моменту на 20%.

#### Задача 4.11.

Для асинхронного двигуна типу МТН-312-6 (задача 2.11) розрахувати додатковий опір  $R_{2д}$ , вмикання якого у коло ротора дозволить отримати пусковий момент двигуна рівний критичному.

#### Задача 4.12.

Для електроприводу токарного верстату прийнятий асинхронний двигун типу МТК-31-6, паспортні дані якого наступні:

$$P_H = 11 \text{ кВт}, \quad U_\phi = 220 \text{ В}, \quad n_H = 920 \text{ об/хв}, \quad \lambda = \frac{M_K}{M_H} = 3,4, \quad \cos \varphi_H = 0,73,$$

$$R_1 = 0,415 \text{ Ом}, \quad X_1 = 0,467 \text{ Ом}, \quad R'_2 = 0,824 \text{ Ом}, \quad X'_2 = 0,708 \text{ Ом}.$$

Розрахувати та побудувати механічні характеристики двигуна при частотному регулюванні швидкості для частот  $f_1 = 50 \text{ Гц}$ ,

$$f_2 = 25 \text{ Гц}, \quad f_3 = 12,5 \text{ Гц}, \quad \text{якщо закон регулювання } \frac{U}{f} = \text{const}, \quad \text{й}$$

визначити швидкості та потужності двигуна при умові, що момент опору механізму, приведений до валу двигуна,  $M_C = 1,26 M_H$ .

#### Розв'язок.

Оскільки реактивний опір кола намагнічування асинхронного двигуна  $X_0$  набагато більший за реактивні опори кола статора  $X_1$  та кола ротора  $X'_2$ , то можна нехтувати коефіцієнтами розсіювання в асинхронному двигуні. В цьому випадку механічну характеристику  $n = f(M)$  при частотному регулюванні можна розраховувати за формулами:

$$M = \frac{3U_\phi^2}{\omega_{1H}} \cdot \frac{R'_2 s_a}{2R_1 R'_2 f_* s_a + \left[ R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2 f_*^2 \right] s_a^2 + R_2'^2 f_*^2},$$

$$n = n_0 (1 - s_a),$$

де  $f_* = \frac{f_1}{f_{1H}}$  - відносна частота напруги статора;  $s_a$  - абсолютне ковзання асинхронного двигуна.

При  $f_{*1} = 1$ ,  $f_{*2} = 0,5$  та  $f_{*3} = 0,25$  розрахункові формули для визначення природної та штучних механічних характеристик асинхронного двигуна при частотному регулюванні швидкості, якщо закон регулювання  $\frac{U_1}{f_1} = \frac{220}{50} = 4,4$ , то відповідно

$$M_1 = \frac{1142,524 \cdot s_a}{0,684 \cdot s_a + 1,553 \cdot s_a^2 + 0,679},$$

$$n = 1000(1 - s_a),$$

$$M_2 = \frac{285,631 \cdot s_a}{0,342 \cdot s_a + 0,517 \cdot s_a^2 + 0,170},$$

$$n = 500(1 - s_a),$$

$$M_3 = \frac{71,408 \cdot s_a}{0,171 \cdot s_a + 0,259 \cdot s_a^2 + 0,042},$$

$$n = 250(1 - s_a).$$

Результати розрахунків за цими формулами наведені в табл.4.2, табл.4.3, табл.4.4.

Таблиця 4.2

$s_a$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,66	0,8	0,9	1
$n$ , об/хв	1000	900	800	700	600	500	339	200	100	0
$M_1$ , Нм	0	150	260	335	381	405	417,4	412	403	392

Таблиця 4.3

$s_a$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,57	0,7	0,8	0,9	1
$n$ , об/хв	500	450	400	350	300	213,5	150	100	50	0
$M_2$ , Нм	0	137	221	269	293	306	302	295	287	278

Таблиця 4.4

$s_a$	0	0,1	0,2	0,3	0,405	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$n$ , об/хв	250	225	200	175	148,8	100	75	50	25	0
$M_3$ , Нм	0	115	164	183	188	180	173	166	158	151

За даними табл.4.2, табл.4.3 та табл.4.4 на рис.4.3 побудовані природна та штучні механічні характеристики.

При  $M_C = 1,26 \cdot 114,2 = 145,0 \text{ Нм}$  за графіками на рис.4.3 знайдемо швидкості двигуна:  $n_1 = 910 \text{ об/хв}$ ,  $n_2 = 450 \text{ об/хв}$ ,  $n_3 = 210 \text{ об/хв}$ .

Потужності двигуна при роботі з  $M_C = 145,0 \text{ Нм}$ :

$$P_1 = \frac{M_C n_1}{9550} = \frac{145,0 \cdot 910}{9550} = 13,8 \text{ кВт}.$$

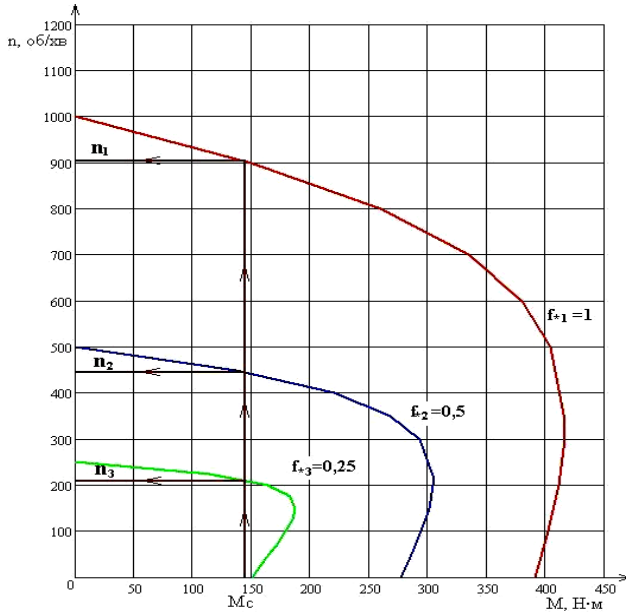


Рис.4.3. Природна та штучні механічні характеристики асинхронного двигуна при частотному регулюванні швидкості.

$$P_2 = \frac{M_C n_2}{9550} = \frac{145,0 \cdot 450}{9550} = 6,8 \text{ кВт},$$

$$P_3 = \frac{M_C n_3}{9550} = \frac{145,0 \cdot 210}{9550} = 3,2 \text{ кВт}.$$

## ТЕМА 5. АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ТА МОМЕНТУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

У розімкнених системах регулювання через значний перепад кутової швидкості при зміні навантаження на валу двигуна не можна отримати значний діапазон регулювання швидкості та забезпечити високу точність регулювання. У розімкненій системі при заданому сигналі на вході вихідна величина – кутова швидкість визначається параметрами двигуна та навантаженням на його валу, тому її зміна не компенсується при різних збуреннях, які практично завжди існують. У розімкненій системі також не можна отримати високої точності підтримання моменту, що розвивається приводом.

Для розширення діапазону регулювання та підвищення точності використовуються замкнені системи регулювання. Ідея замкнених систем регулювання полягає у тому, що в системі автоматично компенсується вплив збурюючих факторів й кутова швидкість або момент двигуна можуть з великою точністю підтримуватись на потрібному рівні. Система автоматичного регулювання, в якій коло впливів замикається, характеризується наявністю зворотних зв'язків; вона має, по крайній мірі, один зворотний зв'язок, що з'єднує вихід системи з її входом. Крім того, можуть бути, так звані локальні зворотні зв'язки, що з'єднують вихід та вхід окремих елементів системи автоматичного регулювання (САР).

У системах автоматичної стабілізації частоти обертання (рис.5.1) двигун Д живиться від керованого перетворювача П.

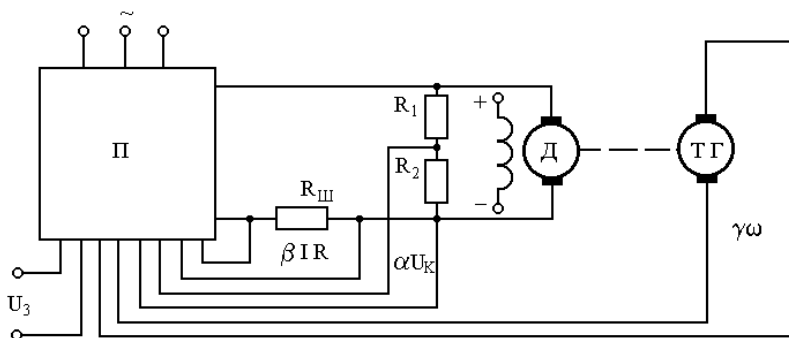


Рис.5.1. Принципова схема замкненої системи керування електроприводом.

Основною характеристикою перетворювача є характеристика

неробочого ходу, а саме залежність е.р.с. перетворювача  $E_{II}$  від напруги керування  $U_K$ . Розрахунок характеристики  $E_{II} = f(U_K)$  виконується аналітичним або графічним методом за відомими характеристиками окремих елементів перетворювача з врахуванням їх нелінійностей. При цьому середнє значення е.р.с. тиристорного перетворювача визначається залежно від кута керування:

$$E_{II} = \sqrt{2} \cdot E_{2T} \cdot \frac{m}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m} \cdot \cos \alpha = f(\alpha), \quad (5.1)$$

де  $E_{2T}$  – вторинна фазова е.р.с. трансформатора;  $m$  – кількість фаз випрямлення;  $\alpha$  – кут керування.

Залежність  $E_{II} = f(U_K)$  можна також подати як

$$E_{II} = K_{II}(U_K) \cdot U_K, \quad (5.2.)$$

де  $K_{II}(U_K)$  – коефіцієнт передачі перетворювача за напругою.

Залежно від діапазону регулювання та необхідної точності підтримання швидкості обертання двигуна при зміні його навантаження в системах «перетворювач-двигун» використовуються жорсткі зворотні зв'язки: від'ємні зв'язки за швидкістю або за напругою та їх комбінації з позитивним зв'язком за струмом.

Вираз для сигналу на вході перетворювача можна записати таким чином

$$U_K = U_3 - K_\omega \omega - K_U U_d + K_I IR, \quad (5.3)$$

де  $\omega, U_d, I$  – швидкість, напруга та струм двигуна;  $R$  – повний опір кола перетворювач-двигун;  $K_\omega, K_U, K_I$  – коефіцієнти передачі зворотніх зв'язків за швидкістю, напругою та струмом.

Опір кола перетворювач-двигуна містить еквівалентний опір перетворювача  $R_{II}$ , опір двигуна  $R_d$ , шунта  $R_{III}$ , реакторів  $R_p$  та з'єднувальних проводів.

Еквівалентний опір перетворювача для схеми з трансформатором дорівнює

$$R_{II} = r_T + \frac{x_T m}{2\pi}, \quad (5.4)$$

де  $r_T, x_T$  – приведені активний та індуктивний опори трансформатора.

Коефіцієнти передачі зворотніх зв'язків за швидкістю,



напругою та струмом двигуна

$$K_{\omega} = \frac{U_{\text{ТГ}}}{\omega}; K_U = \frac{R_2}{R_1 + R_2}; K_I = \frac{R_{\text{Ш}}}{R}, \quad (5.5)$$

де  $U_{\text{ТГ}}$  - напруга тахогенератора;  $R_1, R_2$  - опори дільника напруги.

Розв'язок рівнянь (2.2) та (2.3) дозволяє отримати рівняння електромеханічної характеристики двигуна у розімкненій системі

$$\omega = \frac{E_{\text{П}} - \Delta U - IR}{c} = K_{\text{Д}} (E_{\text{П}} - \Delta U - IR), \quad (5.6)$$

де  $\Delta U = \Delta U_{\text{В}} + \Delta U_{\text{Ш}}$  - спад напруги в колі перетворювач-двигун, який не залежить від струму навантаження (в переході тиристора  $\Delta U_{\text{В}} = 0,5 \dots 1$  В, на щітках двигуна  $\Delta U_{\text{Ш}} \approx 2$  В);  $c$  - коефіцієнт двигуна;  $K_{\text{Д}}$  - коефіцієнт передачі двигуна.

