

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
до практичних занять  
з дисципліни

# **ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНЕ ТА ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ**

*(для студентів 3, 4 курсів всіх форм навчання  
напряму підготовки 6.050702 – Електромеханіка  
і слухачів другої вищої освіти за спеціальністю  
“Електромеханічні системи автоматизації та електропривод”)*

**Харків**  
**ХНУМГ**  
**2015**

Методичні вказівки до розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Підйомно-транспортне та технологічне обладнання» (для студентів 3 та 4 курсу всіх форм навчання за напрямом підготовки 6.050702 – Електромеханіка і слухачів другої вищої освіти за спеціальністю «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад.: В. М. Фатєєв, В. М. Шавкун. –Харків : ХНУМГ, 2015. – 44 с.

Укладачі: В. М. Фатєєв  
В. М. Шавкун

Рецизент: доц., к.т.н. кафедри ЕТ В. П. Андрейченко

Рекомендовано кафедрою електричного транспорту,  
протокол 14 від 07.05.2012р.

## Зміст

	стор.
Передмова.....	4
Позначення основних величин і одиниць їх вимірювання.....	5
1 Визначення статичних навантажень електроприводів підйомно-транспортного обладнання.....	7
1.1 Основні положення та методичні рекомендації.....	7
Приклад 1.....	9
Приклад 2.....	15
2 Режими електромеханічного перетворення енергії. Усталений та неусталений рух електроприводу підйомно-транспортного обладнання.....	17
2.1 Основні положення та методичні рекомендації.....	17
2.2. Режими роботи двигунів.....	20
2.3 Перехідні процеси при постійному значенні динамічного моменту.....	21
Приклад 3.....	22
Приклад 4.....	24
2.4 Перехідні процеси при непостійному значенні динамічного моменту.....	30
Приклад 5.....	33
2.5 Спрощені методи розрахунків перехідних процесів.....	39
Приклад 6.....	40
Приклад 7.....	41
Список рекомендованої літератури.....	43

## ПЕРЕДМОВА

Головною метою практичних занять з дисципліни “Підйомно-транспортне та технологічне обладнання” є закріплення та розширення знань, що набувають студенти на лекціях, чи під час самостійної роботи з літературою, а також набуття практичних навичок проведення розрахунків і вирішення конкретних задач, що входять до програм підготовки спеціалістів з напрямку “Електромеханіка”.

В методичних вказівках наведені задачі, пов’язані з використанням двигунів постійного та змінного струму, перетворювачів напруги в розімкнених та замкнених системах електроприводу, які мають бути використовувані при проведенні практичних занять з зазначеного курсу, а також для самостійного їх розв’язування студентами та контролю набутих ними знань. З метою ознайомлення з методикою розрахунків і вірного орієнтування студентів при самостійному вирішенні задач наведені розгорнуті приклади рішення типових задач.

З міркувань кращого засвоєння матеріалу та набуття належних навичок розв’язання задач, їх контекст у подальших розділах часто містить елементи попередніх розділів. Наприкінці коротких теоретичних положень кожної теми наведені конкретні розділи рекомендованої літератури для вивчення теоретичних положень.

Позначення основних величин і одиниць їх вимірювання

Позначення основних величин і одиниць їх вимірювання

Позначення	Назва вимірюваної величини	Одиниці вимірювання
1	2	3
A	Енергія (робота)	Дж
a	Прискорення	м/с <sup>2</sup>
a	Число паралельних гілок обмотки якоря	–
c	Теплоємність	Дж/°С
C	Постійні коефіцієнти	–
д	Діапазон керування	
d	Діаметр	м
E	Електрорушійна сила	В
e	Миттєве значення електрорушійної сили	В
H	Висота	м
h	Число включень двигуна за годину	–
F	Зусилля	Н
f	Частота змінного струму	Гц
J	Момент інерції	кг·м <sup>2</sup>
i	Струм	А
! i	Миттєве значення змінного струму	А
K <sub>E</sub>	Коефіцієнт пропорційності між ЕРС та $\omega$	–
K <sub>M</sub>	Коефіцієнт пропорційності між моментом (М) та струмом (I)	–
l	Довжина	м
L	Індуктивність	Гн
m	Маса	кг
m	Число фаз	–
M	Момент	Н·м
N	Число активних провідників обмотки якоря	–
n	Швидкість обертання	об/хв
P	Потужність	Вт
p	Кількість пар полюсів	–