Враховуючи співвідношення

$$U_{\text{Д}} = \frac{\omega}{K_{\text{Д}}} + IR + \Delta U_{\text{Ш}}, \quad (5.7)$$

отримаємо загальне рівняння електромеханічної характеристики в замкненій системі

$$\omega = \frac{\left[ (U_3 - K_U \Delta U_{\text{Ш}}) \cdot K_{\text{П}}(U_{\text{К}}) - \Delta U \right] \cdot K_{\text{Д}}}{1 + (K_{\omega} K_{\text{Д}} + K_U) \cdot K_{\text{П}}(U_{\text{П}})} - \frac{I \cdot R \cdot K_{\text{Д}} \left[ 1 + \left( K_U \frac{R_{\text{Д}}}{R} - K_I \right) \cdot K_{\text{П}}(U_{\text{К}}) \right]}{1 + (K_{\omega} K_{\text{Д}} + K_U) \cdot K_{\text{П}}(U_{\text{К}})}.$$

В цьому рівнянні перший член визначає швидкість ідеального неробочого ходу двигуна  $\omega_0$ , а другий - перепад швидкості  $\Delta\omega$ . Кутова швидкість  $\omega_0$  є чисто розрахункова величина, яка відповідає припущенню про неперервність струму перетворювача аж до  $I = 0$ . Перший член цього рівняння дозволяє знайти потрібну величину напруги завдання

$$U_3 = \frac{\omega_0}{K_{\text{П}}(U_{\text{К}}) \cdot K_{\text{Д}}} \left[ 1 + (K_{\omega} K_{\text{Д}} + K_U) \cdot K_{\text{П}}(U_{\text{К}}) \right] + \frac{\Delta U}{K_{\text{П}}(U_{\text{К}})} + K_U \Delta U_{\text{Ш}}. \quad (5.8)$$

При відсутності того або іншого зворотного зв'язку коефіцієнт передачі цього зв'язку в рівнянні (5.8) приймається рівним нулю.

Швидкість ідеального неробочого ходу  $\omega_0$  визначається за формулою

$$\omega_0 = \frac{\omega_H}{D} \cdot \frac{1}{1 - \delta_3}, \quad (5.9)$$

де  $\omega_H$  - номінальна швидкість двигуна;  $D$  - діапазон регулювання швидкості;  $\delta_3$  - заданий відносний перепад швидкості двигуна при його номінальному навантаженні.

Коефіцієнт передачі перетворювача визначається за характеристикою  $E_{II} = f(U_K)$  для е.р.с., яка дорівнює

$$E_{II} = \frac{\omega_0}{K_D} + \Delta U. \quad (5.10)$$

За заданим значенням перепаду швидкості при номінальному навантаженні

$$\Delta \omega_3 = \delta_3 \omega_0 = \frac{\omega_H}{D} \cdot \frac{\delta_3}{1 - \delta_3}, \quad (5.11)$$

з врахуванням величини перепадів швидкості при номінальному навантаженні в розімкненій системі перетворювач-двигун

$$\Delta \omega_p = I_H R K_D \quad (5.12)$$

та на природній характеристиці двигуна

$$\Delta \omega_H = I_H R_D K_D \quad (5.13)$$

можна визначити необхідні коефіцієнти передачі зворотних зв'язків.

Коли є лише один зворотний зв'язок за швидкістю, то

$$K_{\omega_{ПОТР}} = \frac{\Delta \omega_p - \Delta \omega_3}{\Delta \omega_3 K_{II}(U_K)}. \quad (5.14)$$

При наявності зворотного зв'язку за напругою

$$K_{U_{ПОТР}} = \frac{\Delta \omega_p - \Delta \omega_3}{(\Delta \omega_3 - \Delta \omega_{II}) \cdot K_{II}(U_K)}. \quad (5.15)$$

При цьому значення  $K_{II}(U_K)$  визначається для е.р.с. перетворювача при номінальному навантаженні двигуна:

$$E_{II} = \frac{\omega_H}{DK_D} + I_H R + \Delta U. \quad (5.16)$$

Позитивний зв'язок за струмом застосовується тільки як додатковий в випадках, коли один зв'язок за швидкістю або за напругою не може забезпечити потрібні величини  $\Delta \omega_3$ . Тоді

коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за швидкістю приймається максимально можливим, а за напругою мінімально можливим. При цьому необхідне значення коефіцієнта передачі зворотного зв'язку за струмом дорівнює

$$K_{шотр} = \frac{\Delta\omega_p - \Delta\omega_3 \left[ 1 + K_\omega \cdot K_{II}(U_K) \cdot K_D \right] - (\Delta\omega_3 - \Delta\omega_{II}) \cdot K_U \cdot K_{II}(U_K)}{\Delta\omega_p \cdot K_{II}(U_K)}.$$

Розрахунок електромеханічної характеристики двигуна в замкненій системі з врахуванням характеристики  $E_n = f(U_k)$  може виконуватись двома способами, які засновані на використанні залежності між напругою керування, е.р.с. перетворювача та струмом двигуна. Цю залежність можна отримати, підставляючи вираз для  $\omega$  з (5.6) та  $U_D$  з (5.7) в рівняння (5.3):

$$U_K = U_3 - (K_\omega K_D + K_U)(E_{II} - \Delta U) + IR \left[ K_\omega K_D + K_U \left( 1 - \frac{R_D}{R} \right) + K_I \right]. \quad (5.17)$$

При першому способі розрахунку рівняння (5.17) треба розв'язати відносно  $E_{II} = f(U_K)$  (рис.5.3). Точка перетину  $B$  визначає шукане значення  $E_{II}$  при заданому струмі  $I$ .

При другому способі розрахунку з рівняння (4.17) визначається струм двигуна  $I$  при заданому значенні е.р.с.  $E_{II}$ :

$$I = \frac{U_K - U_3 + (K_\omega K_D + K_U)(E_{II} - \Delta U) + K_U \Delta U_{шц}}{\left[ K_\omega K_D + K_U \left( 1 - \frac{R_D}{R} \right) + K_I R \right]}. \quad (5.18)$$

Якщо задатись значеннями  $U_K$  та визначити для них за характеристикою  $E_{II} = f(U_K)$  відповідні величини  $E_{II}$ , то можна знайти значення струму  $I$ . За відомими значеннями  $E_{II}$  та  $I$  можна знайти згідно рівняння (5.6) значення швидкості  $\omega$  та побудувати за точками електромеханічну характеристику двигуна.

### **Задача 5.1.**

Розрахувати і побудувати електромеханічну характеристику двигуна, який живиться від тиристорного перетворювача в системі зі зворотнім зв'язком за швидкістю (рис.5.2).

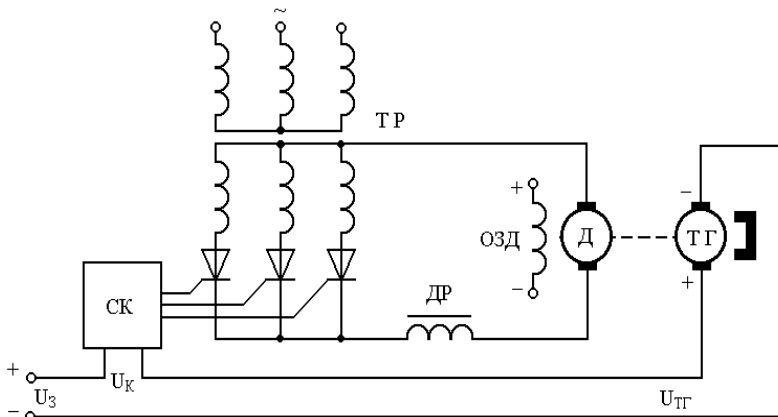


Рис.5.2. Система тиристорний перетворювач-двигун з від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю.

Система має забезпечувати перепад швидкості не вище 10% при зміні навантаження від  $0,25I_H$  до номінального при діапазоні регулювання швидкості  $D = 5$ . Інші дані: двигун типу П82,  $P_H = 42$  кВт,  $U_H = 220$  В,  $I_H = 218$  А,  $\omega_H = 157$  с<sup>-1</sup>,  $r_{Я20^\circ} = 0,0263$  Ом,  $r_{C20^\circ} = 0,0008$  Ом,  $r_{ДП20^\circ} = 0,0096$  Ом,  $\Delta U_{Щ} = 2$  В; тиристори типу УПВКЛ-150-5,  $I_{ПР} = 150$  А,  $U_{ЗВ} = 500$  В,  $\Delta U_B = 0,75$  В; трансформатор  $E_{2Т} = 244$  В,  $r_T = 0,046$  Ом,  $x_T = 0,026$  Ом; дросель  $R_{ДР} = 0,01$  Ом.

### Розв'язок.

Приймаємо напівпровідникову систему керування тиристорами, характеристика якої  $\alpha = f(U_K)$  наведена на рис.2.3. Там же побудована характеристика перетворювача, яка розрахована за рівнянням (5.1).

Опір силового кола перетворювача за формулою (5.4):

$$R_H = 0,046 + \frac{0,026 \cdot 3}{2 \cdot \pi} = 0,0708 \text{ Ом.}$$

Опір якірного кола двигуна:

$$R_D = 1,2 \cdot (0,0263 + 0,0008 + 0,0096) = 0,044 \text{ Ом.}$$

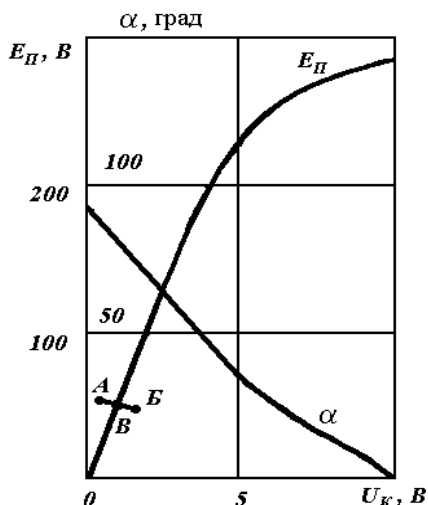


Рис.5.3. Регулювальні характеристики тиристорного перетворювача.

Опір кола перетворювач-двигун:

$$R = 1,02 \cdot (0,0708 + 0,044 + 0,01) = 0,1248 \text{ Ом},$$

де 1,02 – коефіцієнт, який враховує опір проводів.

Коефіцієнт передачі двигуна:

$$K_D = \frac{\omega_H}{U_H - I_H R_D} = \frac{157}{220 - 218 \cdot 0,044} = 0,746 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}.$$

Спад напруги в якірному колі, який не залежить від струму:

$$\Delta U = \Delta U_B + \Delta U_{щ} = 0,75 + 2 = 2,75 \text{ В}.$$

Тепер визначимо параметри зворотніх зв'язків. Е.р.с. перетворювача при мінімальній швидкості та номінальному навантаженні двигуна за формулою (5.16) дорівнює

$$E_n = \frac{157}{5 \cdot 0,746} + 218 \cdot 0,1248 + 2,75 = 72 \text{ В}.$$

Коефіцієнт передачі перетворювача при цьому

$$K_{II} = \frac{E_{II}}{U_K} = \frac{72}{1,4} = 51,5,$$

де  $U_K = 1,4 \text{ В}$  – напруга керування (знайдено за характеристикою перетворювача при  $E_{II} = 72 \text{ В}$ ).

Заданий перепад швидкості в розімкненій системі за формулою (5.11) дорівнює

$$\Delta\omega_3 = \frac{157}{5} \cdot \frac{0,1}{1-0,1} = 3,5 \text{ c}^{-1}.$$

Перепад швидкості в розімкненій системі за формулою (5.12) дорівнює

$$\Delta\omega_p = 218 \cdot 0,1248 \cdot 0,746 = 20,3 \text{ c}^{-1}.$$

Необхідний коефіцієнт передачі зворотнього зв'язку за рівнянням (5.14).

$$K_{\omega\text{ПОТР}} = \frac{20,3 - 3,5}{3,5 \cdot 51,5 \cdot 0,746} = 0,125 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

Вибираємо тахогенератор типу МЕТ-8/55,  $U_{ТГН} = 55 \text{ В}$ ,  $\omega_{ТГН} = 200 \text{ c}^{-1}$ ,  $K_{\omega} = 0,275 \text{ В} \cdot \text{с}$ .

Далі здійснюємо розрахунок електромеханічної характеристики. Напряга завдання за рівнянням (5.8):

$$U_3 = \frac{34,9}{51,5 \cdot 0,746} (1 + 0,275 \cdot 51,5 \cdot 0,746) + \frac{2,75}{51,5} = 10,6 \text{ В},$$

$$\text{де } \omega_0 = \frac{\omega_H}{D} \cdot \frac{1}{1 - \delta_3} = \frac{157}{5} \cdot \frac{1}{1 - 0,1} = 34,9 \text{ c}^{-1}$$

Розрахуємо в якості прикладу дві точки характеристики. Для ілюстрації обох способів розрахунку одна точка розраховується першим способом, а інша – другим.

*Перша точка (перший спосіб).*

Задаємося струмом двигуна  $I_1 = 0,25I_H = 54,5 \text{ А}$  та отримаємо

$$E_{II} = \frac{U_3 - U_K + K_{\omega} K_D (IR + \Delta U)}{K_{\omega} K_D} =$$

$$= \frac{10,6 - U_K + 0,275 \cdot 0,746 \cdot (54,5 \cdot 0,1248 + 2,75)}{0,275 \cdot 0,746} = \frac{12,56 - U_K}{0,205}.$$

Тепер задаємося двома значеннями напруги керування і визначаємо е.р.с. перетворювача:

$$U'_K = 0,5 \text{ В}, E'_{II} = 58,8 \text{ В} - \text{точка А};$$

$$U''_K = 1,5 \text{ В}, E''_{II} = 54 \text{ В} - \text{точка Б}.$$

Через ці точки на рис.5.3 проводиться пряма і для точки **В** визначається  $E_{II1} = 56 \text{ В}$ .

Швидкість двигуна за рівнянням (5.6):

$$\omega_1 = 0,746(56 - 2,75 - 54,5 \cdot 0,1248) = 34,7 \text{ с}^{-1}.$$

Друга точка (другий спосіб).

Задаємося напругою керування  $U_K = 1,2 \text{ В}$ , визначаємо за характеристикою перетворювача  $E_{П2} = 62 \text{ В}$  та знайдемо струм

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{U_K - U_3 + K_\omega K_D (E_{П2} - \Delta U)}{K_\omega K_D R} = \\ &= \frac{1,2 - 10,6 + 0,275 \cdot 0,746(62 - 2,75)}{0,275 \cdot 0,746 \cdot 0,1248} = 107,6 \text{ А}. \end{aligned}$$

Швидкість двигуна за рівнянням (5.6):

$$\omega_2 = 0,746(62 - 2,75 - 107,6 \cdot 0,1248) = 34,2 \text{ с}^{-1}.$$

Характеристика, решта точок якої розраховано аналогічно, побудована на рис.5.4.

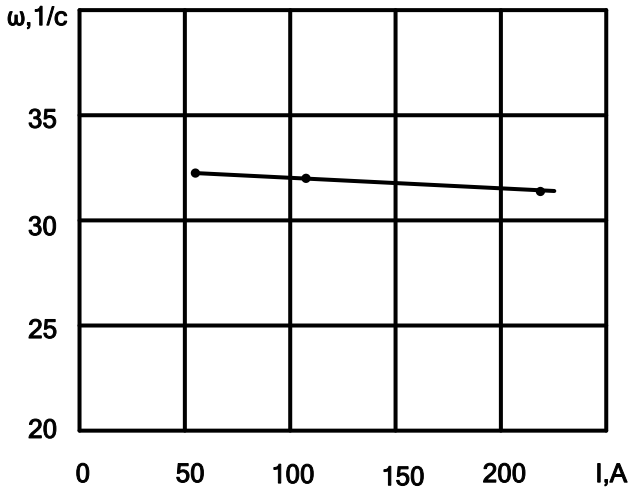


Рис.5.4. Електромеханічна характеристика приводу

Розрахункове значення спаду швидкості при зміні навантаження від  $0,25 I_H$  до  $I_H$  дорівнює

$$\Delta \omega_{\text{ПОЗР}} = \frac{\omega_{0,25I_H} - \omega_{I_H}}{\omega_{0,25I_H}} \cdot 100\% = \frac{34,7 - 32,6}{34,7} \cdot 100 = 6,1\%.$$

### Задача 5.2.

Розрахувати та побудувати статичну характеристику двигуна в системі перетворювач-двигун з лінійним від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю (задача 5.1) при введенні до неї додатково від'ємного зв'язку за струмом з відсічкою та обмеження вхідного сигналу за схемою на рис.5.3.

В зоні дії струмової відсічки струм двигуна має утримуватись у межах  $(1,5 \dots 2) I_H$ . Значення решта величин взяти із задачі 5.1.

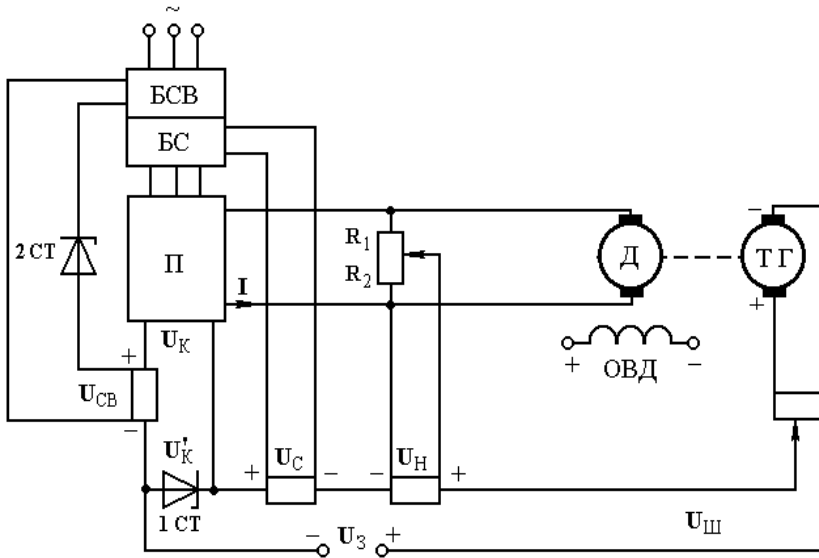


Рис.5.3. Принципова схема системи перетворювач-двигун з різними зворотними зв'язками.

## ТЕМА 6. ПЕРЕХІДНІ РЕЖИМИ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ

Дослідження перехідних процесів в електроприводах має першорядне значення, оскільки дозволяє визначити не тільки умови роботи електродвигуна, але й можливості робочої машини по відношенню продуктивності, швидкодії, граничних прискорень, максимальних зусиль та моментів, які визначають надійність механізмів.



На перехідні режими перш за все впливає механічна інерція вузлів, які рухаються обертально або поступально, у тому числі якоря (ротора) власне двигуна. Дуже часто механічна інерція є визначальною у перехідних процесах й тільки її необхідно враховувати. Іноді дуже суттєвий вплив оказують електромагнітні процеси, які протікають у електричних колах двигунів. При контакт орному керуванні процеси носять розривний характер й розрахунки відповідно приходиться вести по ділянках, використовуючи для кожній ділянці свої параметри кіл. Зі зростанням вимог до швидкодії електроприводів приходиться більш повно та з більшою степінню точності враховувати електромагнітні явища.

При лінійних характеристиках двигуна та виконавчого органу динамічний момент також лінійно залежмть від швидкості. Такі перехідні процеси характерні для електроприводів з двигунами постійного струму з незалежним збудженням та іншими двигунами, характеристики яких можуть бути частково або повністю подані прямими лініями.

На рис.6.1 наведені лінійні механічні характеристики двигуна 1 та виконавчого органу 2, які побудовані за рівняннями

$$\begin{aligned} M &= M_{K3} - \beta\omega, \\ M_C &= M_{CO} - \beta_C\omega, \end{aligned} \quad (5.1)$$

де  $\beta = \frac{c^2}{R}$ ;  $M_{K3}$  та  $M$  - моменти двигуна та виконавчого органу при нульовій швидкості.

Підставляючи ці вирази у рівняння руху, отримаємо

$$T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{уст}, \quad (6.2)$$

де  $T_M = \frac{J}{\beta + \beta_C}$  - електромеханічна стала часу;  $\omega_{уст} = \frac{M_{K3} - M_{CO}}{\beta + \beta_C}$  - усталена швидкість, яка відповідає точці перетину характеристик двигуна та виконавчого органу.

При початкових умовах:  $t = 0, \omega = \omega_{поч}$  рівняння (6.2) має розв'язок

$$\omega(t) = (\omega_{поч} - \omega_{уст}) e^{-\frac{t}{T_M}} + \omega_{уст}. \quad (6.3)$$

Момент двигуна буде змінюватись з часом за законом

$$M(t) = (M_{\text{Поч}} - M_{\text{УСТ}}) e^{-\frac{t}{T_M}} + M_{\text{УСТ}}. \quad (6.4)$$

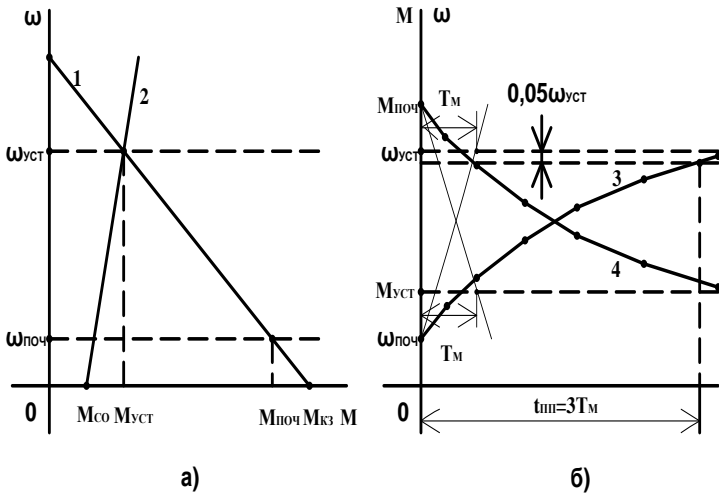


Рис.5.1. Лінійні механічні характеристики двигуна та виконавчого органу (а) й графіки перехідного процесу розбігу електроприводу (б).

Для поширеного в практиці випадку, коли  $\beta_C = 0$ , параметри, які входять в (6.3) та (6.4), спрощуються й приймають вигляд

$$T_M = \frac{J}{\beta} = \frac{J\omega_0}{M_{КЗ}}; \quad \omega_{\text{УСТ}} = \frac{M_{КЗ} - M_C}{\beta}.$$

Час перехідного процесу  $t_{\text{III}}$ , за який швидкість зміниться від деякого початкового рівня  $\omega_{\text{Поч}}$  до кінцевого  $\omega_{\text{Кін}}$  або момент від  $M_{\text{Поч}}$  до  $M_{\text{Кін}}$ , визначається за формулою

$$t_{\text{III}} = T_M \ln \frac{\omega_{\text{УСТ}} - \omega_{\text{Поч}}}{\omega_{\text{УСТ}} - \omega_{\text{Кін}}} = T_M \ln \frac{M_{\text{УСТ}} - M_{\text{Поч}}}{M_{\text{УСТ}} - M_{\text{Кін}}}. \quad (6.5)$$

Теоретично, як це впливає з (6.5), час перехідного процесу є нескінченно великим. Тому в технічних розрахунках оперують з так званим практичним часом перехідного процесу  $t_{\text{III}} = 3T_M$ . За цей інтервал часу швидкість досягає 95% від усталеного значення (рис.6.1,б).

### Задача 6.1.

Розрахувати та побудувати криві перехідного процесу  $\omega(t)$  й  $M(t)$  при лінійної характеристиці двигуна та наступних вихідних даних:  $\omega_{поч} = 0$ ;  $\omega_{уст} = 150c^{-1}$ ;  $M_{поч} = M_{кз} = 100Нм$ ;  $\omega_0 = 200c^{-1}$ ;  $M_{уст} = M_C = 40Нм$ ;  $J = 0,1кгм^2$ . Оцінити практичний час перехідного процесу.

#### Розв'язок.

Електромеханічна стала часу електроприводу

$$T_M = \frac{J\omega_0}{M_{кз}} = \frac{0,1 \cdot 200}{100} = 0,2c.$$

Закон зміни швидкості електроприводу за формулою (6.3)

$$\omega(t) = (0 - 150)e^{-\frac{t}{0,2}} + 150 = 150 \left( 1 - e^{-\frac{t}{0,2}} \right).$$

Закон зміни моменту електроприводу за формулою (6.4)

$$M(t) = (100 - 40)e^{-\frac{t}{0,2}} + 40 = 60e^{-\frac{t}{0,2}} + 40.$$

Результати розрахунку  $\omega(t)$  та  $M(t)$  подані у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

$t, c$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$\omega(t), c^{-1}$	0	59	94,8	116,5	129,7	137,7	142,5
$M(t), Нм$	100	76,4	62,1	53,4	48,1	44,9	43

За даними табл.6.1 на рис.6.2 побудовані криві перехідного процесу  $\omega(t)$  та  $M(t)$ .

Практичний час перехідного процесу  $t_{III} = 3 \cdot 0,2 = 0,6c$ .

### Задача 6.2.

Двигун (рис.6.4) працював в усталеному режимі в точці  $A$ , долаючи момент навантаження  $M_{C1} = 150Нм$ . В момент часу  $t = 0$ , що приймається за початок відліку, відбулася стрибко-подібна зміна моменту навантаження до рівня  $M_{C2} = 250Нм$ .

Розрахувати та побудувати залежності  $\omega(t)$  й  $M(t)$ , які відповідають цьому збільшенню навантаження.

**Задача 6.3.**

На рис.6.3 наведена механічна характеристика двигуна. Розрахувати та побудувати залежності  $\omega(t)$  та  $M(t)$ , якщо  $M_c = 0$ ,  $\omega_{поч} = 200c^{-1}$ .

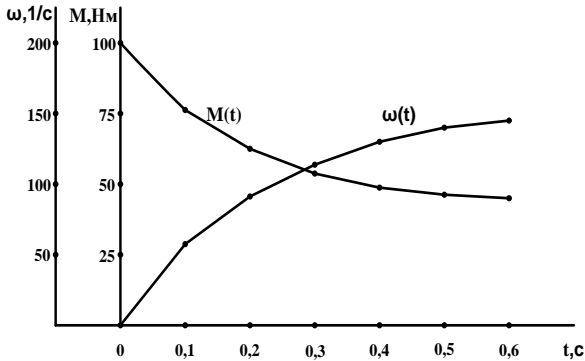


Рис.6.2. Криві перехідного процесу  $\omega(t)$  та  $M(t)$  електроприводу.

**Задача 6.4.**

Використовуючи вираз (6.3), отримати загальний вираз для зміни у часі кута повороту валу двигуна  $\varphi(t)$ . Розрахувати та побудувати цю залежність для умов задачі 6.1.

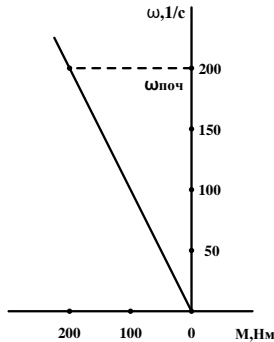


Рис.6.3. Механічна характеристика до задачі 6.2.

### Задача 6.5.

Механічна характеристика асинхронного двигуна описується рівнянням

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}},$$

де  $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$  - ковзання,  $s_K = \frac{\omega_0 - \omega_K}{\omega_0}$  - критичне ковзання, яке

відповідає критичному моменту  $M_K$  та швидкості  $\omega_K$ . Необхідно отримати точні вирази для залежності  $\omega(t)$  або  $s(t)$  та часу перехідних процесів для випадку. Коли  $M_C = const$ .

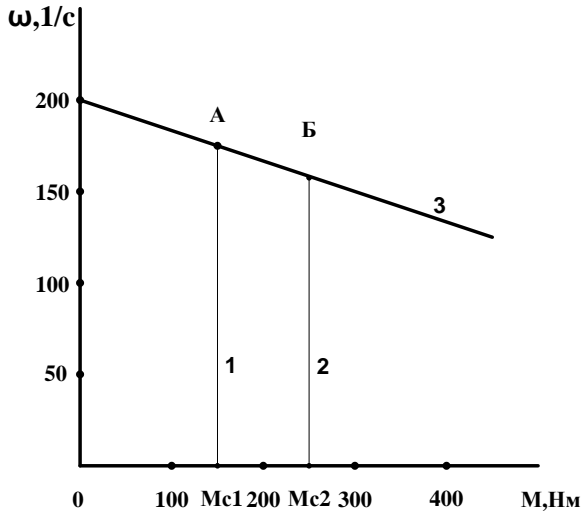


Рис.6.4. Механічні характеристика до задачі 6.3:  
1,2 – виконавчого органу, 3 – двигуна.

### Задача 6.6.

Момент двигуна змінюється у часі за таким законом:  
 $M = 100 - 20t$ ,  $M_C = 50 \text{ Hm} = const$ . Отримати формулу для залежності  $\omega(t)$ .

## ТЕМА 7. РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ТА ВИБІР ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Основною вимогою при виборі електродвигуна є його відповідність умовам технологічного процесу робочої машини. Задача вибору полягає у пошуку такого двигуна, який забезпечує заданий технологічний цикл робочої машини, відповідає умовам навколишнього середовища та компоновки з робочою машиною й при цьому має нормативний (допустимий) нагрів.

Вибір електродвигуна здійснюється звичайно у такій послідовності: розрахунок потужності та попередній вибір двигуна; перевірка вибраного двигуна за умовами пуску, перевантаження та нагріву.

Якщо вибраний двигун задовольняє умовам перевірки, то на цьому вибір двигуна закінчується. В іншому випадку вибирається другий двигун (як правило, більшої потужності) й перевірка повторюється.

Основою для розрахунку та вибору електродвигуна є навантажувальна діаграма та діаграма швидкості виконавчого органу робочої машини.

Навантажувальна діаграма розраховується на підставі технологічних даних, які характеризують роботу машин та механізмів й параметрів механічної передачі, та являє собою залежність приведенного до валу двигуна статичного моменту опору від часу  $M_c(t)$ .

Діаграма швидкості являє собою залежність швидкості руху виконавчого органу від часу  $V_{BO}(t)$  або  $\omega_{BO}(t)$ . Після виконання операції приведення ці залежності зображуються у вигляді графіка швидкості валу двигуна у часі  $\omega(t)$ .

На рис.7.1 наведений приклад навантажувальної діаграми та діаграми швидкості.

Орієнтовно розрахунковий момент двигуна

$$M_{PO3P} \geq k_3 M_{CE}, \quad (7.1)$$

де  $M_{CE}$  - еквівалентний момент навантаження;  $k_3 = 1,1 \dots 1,3$  - коефіцієнт запасу, який враховує динамічні режими електродвигуна.

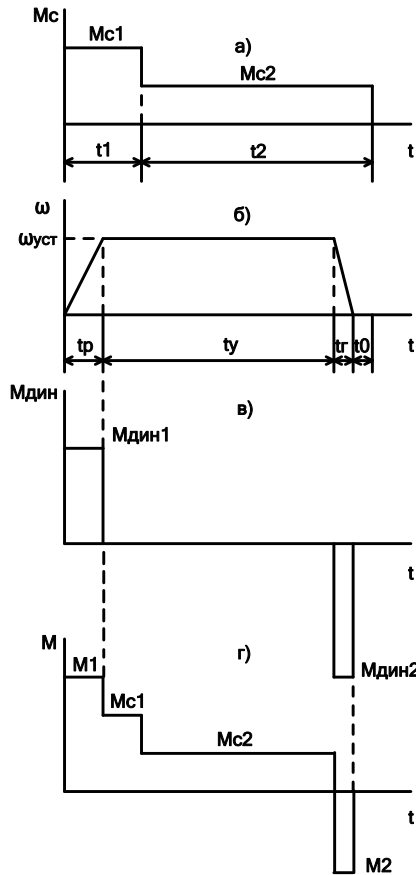


Рис.7.1. Навантажувальна діаграма виконавчого органу (а), діаграма швидкості (б), графік динамічного моменту (в) та залежність моменту двигуна від часу (г).

У разі, коли момент навантаження  $M_c$  змінюється у часі й навантажувальна діаграма має декілько ділянок (рис.6.1.а), то  $M_{CE}$  визначається як середньоквадратична величина

$$M_{CE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{M_{Ci}^2 t_i}{t_{Ц}}}, \quad (7.2)$$

де  $M_{Ci}$ ,  $t_i$  - відповідно момент та тривалість  $i$ -ої ділянки навантажувальної діаграми.

Для діаграми швидкості на рис.6.1,б розрахункова швидкість двишуга  $\omega_{PO3P} = \omega_{YCT}$ .

Розрахункова потужність двигуна визначається за формулою

$$P_{PO3P} = M_{PO3P} \omega_{PO3P} = k_3 M_{CE} \omega_{YCT}. \quad (7.3)$$

За каталогом вибіраємо двигун ближчої більшої потужності та швидкості. Вибраний двигун при цьому має за родом та величиною напруги відповідати мережам змінного або постійного струму даного підприємства; за конструктивним виконанням – умовам його компоновки з виконавчим органом та способам кріплення на робочій машині, а за способом вентиляції й захисту від дії навколишнього середовища – умовам його роботи.

Вибраний двигун перевіряється на перевантажувальну здатність. Для цього розраховується навантажувальна діаграма двигуна  $M(t)$  за допомогою рівняння механічного руху

$$M = M_C + J \frac{d\omega}{dt} = M_C + M_{ДИН}. \quad (7.4)$$

Динамічний момент  $M_{ДИН}$  визначається сумарним приведеним моментом інерції  $J$  та заданим прискоренням на ділянці розгону й сповільненням на ділянці гальмування діаграми  $\omega(t)$  (рис.7.1,б). Якщо прийняти графік  $\omega(t)$  на ділянках розбігу та гальмування лінійним, то

$$M_{ДИНР} = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = J \frac{\omega_{YCT}}{t_P} = const;$$

$$M_{ДИНГ} = -J \frac{\omega_{YCT}}{t_G}. \quad (7.5)$$

Використовуючи графік  $M_{ДИН}(t)$  (рис.7.1,в) та залежність  $M(t)$ , яка побудована на підставі (7.4), спів ставимо максимально допустимий момент двигуна  $M_{\max}$  з максимальним моментом  $M_1$  (рис.7.1,г).

$$M_{\max} \geq M_1. \quad (7.6)$$

Для двигуна постійного струму звичайного виконання та синхронного двигуна  $M_{\max} = M_{ДОП} = (1,5...2,5)M_H$ , для асинхронного двигуна з фазним ротором  $M_{\max} = M_K$ .



При виборі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором двигун має бути перевірений також за умовами пуску

$$M_{II} \geq M_{СП}. \quad (7.7)$$

Якщо вибраний двигун задовольняє розглянутим вище вимогам, то далі здійснюється його перевірка за нагрівом.

Розглянемо *метод середніх втрат*, що є найбільш точним та універсальним методом із непрямих методів. У відповідності з методом допустимий нагрів двигуна буде мати місце при умові

$$\Delta P_{СЕР} \leq \Delta P_{H}, \quad (7.8)$$

тобто коли середні втрати у двигуні  $\Delta P_{СЕР}$  не перевищують номінальні втрати  $\Delta P_{H}$ .

У тому випадку, коли на окремих ділянках циклу навантаження постійне (рис.7.2), то середні втрати визначаються за формулою

$$\Delta P_{СЕР} = \frac{\sum_1^n \Delta P_i t_i}{\sum_1^n t_i}, \quad (7.9)$$

де  $t_{Ц} = \sum_1^n t_i$  - час циклу.

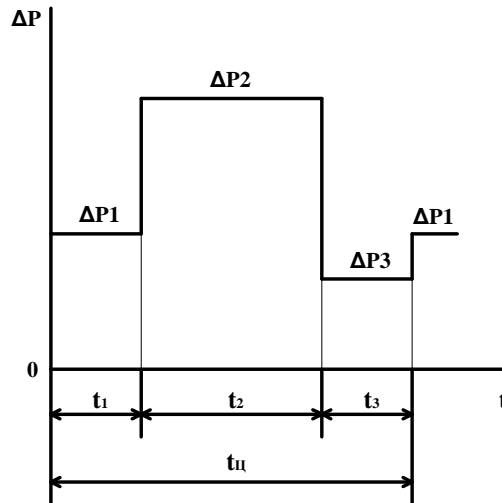


Рис.7.2. Графік роботи двигуна з циклічним навантаженням.

Номинальні втрати потужності двигуна визначаються за каталожними даними

$$\Delta P_H = \frac{P_H (1 - \eta_H)}{\eta_H}. \quad (7.10)$$

**Метод еквівалентного струму** доцільно використовувати у тому випадку, коли відомий графік зміни струму двигуна у часі, отриманий розрахунковим шляхом або експериментально.

Умова перевірки двигуна за нагрівом методом еквівалентного струму має вигляд

$$\sqrt{\frac{1}{t_{Ц}} \sum_{i=1}^n I_i^2 t_i} = I_{EKB} \leq I_H. \quad (7.11)$$

Формула (7.11) справедлива, якщо постійні втрати не змінюються за цикл роботи, а опори головних кіл двигуна залишаються незмінними за цикл роботи.

Метод еквівалентного моменту зручно використовувати у тому випадку, коли відомий графік зміни моменту двигуна у часі  $M(t)$ . Крім того, має виконуватись ще одна умова – постійність магнітного потоку двигуна за весь цикл роботи.

Умова перевірки двигуна за нагрівом методом еквівалентного моменту має вигляд

$$\sqrt{\frac{1}{t_{Ц}} \sum_{i=1}^n M_i^2 t_i} = M_{EKB} \leq M_H. \quad (7.12)$$

Метод еквівалентної потужності використовується, якщо відомий графік зміни потужності у часі, а також при виконанні умов постійності магнітного потоку та швидкості двигуна на всіх ділянках робочого циклу.

Нагрів двигуна не перевищить допустимого рівня, якщо

$$\sqrt{\frac{1}{t_{Ц}} \sum_{i=1}^n P_i^2 t_i} = M_{EKB} \omega_H = P_{EKB} \leq P_H. \quad (7.13)$$

### **Задача 7.1.**

Робота електроприводу характеризується графіками на рис.7.1,а,б. При цьому:  $M_{C1} = 40 \text{ Нм}$ ,  $M_{C2} = 15 \text{ Нм}$ ,  $t_1 = 20 \text{ с}$ ,  $t_2 = 60 \text{ с}$ ,  $t_p = 2 \text{ с}$ ,  $t_r = 1 \text{ с}$ ,  $t_y = 77 \text{ с}$ ,  $\omega_{VCT} = 140 \text{ с}^{-1}$ ,  $J = 0,8 \text{ кгм}^2$ . Визначити

розрахунковий момент та потужність двигуна й побудувати його навантажувальну діаграму.

### **Розв'язок.**

Розрахунковий момент двигуна визначається за (7.1) з врахуванням (7.2), а розрахункова потужність – за (7.3):

$$M_{PO3P} = k_3 M_{CE} = 1,2 \sqrt{\frac{40^2 \cdot 20 + 15^2 \cdot 60}{20 + 60}} = 28,6 \text{ Нм};$$

$$P_{PO3P} = M_{PO3P} \omega_{PO3P} = 28,6 \cdot 140 = 4006 \approx 4 \text{ кВт}.$$

Для побудови навантажувальної діаграми двигуна  $M(t)$  визначасмо спочатку динамічні моменти на ділянках розбігу  $M_{ДИНР}$  та гальмування  $M_{ДИНГ}$ :

$$M_{ДИНР} = \frac{J \omega_{УСТ}}{t_p} = \frac{0,8 \cdot 140}{2} = 56 \text{ Нм},$$

$$M_{ДИНГ} = -\frac{J \omega_{УСТ}}{t_r} = -\frac{0,8 \cdot 140}{1} = -112 \text{ Нм}.$$

Моменти двигуна на ділянках розбігу  $M_1$  та гальмування  $M_2$  визначасмо за (6.4)

$$M_1 = M_{C1} + M_{ДИНР} = 40 + 56 = 96 \text{ Нм};$$

$$M_2 = M_{C2} + M_{ДИНГ} = 20 - 112 = -92 \text{ Нм}.$$

Моменти двигуна на ділянках усталеного руху ( $t_1 - t_p$ ) та ( $t_2 - t_r$ ) дорівнюють моментам навантаження  $M_{C1}$  й  $M_{C2}$ .

### **Задача 7.2.**

Двигун постійного струму типу 2ПФ-200 має такі паспортні дані:  $P_H = 30 \text{ кВт}$ ;  $n_H = 2200 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ ;  $I_H = 74 \text{ А}$ ;  $U_H = 440 \text{ В}$ ;  $\eta_H = 90\%$ .

Оцінити тепловий режим двигуна при його роботі за таким циклом: на першій ділянці тривалістю  $t_1 = 12 \text{ хв}$  момент навантаження  $M_{C1} = 120 \text{ Нм}$ ; на другій ділянці тривалістю  $t_2 = 25 \text{ хв}$  момент навантаження  $M_{C2} = 145 \text{ Нм}$ ; на третій ділянці тривалістю  $t_3 = 18 \text{ хв}$  момент навантаження  $M_{C3} = 100 \text{ Нм}$ . Струм збудження та опір якорного кола не змінюються.

### **Розв'язок.**

Заданий цикл відноситься до тривалого режиму зі змінним навантаженням. Оскільки струм збудження та опір якірного кола не змінюються, то для перевірки двигуна за нагрівом можна користуватись методом еквівалентного моменту.

Визначимо номінальні кутову швидкості та момент двигуна

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30} = \frac{\pi \cdot 2200}{30} = 230 \text{с}^{-1};$$

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{30000}{230} = 130 \text{Нм}.$$

Еквівалентний середньоквадратичний момент навантаження двигуна:

$$M_{EKB} = \sqrt{\frac{1}{t_{\Sigma}} \sum_{i=1}^3 M_i^2 t_i} = \sqrt{\frac{120^2 \cdot 12 + 145^2 \cdot 25 + 100^2 \cdot 18}{12 + 25 + 18}} = 126,4 \text{Нм}.$$

Співставимо розрахований еквівалентний момент з номінальним. Оскільки  $M_{EKB} = 126,4 < 130 = M_H$ , то двигун не буде перегріватись вище допустимого рівня.

### **Задача 7.3.**

Асинхронний двигун краново-металургічної серії типу МТКВ-511-8 має номінальні потужність  $P_H = 28 \text{кВт}$  при  $TB_H = 25\%$  та швидкість  $n_H = 700 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ . Оцінити нагрів двигуна, якщо він буде періодично вмикатись на 3 хв та долати при цьому момент навантаження  $M_C = 350 \text{Нм}$ , після чого буде вимикатись на 5 хв.

### **Розв'язок.**

Номінальна кутова швидкість та номінальний момент при  $TB_H$  двигуна

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30} = \frac{\pi \cdot 700}{30} = 73,3 \text{с}^{-1},$$

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{28000}{73,3} = 382 \text{Нм}.$$

Тривалість вмикання двигуна в циклі  $TB_1$

$$PB_1 = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100\% = \frac{3}{3 + 5} \cdot 100\% = 37,5\% .$$

Еквівалентний момент при стандартній  $TB_H = 25\%$

$$M_{EKB} = M_C \sqrt{\frac{PB_1}{PB_H}} = 350 \sqrt{\frac{37,5}{25}} = 428,7 \text{ Нм} .$$

Оскільки  $M_{EKB} = 428,7 \text{ Нм} > 382 \text{ Нм} = M_H$ , то двигун при роботі у такому циклі буде перегріватись вище допустимого рівня.

#### **Задача 7.4.**

Для умов задачі 7.2 виконати перевірку двигуна за нагрівом методами середніх втрат та еквівалентного струму.

#### **Задача 7.5.**

Для умов задачі 7.3 при тих самих паузі та моменті навантаження визначити час роботи двигуна, при якому перегрів двигуна не буде перевищувати допустимого рівня.

## **ТЕМА 8. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ІЗ СИСТЕМАМИ КЕРУВАННЯ**

### **Задача 8.1.**

Розрахувати частотно-регульований електропривод вентилятора. Вихідні дані: продуктивність  $Q = 10000 \text{ м}^3/\text{год}$ ; тиск  $H = 850 \text{ Па}$ ; ККД вентилятора  $\eta_v = 80 \%$ ; синхронна частота обертання  $n_0 = 1500 \text{ об/хв}$ ; тип вентилятора – відцентровий.

#### **Розв'язок.**

Наведемо короткі теоретичні відомості про вентилятори. Вентилятори, як виробничі механізми, характеризуються тривалим режимом роботи з постійним навантаженням і з великою тривалістю роботи протягом року. Перевантаження електропривода технологічно неможливі, бажаний плавний пуск. Необхідний діапазон регулювання швидкості для вентиляторів зазвичай не перевищує 2:1.

Зазначеним вимогам найбільш повно відповідає частотно-регульований асинхронний електропривод вентилятора. При цьому, як правило, можна обмежитися використанням простих і недорогих систем скалярного управління. Зазвичай в приводі вентилятора використовується гальмування вибігом, тому не потрібне встановлення гальмівних резисторів або інших пристроїв для поглинання енергії обертових мас.

Вентилятори розділяють на відцентрові (радіальні) й осьові.

Вентилятори радіальні низького тиску загального призначення (загальнопромислові) використовуються в системах вентиляції і кондиціонування, а також у технологічних установках.

Виготовляються різні типорозміри вентиляторів по схемі з безпосереднім з'єднанням з двигуном і по схемі з ремінним приводом. Завдяки такому виконанню аеродинамічні характеристики вентиляторів заповнюють досить рівномірно і густо всю область режимів з продуктивністю від 1000 м<sup>3</sup>/год до 100000 м<sup>3</sup>/год і повним тиском від 100 Па до 1800 Па.

Вентилятори являються механізмами з режимом тривалого навантаження зі значним числом годин роботи на рік; навантаження на валу двигуна спокійне, перевантажень не виникає. Частота обертання робочого колеса вентилятора для великих машин не перевищує 600 об/хв, зі зменшенням потужності вентиляторів їхня номінальна частота обертання зростає до 1500-3000 об/хв.

Раціональний вибір вентилятора з високим ККД на будь-який заданий режим здійснюють практично без запасу, що дає можливість значно знизити енергоспоживання вентиляторної установки, зменшити габарити і масу.

Для комплектації вентиляторів застосовуються асинхронні трифазні короткозамкнені одношвидкісні двигуни загальнопромислового застосування серій 4А, АИР та інші, більш нових серій, призначені для роботи від мережі змінного струму з частотою 50 Гц і напругою 220/380В. Кліматичне виконання двигуна підбирається з урахуванням кліматичного виконання вентилятора. Серед механізмів, що приводяться в рух асинхронними двигунами, частка вентиляторів становить 37,7%. Основна їх кількість припадає на вентилятори санітарно-технічного призначення, що здійснюють кондиціонування повітря. Незважаючи на відносно невелику потужність цих вентиляторів (до 100 кВт), на

них припадає значна сумарна споживана енергія. У зв'язку з цим, особливе значення для вентиляторів має застосування регульованого електропривода, тому що ККД в цьому випадку в середньому на 12% вище, ніж з використанням нерегульованого електропривода.

Вентилятори, на відміну від інших турбомеханізмів, завжди працюють на мережу без протитиску, внаслідок чого залежність моменту статичного опору на валу приводного двигуна від швидкості носить квадратичний характер, а потужність, що підводиться до вентилятора без урахування втрат на тертя в підшипниках, пропорційна кубу швидкості. Вентилятори мають великий момент інерції, який іноді на порядок і більше перевищує момент інерції приводного двигуна. Це ускладнює їх пуск, а в деяких випадках, вимагає застосування електричного гальмування для швидкої зупинки робочого колеса.

Електропривод вентилятора повинен відповідати таким технічним вимогам і умовам експлуатації:

1. Вентилятор працює на нагнітання без протитиску в двох технологічних режимах:

- регулювання продуктивності при нормальних атмосферних умовах в межах зони регулювання параметрів вентилятора;

- підтримка продуктивності при тиску не менш ніж заданий, в умовах зміни температури повітря на стороні всмоктування в межах від +30° до - 40° С.

2. Режим роботи - тривалий.

3. Мережа трифазна 380 В, 50 Гц.

Розрахуємо розрахункову потужність вентилятора

$$P = \frac{QH}{\eta_s} = \frac{10000 \cdot 850}{3600 \cdot 0,8} \cdot 10^{-3} = 2,95 \text{ кВт.}$$

Приймаємо ККД передачі  $\eta_n = 100 \%$ , коефіцієнт запасу  $k_3 = 1,1$ .

Потужність на валу вентилятора

$$P = k_3 \frac{P}{\eta_n} = 1,1 \frac{2,95}{1,0} = 3,25 \text{ кВт.}$$

При синхронній швидкості 1500 об/хв найближчим за потужністю є електродвигун АИР100L4 [8], номінальна потужність якого дорівнює 4 кВт. Зауважимо, що двигун обраної потужності задовольняє роботі вентилятора в усій області аеродинамічних характеристик при нормальних атмосферних умовах. Технічні

характеристики електродвигуна наведені в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1.

Технічні характеристики електродвигуна

Типорозмір	АИР100L4
Напруга $U_n$ , В	380
Потужність $P_n$ , кВт	4,0
Частота обертів $n_n$ , об/хв	1425
Струм $I_n$ , А	8,8
ККД $\eta_n$ , %	85,9
$\cos\phi_n$	0,77
$K_n = \frac{M_n}{M_n}$	2,5
$K_{max} = \frac{M_{max}}{M_n}$	3
$k_{идв} = \frac{I_n}{I_n}$	6
Момент інерції $J$ , кг·м <sup>2</sup>	0,0101
Ступінь захисту	IP55

Синхронна кутова швидкість двигуна

$$\omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60} = \frac{2\pi \cdot 1500}{60} = 157 \text{ рад/с}.$$

Номінальна кутова швидкість двигуна

$$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60} = \frac{2\pi \cdot 1425}{60} = 149,15 \text{ рад/с}.$$

Номінальний момент двигуна

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{4000}{149,15} = 26,8 \text{ Нм}.$$

Максимальний момент двигуна

$$M_{max} = m_{max} M_n = 3 \cdot 26,8 = 80,5 \text{ Нм}.$$

Пусковий момент двигуна

$$M_n = m_n M_n = 2,5 \cdot 26,8 = 67 \text{ Нм}.$$

Номінальний струм статора

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_n \eta_n \cos\phi_n} = \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,859 \cdot 0,77} = 9,2 \text{ А}.$$



Максимальний струм двигуна при прямому пуску

$$I_{1max} = k_{iob} I_n = 6 \cdot 9,2 = 55 A.$$

Відповідно до умови  $I_{np} \geq I_n$  вибираємо перетворювач частоти моделі MICROMASTER 6SE6420-2UD24-0BA1 виробництва концерну SIEMENS [8].

Характеристики перетворювача частоти SIEMENS MICRO-MASTER 420.

Напруга живлення ЗАС 380-480 В +10/-10% 47-63 Гц.

Потужність при постійному моменті навантаження 4 кВт, перевантаження 150% до 60 сек.

Вихідний струм 10,2 А.

Потужність при змінному моменті навантаження 4 кВт.

Ступінь захисту IP20.

Температура навколишнього середовища при експлуатації від -10°C до +5°C.

Особливості Siemens Micromaster 420

Просте введення в експлуатацію.

Особливо гнучка конфігурація завдяки модульній конструкції.

Безшумна робота двигуна завдяки високій частоті ШИМ.

Повний захист двигуна й перетворювача.

Перевантажувальна здатність 150 % від розрахункового вихідного струму в інтервалі 60 с кожні 5 хв.

Захист від перенапруги й зниженої напруги.

Захист від перегріву перетворювача.

Захист двигуна за допомогою підключення РТС терморезистора.

Захисне заземлення.

Захист від короткого замикання.

Тепловий захист по  $I_{2t}$ .

Захист від блокування двигуна.

Захист від перекидання інвертора.

Захист від зміни параметрів.

Новітня технологія IGBT.

Цифрове мікропроцесорне керування.

Пряме керування потоком двигуна (FCC) для поліпшення динамічних характеристик і оптимального керування двигуном.

U/f керування квадратичне.

Блок-схема перетворювача наведена на рисунку 8.1.

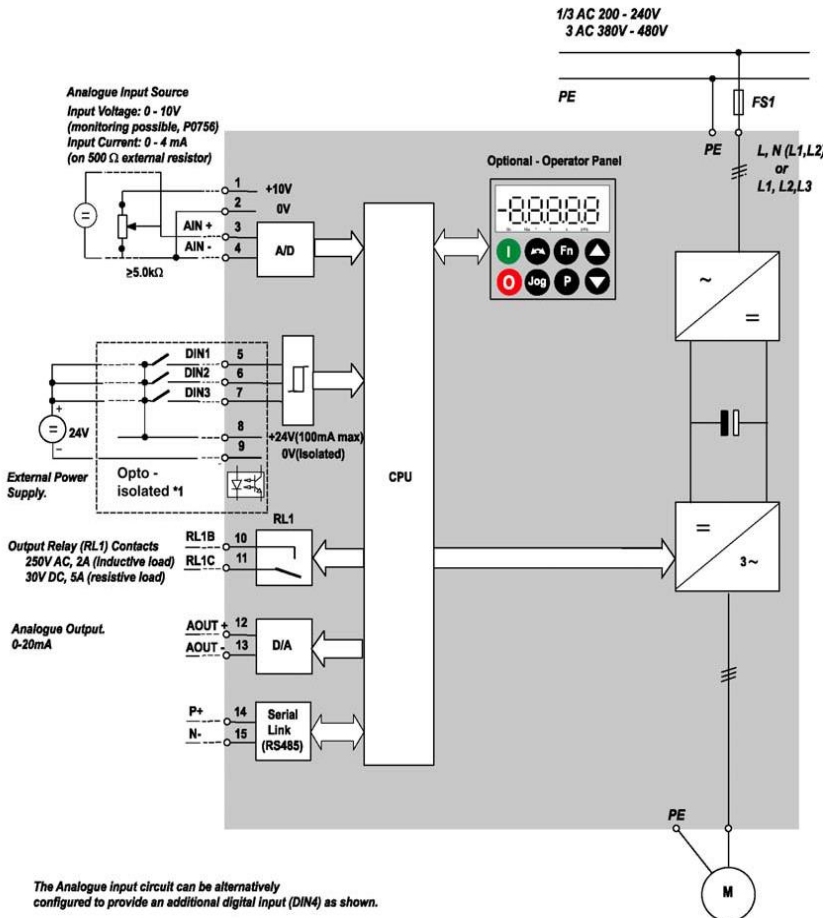


Рис.8.2. Блок-схема перетворювача MICROMASTER 6SE6420-2UD24-0BA1.

### Задача 8.2.

Розрахувати параметри та вибрати частотно-регульований електропривід механізму головного підйому мостового крана.

Вихідні дані для розрахунку: Число циклів за годину  $Z = 10$ ; кратність поліспахів  $i_{п} = 24$ ; ККД головного підйому під навантаженням  $\eta = 0,79$ ; вантажопідйомність  $Q = 10$  т; маса захватного пристрою  $m_0 = 1200$  кг; діаметр барабана  $D_6 = 450$  мм; передаточне число редуктора  $i_p = 34,2$ ; швидкість підйому вантажу  $V = 15$  м/хв.; висота підйому  $L = 8$  м.

Механізм підйому забезпечується регульованим електроприводом. Типова кінематична схема механізму головного підйому наведена на рисунку 8.2.

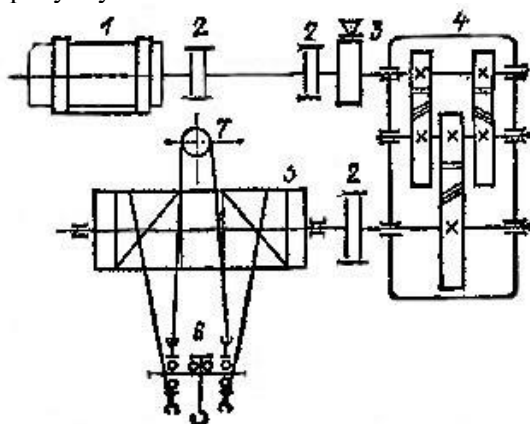


Рис.8.2. Кінематична схема механізму головного підйому  
1 - двигун; 2 - муфта; 3 - гальмо; 4 - редуктор; 5 - барабан; 6 - поліспасти; 7 - нерухомий блок поліспасти.

### *Розв'язок*

Наведемо короткі відомості про мостовий кран. Мостовий кран являє собою міст, що переміщається по крановим рейкам на ходових колесах, які встановлені на кінцевих балках. Рейки укладають на підкранові балки, що спираються на виступи верхньої частини колон цеху. Механізм пересування встановлений на моста крана. Управління всіма механізмами відбувається з кабіни, прикріпленою до мосту крана. Живлення електродвигунів здійснюється по цеховим троліям. Для підведення електроенергії застосовують струмоз'йомники ковзаючого типу, прикріплені до металокопункції крана. У сучасних конструкціях мостових кранів струмопідвід здійснюється за допомогою гнучкого кабелю. Привод ходових коліс здійснюється від електродвигуна через редуктор і трансмісійний вал.

Будь-якій вантажопідйомний кран, відповідно до вимог безпеки, може мати для кожного робочого руху в трьох площинах наступні самостійні механізми: механізм підйому-опускання вантажу, механізм пересування крана в горизонтальній площині і механізми обслуговування зони роботи крана (пересування візка). До основних параметрів підйомного механізму крана відносяться

вантажопідйомність, маса захватного пристрою, діаметр барабана, передаточне число редуктора, швидкість підйому, висота підйому. Поліспаст – таль, що натягується багатьма мотузками або канатами, вантажопідйомний пристрій, що складається із зібраних в рухливу і нерухому обойми блоків, послідовно огинають канатом або ланцюгом, і призначене для виграшу в силі або в швидкості.

До основних напрямів модернізації привода відноситься перехід на сучасну елементну базу на основі частотного перетворювача. При підключенні частотного перетворювача пуск двигуна відбувається плавно, без пускових струмів і ударів, що знижує навантаження на двигун і механізми, збільшує строк їхньої служби.

Частотний перетворювач дозволяє заощаджувати на непродуктивних витратах енергії, оскільки має функцію енергозбереження. Ця функція дозволяє при виконанні тієї ж роботи заощаджувати додатково від 5 до 30% електроенергії шляхом підтримки електродвигуна в режимі оптимального ККД.

Вага вантажозахватного пристрою з вантажем

$$G_r = Q \cdot g \cdot 10^3 = 10 \cdot 9,8 \cdot 10^3 = 98000 \text{ Н.}$$

Вага вантажозахватного пристрою без вантажу

$$G_0 = m_0 \cdot g = 1200 \cdot 9,8 = 11760 \text{ Н.}$$

Передаточне число редуктора з урахуванням кратності поліспастів

$$i_{pn} = i_p \cdot i_n = 34,2 \cdot 2 = 68,4.$$

Визначаємо момент статичного опору на валу двигуна при підйомі вантажу

$$M_{c1} = \frac{(G_r + G_0) \cdot D_0}{2 \cdot i_{pn} \cdot \eta} = \frac{(98000 + 11760) \cdot 0,45}{2 \cdot 68,4 \cdot 0,79} = 457 \text{ Нм.}$$

Визначаємо момент статичного опору на валу двигуна при опусканні вантажу (гальмівний спуск)

$$M_{c2} = M_{c1} \cdot (2 \cdot \eta - 1) = 457 \cdot (2 \cdot 0,79 - 1) = 265 \text{ Нм.}$$

Знайдемо коефіцієнт завантаження крана на холостому ході

$$K_3 = \frac{G_0}{G_0 + G_r} = \frac{11760}{11760 + 98000} = 0,107.$$

Знаходимо ККД підйомника при підйомі й спуску вантажозахватного пристрою без вантажу

$$\eta_0 = \frac{K_3 \cdot \eta}{0,6 \cdot (1 - \eta) + 0,6 \cdot K_3 \cdot \eta + 0,4 \cdot K_3} =$$

$$= \frac{0,107 \cdot 0,79}{0,6(1 - 0,79) + 0,6 \cdot 0,107 \cdot 0,79 + 0,4 \cdot 0,79} = 0,38.$$

Визначаємо момент статичного опору на валу двигуна при підйомі вантажозахватного пристрою

$$M_{c3} = \frac{G_0 \cdot D_0}{2 \cdot i_{pn} \cdot \eta_0} = \frac{11760 \cdot 0,45}{2 \cdot 68,4 \cdot 0,38} = 101,8 \text{ Нм.}$$

Визначаємо момент статичного опору на валу двигуна при спуску вантажозахватного пристрою без вантажу

$$M_{c4} = M_{c3} \cdot (2 \cdot \eta_0 - 1) = 101,8 \cdot (2 \cdot 0,38 - 1) = -63,6 \text{ Нм}$$

Обчислюємо еквівалентний статичний момент зі штрихом

$$M'_e = \sqrt{\frac{M_{c1}^2 + M_{c2}^2 + M_{c3}^2 + M_{c4}^2}{4}} = \sqrt{\frac{457^2 + 265^2 + 101,8^2 + (-63,6)^2}{4}} = 270,4 \text{ Нм.}$$

Обчислюємо час циклу

$$t_y = \frac{3600}{Z} = \frac{3600}{10} = 36.$$

Обчислюємо час роботи при русі з вантажем і без нього

$$t_{роб} = \frac{4 \cdot L}{V} = \frac{4 \cdot 8}{0,25} = 128 \text{ с.}$$

Обчислюємо тривалість включення механізму під час роботи

$$TB_p = \frac{128}{360} \cdot 100\% = 35,6 \%$$

Приводимо  $TB_p$  до найближчого стандартного значення  $TB_{cm} = 40\%$ .

Визначаємо еквівалентний статичний момент

$$M_e = M'_e \sqrt{\frac{TB_p}{TB_{cm}}} = 270,8 \sqrt{\frac{35,6}{40}} = 255,5 \text{ Нм.}$$

Знаходимо частоту обертання двигуна

$$n_0 = \frac{60 \cdot V \cdot i_{pn}}{\pi \cdot D_0} = \frac{60 \cdot 0,25 \cdot 68,4}{\pi \cdot 0,45} = 726 \text{ об / хв.}$$

Знаходимо середню еквівалентну потужність механізму

$$P_e = \frac{M_e \cdot n}{9550} = \frac{255,5 \cdot 726}{9550} = 19,4 \text{ кВт.}$$

По отриманій потужності механізму вибирається крановий

електродвигун серії 4МТК для роботи в складі частотно-регульованого привода (додаток В), [8].

Докладні технічні характеристики наведені у таблиці 6.4 при номінальній напрузі 380 В, 50 Гц, номінальному режимі роботи S3-TV40% за ДСТ 183-74.

Технічні характеристики двигуна:  $P_n = 22$  кВт,  $n_0 = 735$  об/хв.,  $I_1 = 59$  А,  $M_n = 285$  Н·м,  $M_{max} = 885$  Н·м,  $J_{дв} = 0,63$  кг·м<sup>2</sup>, ККД = 86,5%.

Відповідно до умови  $I_{пр} \geq I_n$  і  $U_{пр} \geq U_n$  вибираємо перетворювач частоти компанії Delta Electronics [8], параметри якого наведені в таблиці 8.2.

Технічні характеристики перетворювача

Таблиця 8.2

Серія	Модель	Потужність, кВт	Кількість фаз на вході перетворювача	Перевантажувальний момент
VFD-C	VFD185C43A	18,5	3-ф/380	200%

Перетворювачі частоти серії VFD-F призначені для керування швидкістю обертання трифазних асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором потужністю від 0,75 до 220 кВт.

Застосування VFD185C43A:

- підійомно-транспортне устаткування: крани, лебідки, пасажирські ліфти, елеватори, ескалатори, редуктори, конвеєри й т.д.;
- устаткування для хімічної й деревопереробної промисловості: екструдери, змішувачі, вібратори, сепаратори, натяжні пристрої, піскостру-меневі апарати;
- верстатне устаткування: верстати з ЧПУ, токарні, фрезерні, поздовжньо-стругальні, свердлильні, шліфувальні верстати.

Особливості універсального перетворювача частоти Delta VFD-32000

Режими керування швидкістю, моментом, положенням.

Модульний дизайн із значною кількістю плат розширення.

Вбудований ЖКМ із LD-Програмуванням.

Керування/обмеження моменту в 4-х квадрантах.

Керування стандартними асинхронними двигунами й синхронними сервомоторами в розімкненому й у замкненому контурі швидкості.

Стартовий момент: до 150% на 0,5 Гц (без зворотного зв'язку); до 150% на 0 Гц (з енкодером).

Стабільне керування швидкістю на низьких частотах, до

200% моменту на нульовій швидкості.

Функція безпечної зупинки двигуна у відповідності зі стандартами EN 954-1, EN 60204-1 і IEC61508 для запобігання травмування персоналу від випадкового запуску.

Вбудовані CANopen і ModBUS, Profibus-DP, DeviceNet, ModBUS TCP і Ethernet/IP інтерфейси.

Блок-схема перетворювача VFD185C43A наведена на рисунку 8.3.

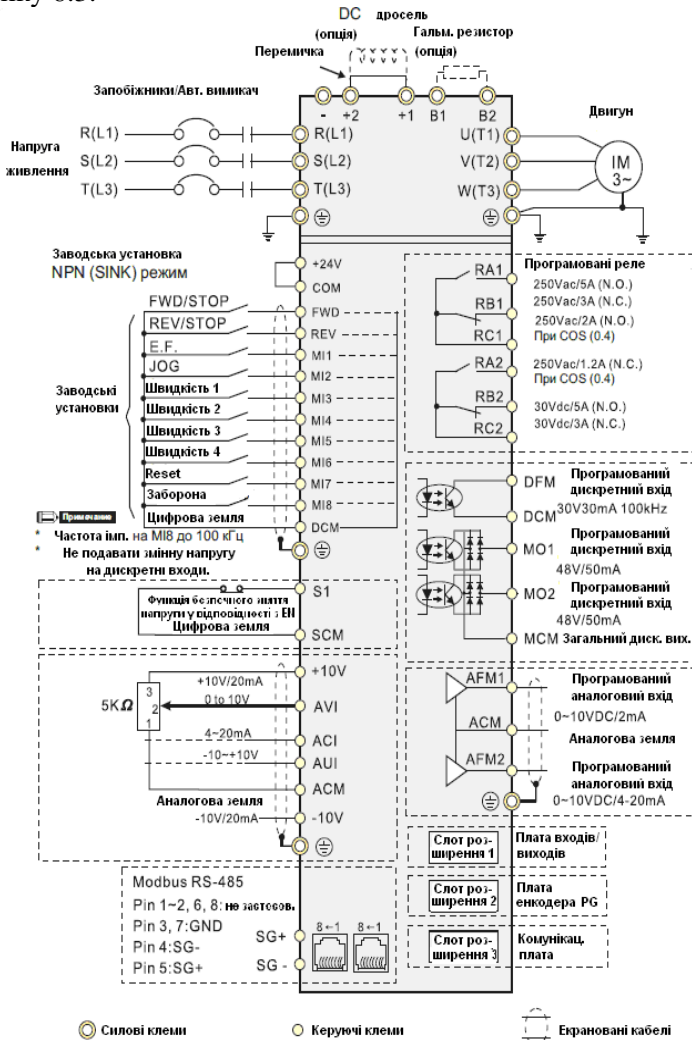


Рис.8.3. Блок-схема перетворювача VFD185C43A.

### Задача 8.3.

Розрахувати систему електропривода рольганга ножиців.

**Вихідні дані:** Число роликів  $N = 16$ ; маса ролика  $m_p = 1$  т; діаметр ролика  $D = 0,4$  м; діаметр шийки ролика  $d_{ш} = 140$ , мм; коефіцієнт тертя ковзання  $\mu = 0,03$ ; коефіцієнт тертя кочення  $f = 1,5$ , мм; момент інерції ролика  $J_p = 20$  кг·м<sup>2</sup>; момент інерції поздовжнього вала  $J_e = 4$  кг·м<sup>2</sup>; момент інерції конічного колеса  $J_k = 0,9$  кг·м<sup>2</sup>; маса заготовки  $m_z = 6$  т; швидкість транспортування  $V_e = 0,7$  м/с; допустиме прискорення  $a = 1$  м/с<sup>2</sup>; число циклів за годину  $Z = 70$ ; сумарний час роботи  $t_p = 45$  с.

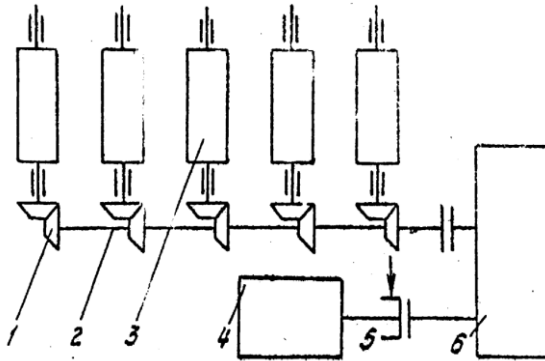


Рис.8.4. Кінематична схема рольганга: 1 - конічна шестірня; 2 - поздовжній вал; 3 - ролик; 4 - електродвигун; 5 - гальмівний шків; 6 - редуктор.

### Розв'язок

На початку коротко розглянемо призначення і основні складові рольгангу.

Рольганги входять до складу устаткування технологічних ліній прокатного цеху чорної металургії. Рольганги являють собою механізми, за допомогою яких здійснюється транспортування заготовок, напівфабрикатів і готових виробів у ході технологічного процесу прокатного виробництва. Сучасні прокатні стани характеризуються складним технологічним процесом обробки металу, тому загальна довжина рольгангів досить значна, а маса їх іноді досягає 20-30% від маси механічного устаткування всього прокатного стану.

Рольганг ножиців служить для переміщення заготовки, установки її для порізу на заданій позначці. Заготовка довжиною  $L$  подається на рольганг транспортером. Рольганг запускається,



переміщує заготовку на довжину  $L/2$  і зупиняється. Різання заготовки ножицями відбувається при нерухоливому ролгангу, відрізана частина заготовки знімається з ролганга транспортером. Після цього ролганг запускається вдруге, переміщаючи частину заготовки, що залишилася, (довжиною  $L/2$ ) за ножиці, звідки вона знімається з ролганга.

Кутова швидкість обертового ролика

$$\omega_p = \frac{2V_B}{D} = \frac{2 \cdot 0,7}{0,4} = 3,5 c^{-1}.$$

Приймаємо передаточне число циліндричного редуктора  $i_1 = 4$ , конічної передачі  $i_2 = 4$ .

Розрахункова кутова швидкість двигуна

$$\omega_{ос} = \omega_p \cdot i_1 \cdot i_2 = 3,5 \cdot 4 \cdot 4 = 56 c^{-1}.$$

Маса тіла, що рухається, і маса деталей, що опираються на вузол кочення

$$m = m_3 + N \cdot m_p = 6000 + 16 \cdot 1000 = 22000 \text{ кг}.$$

Загальне передаточне число

$$i = i_1 \cdot i_2 = 4 \cdot 4 = 16.$$

Загальний ККД передачі

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 = 0,98 \cdot 0,97 = 0,95.$$

Момент сил тертя в підшипниках:

$$M_{тп} = \frac{m d_{ш} \mu g}{2i\eta} = \frac{22000 \cdot 0,14 \cdot 0,03 \cdot 9,81}{2 \cdot 16 \cdot 0,95} = 29,8 \text{ Нм}.$$

Момент сил тертя кочення

$$M_{тк} = \frac{m_3 g f}{i\eta} = \frac{6000 \cdot 9,81 \cdot 0,0015}{16 \cdot 0,95} = 5,8 \text{ Нм}.$$

Момент сил тертя при буксуванні

$$M_B = M_{тп} + \frac{m D \mu g}{2i\eta} = 29,8 + \frac{22000 \cdot 0,4 \cdot 0,3 \cdot 9,81}{2 \cdot 16 \cdot 0,95} = 262 \text{ Нм}.$$

Статичний момент навантаження

$$M_{ст} = M_{тп} + M_{тк} + M_B = 29,8 + 5,8 + 262 = 298 \text{ Нм}.$$

Приведений до вала двигуна момент інерції

$$J_{прив} = \frac{J_в}{i_1^2} + \frac{J_к}{i_1^2 \cdot i_2^2} + \frac{J_p}{i_{ред}^2} + \frac{m_3 \cdot V_B^2}{\omega_{ос}^2} = \frac{4}{4^2} + \frac{0,9}{4^2 \cdot 4^2} + \frac{20}{16_0^2} + \frac{6000 \cdot 0,7^2}{56^2} = 1,27 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Динамічний момент

$$M_{\text{дин}} = \frac{\varepsilon J}{\eta} = \frac{2a}{D} \cdot \frac{J_{\text{прив}}}{\eta} = \frac{2 \cdot 1}{0,4} \cdot \frac{1,27}{0,95} = 6,68 \text{ Нм.}$$

Повний момент на валу двигуна

$$M_{\text{ов}} = M_{\text{см}} + M_{\text{дин}} = 298 + 6,68 = 304,68 \text{ Нм.}$$

Час циклу

$$t_{\text{ц}} = \frac{3600}{Z} = \frac{3600}{70} = 51,4 \text{ с.}$$

Тривалість включення механізму під час роботи

$$TB_p = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} \cdot 100\% = \frac{45}{51,3} \cdot 100\% = 88\%.$$

Еквівалентний момент, з урахуванням того, що в каталозі технічні дані електродвигунів постійного струму серії Д наведені для  $TB_{\text{ст}}=40\%$

$$M_e = M_{\text{ов}} \sqrt{\frac{TB_p}{TB_{\text{ст}}}} = 304,68 \cdot \sqrt{\frac{88}{40}} = 452 \text{ Нм.}$$

Потужність двигуна, що потрібна для обертання роликів рольганга

$$P_{\text{ов}} = M_e \cdot \omega_{\text{ов}} = 452 \cdot 56 \cdot 10^{-3} = 25,3 \text{ кВт.}$$

Частота обертання двигуна

$$n_{\text{ов}} = \frac{60 \cdot \omega}{2\pi} = \frac{60 \cdot 56}{2\pi} = 535 \text{ об / хв.}$$

За отриманими параметрами з умови  $P_{\text{н}} \geq P_{\text{ов}}$  вибирається електродвигун постійного струму краново-металургійної серії Д (додаток А). Технічні дані двигуна наведені в таблиці 8.3.

Технічні характеристики електродвигуна

Таблиця 8.3.

Тип двигуна	Д 810
Потужність, $P_{\text{н}}$	35 кВт
Номінальна частота обертання, $n_{\text{н}}$	600 об/хв.
Струм якоря, $I_{\text{я}}$	148 А
Номінальна напруга, $U$	220 В
Момент інерції, $J_{\text{дв}}$	3,65 кг·м <sup>2</sup>
Збудження	паралельне

Додаток Д.1.

Технічні дані електродвигунів  
Технічні дані електродвигунів серії Д при ПВ=40%

Тип	Паралельне збудження						Послідовне збудження											
	$P_n$ , кВт	$P_{2\phi}$ , кВт	N	a	$r_n$ , Ом	$J_{max}$ , кгм <sup>2</sup>	$J_{max}$ , об/хв	$I_n$ , А	$I_n$ , об/хв	$\Phi_n$ , 0,01°Бб	$r_b$ , Ом	$r_b$ , вв	$\Phi_n$ , 0,01°Бб	$I_n$ , об/хв	$r_b$ , Ом			
220 В. Тихохідне виконання																		
Д12	2,4	3	990	2	1,63	0,05	3600	14	1230	0,49	1800	260	0,7	15	1150	0,45	83	0,59
Д21	3,6	4,5	920	2	0,94	0,125	3600	21	1080	0,6	1790	142	1,2	22	1040	0,57	92	0,28
Д22	4,8	6	696	2	0,57	0,15	3600	26	1150	0,77	1480	130	1,35	28	970	0,83	82	0,26
Д31	6,8	8,5	738	2	0,42	0,3	3600	37	880	0,95	1870	120	1,45	39	900	0,86	67	0,11
Д31	9,5	12	558	2	0,28	0,425	3300	57	800	1,4	1470	94	1,85	53	760	1,34	48	0,097
Д41	13	15	492	2	0,16	0,8	3000	70	720	1,81	1480	70	2,5	71	730	1,65	40	0,049
Д806	17	20	372	2	0,11	1	2600	84	710	2,55	1400	65	2,7	92	640	2,5	36	0,052
Д808	24	30	278	2	0,054	2	2300	112	630	3,86	1250	44	3,93	125	615	3,53	30	0,031
Д810	35	40	234	2	0,035	3,65	2200	148	600	4,82	1500	46	3,9	182	610	4,31	24	0,016
Д812	47	53	210	2	0,023	7	1900	192	565	5,68	1350	34	5,3	242	560	5,28	21	0,01
Д814	70	80	608	8	0,013	10,2	1700	280	560	8,33	1300	34	5,5	356	550	7,5	15	0,007
Д816	85	97	504	8	0,0091	16,3	1600	350	535	10,5	1140	26	7,1	430	540	9,26	12	0,005
Д818	100	130	505	8	0,0066	27,5	1500	415	470	11,3	1210	22	8,3	530	500	9,77	11	0,003
220 В. Швидкохідне виконання																		
Д21	4,4	5,5	690	2	0,53	0,125	3600	25	1500	0,6	1790	142	1,2	26	1340	0,61	92	0,28
Д22	6,5	8	522	2	0,32	0,15	3600	34	1750	0,78	1480	130	1,35	37	1300	0,85	63	0,19
Д31	9,5	12	490	2	0,19	0,3	3600	51	1420	0,87	1870	120	1,45	53	1190	0,95	67	0,11
Д32	13,5	16	372	2	0,12	0,425	3300	68	1240	1,42	1470	94	1,85	72	1100	1,47	39	0,05
Д41	18	22	310	2	0,072	0,8	3000	91	1160	1,87	1480	70	2,5	96	1060	1,85	40	0,05
Д806	23	27,5	246	2	0,047	1	3600	110	1060	2,58	1400	65	2,7	120	1010	2,48	26	0,05
Д808	30	35	210	2	0,029	2	2300	134	825	3,85	1250	44	3,93	155	850	3,47	24	0,02

## Додаток Д.2.

Технічні дані асинхронних двигунів с короткозамкненим ротором, ПВ=40%, 380 В, 50 Гц

Тип	$P_{\text{вп}}$ кВт	$P_{\text{вп}}$ кВА	$\cos \varphi$	$I_{\text{вп}}$ А	$I_{\text{вп}}$ А	$M_{\text{вп}}$ Нм	$M_{\text{вп}}$ Нм	$\tau_{1, \text{вп}}$ Ом	$I_{\text{вп}}$ А	$R_{\text{вп}}$ Ом	$X_{\text{вп}}$ Ом	$K_{\text{вп}}$	$J_{\text{вп}}$ кг·м <sup>2</sup>
4МТКФ(Н)112Л4	3,7	1390	0,83	10,5	41	56	56	-	-	-	-	-	-
4МТКФ(Н)112ЛВ4	5,5	1400	0,82	15,2	61	85	91	-	-	-	-	-	-
4МТКФ(Н)112Л4	7,5	1390	0,85	18,5	87	121	131	-	-	-	-	-	-
4МТКФ(Н)112ЛВ4	11	1410	0,87	27,5	152	195	215	-	-	-	-	-	-
4МТКФ(Н)112Л6	2,2	880	0,73	8	22,7	62	64	2,97	4,81	9,66	5,87	5,9	0,035
4МТКФ(Н)112ЛВ6	3,7	870	0,75	10,6	37,2	114	114	1,55	7,97	5,7	3,34	2,44	0,045
4МТКФ(Н)132Л6	5,5	900	0,75	13,6	57	145	155	1,07	8	3,36	2,87	1,97	0,09
4МТКФ(Н)132ЛВ6	7,5	900	0,7	18,3	79	316	225	0,68	10,1	2,37	1,91	1,2	0,11
4МТКФ(Н)160Л6	11	910	0,76	29	148	340	395	0,35	20,4	1,15	1,18	0,695	0,23
4МТКФ(Н)160ЛВ6	15	930	0,78	36,5	203	480	560	0,236	22,7	0,81	0,864	0,39	0,28
4МТКФ(Н)200Л6	22	935	0,79	51	275	706	760	0,235	31,3	0,5	0,65	0,319	0,57
4МТКФ(Н)200ЛВ6	30	935	0,78	70	380	962	980	0,132	42,1	0,36	0,455	0,173	0,68
4МТКФ(Н)160Л8	7,5	690	0,71	24	91,5	260	310	0,48	16,4	1,81	2,24	1,67	0,23
4МТКФ(Н)160ЛВ8	11	700	0,74	33,5	141	420	500	0,265	25,2	1,1	1,43	0,79	0,29
4МТКФ(Н)200Л8	15	695	0,71	40	185	638	657	0,235	25,4	0,77	0,9	0,546	0,62
4МТКХ200ЛВ8	22	700	0,69	60	295	632	981	0,14	43,3	0,47	0,58	0,293	0,74
4МТКХ225М8	30	700	0,77	68	226	1128	1128	0,14	38,8	0,45	0,57	0,386	1,07
4МТКХ225Л8	37	710	0,78	86	460	1390	1470	0,1	-	-	-	-	-

## Використана література

1. Воронин С.М. Электромеханика и автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. Учеб. пособие [электронное издание] / С.М. Воронин, Е.А. Шумилов, М.В. Тамьярова. – Самара, 2016. – 16 Мб.
2. Воскобойник В.Э. Основы электропривода производственных машин и комплексов [текст]: учебное пособие / В.Э. Воскобойник, В.А. Бородай – Д.: Государственный ВУЗ «НГУ», 2015. – 121 с.
3. Бондаренко В.І. Основи електричного привода. Навчальний посібник. – Запоріжжя.: ЗНТУ, 2013. – 314 с.
4. Булгар В.В. Теорія електроприводу: збірник задач / ОНПУ. – Одеса: Поліграф, 2016 – 408 с.
5. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. – СПб.: Энергоатомиздат, 2017. – 496 с.
6. Петухов С. В. Электропривод: Учебное пособие / С. В. Петухов, М.В. Кришьянис. – Архангельск: С(А)ФУ, 2015. – 303 с.
7. Попович М.Г. Теорія електропривода: Підручник / М.Г. Попович, М.Г. Борисюк, В.А. Гаврилюк та ін.; за ред. М.Г. Поповича. – К.: Вища школа, 2013. – 494 с.
8. Попович М.Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович та ін. – К.: Либідь, 2015. – 680 с.

## Зміст

	ст.
<b>Передмова</b> .....	3
<b>Тема 1.</b> Механіка електроприводу.....	4
<b>Тема 2.</b> Електромеханічні характеристики електроприводів постійного струму.....	10
<b>Тема 3.</b> Електромеханічні характеристики електроприводів змінного струму.....	25
<b>Тема 4.</b> Регулювання швидкості обертання електроприводів.....	37
<b>Тема 5.</b> Автоматичне регулювання кутової швидкості та моменту електроприводів. ....	47
<b>Тема 6.</b> Перехідні режими в електроприводах.....	56
<b>Тема 7.</b> Розрахунок потужності та вибір електроприводів.....	62
<b>Тема 8.</b> Розрахунок електроприводів із системами керування.....	69
<b>Додатки</b> .....	83
<b>Використана література</b> .....	85

**Основи електроприводу** [Текст]: Методичні вказівки до практичних занять для здобувачів початкового рівня (короткий цикл) вищої освіти освітньо-професійної програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузь знань 14 Електрична інженерія спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної форми навчання / укладачі В.В. Лишук, С.П. Літковець. – Луцьк : ТК Луцького НТУ, 2019. – 88 с.

Комп'ютерний набір  
Редактор

В.В. Лишук  
В.В. Лишук

Підписано до друку «\_\_»\_\_\_\_\_2019 р. Формат 60x84/16. Папір офс.  
Гарнітур. Таймс. Ум. друк. арк. 5,5  
Тираж 50 прим

Інформаційно-видавничий відділ  
Луцького національного технічного університету  
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75  
Друк – ІВВ Луцького НТУ