1	2	3
r	Радіус	м
R	Активний опір	Ом
S	Ковзання	–
T	Стала часу	с
t	Час	с
U	Напруга	В
u	Миттєве значення напруги	В
V	Швидкість	м/с
W	Число витків обмоток	–
X	Реактивний опір	Ом
Z	Повний опір ланцюга змінного струму	Ом
$\rho$	Радіус приведення	м
$\omega$	Кутова швидкість	рад/с
$\varepsilon$	Кутове прискорення	рад/с <sup>2</sup>
$\varphi$	Кут повороту	рад
g	Прискорення вільного падіння	9,81 м/с <sup>2</sup>
G	Вага від дії міся	Н
$\Phi$	Магнітний потік	Вб
$\Psi$	Потокозчеплення	Вб
$\Omega$	Частота коливань	1/с
t°	Температура	°С
$\tau$	Температура перегріву	°С
$\eta$	Коефіцієнт корисної дії	–
i	Передавальне число індуктора	–
$\beta$	Жорсткість характеристики	Н·м·с
S	Шлях	м
$\gamma$	Питома вага	кг/м <sup>3</sup>
$\mu$	Коефіцієнт тертя	–
c	Жорсткість скручування	Н·м/рад
K <sub>R</sub>	Коефіцієнт трансформації опорів	–
K <sub>E</sub>	Коефіцієнт трансформації ЕРС	–
$\lambda$	Кратність максимального моменту двигуна	–
$\sigma$	Кратність приведенного струму ротора і статора	–

# 1 ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНОГО ОБЛАДНАННЯ

## 1.1 Основні положення та методичні рекомендації

Визначення статичних і динамічних навантажень є важливим етапом проектування електроприводу. Воно необхідно для побудови навантажувальної діаграми, вибору потужності двигуна та перевірки його по нагріву. Характер навантажень та межі їх зміни у значній мірі визначають режими роботи і вибір схеми електропривода. Зміна навантаження є головним збуренням при роботі електроприводу, через це без знання меж, в яких воно може змінюватися, неможливо забезпечити необхідну точність регулювання координат.

Розрахунок статичних навантажень виконується в результаті приведення моментів опору від однієї осі руху до другої і вирішується на основі енергетичного балансу системи. Втрати потужності в механічних передачах враховуються шляхом введення до розрахунків відповідного ККД -  $\eta_{\text{п}}$ .

При приведенні механічних величин від однієї осі до будь-якої іншої використовуються коефіцієнти приведення. Якщо обидві осі мають обертальний рух, це є передаточне число механічної передачі  $i = \omega_{\text{дв}} / \omega_{\text{м}}$ . При приведенні параметрів поступального руху механізму до обертального руху осі двигуна це радіус приведення  $R_{\text{пр}} = V_{\text{м}} / \omega_{\text{д}}$ . В канатних передачах мають застосування блоки — нерухомі та рухомі, або поліспасти. Передаточне число поліспасти  $i_{\text{п}}$  дорівнює подвоєній кількості рухомих блоків.

Кінематичні параметри електроприводу та механізмів, тобто пересування або шлях, швидкість та прискорення розраховуються за тими самими формулами із використанням передаточного числа  $i$ , та радіуса приведення  $R_{\text{пр}}$ .

В каталогах електричних двигунів ще й досі зустрічаються несистемні одиниці виміру кутової швидкості, або частоти обертання,  $n$  у обертах на хвилину, об/хв. Подекуди трапляються визначення моментів в кгс·м. На початку розв'язання задач треба перерахувати ці параметри в одиниці СІ за співвідношеннями:  $\omega = \pi \cdot n / 30$  та  $M_{(\text{Н м})} = 9,81 M_{(\text{кгс м})}$ .

Звертайте увагу, часто швидкості виробничих механізмів задаються в м/хв, а подачі верстатів в мм/хв або мм/с, їх теж потрібно привести до одиниць СІ.

Якщо позначити  $\omega_{\text{д}}$ , рад/с — кутову швидкість валу двигуна,  $\omega_{\text{м}}$  рад/с — кутову швидкість валу виробничого механізму, то на підставі рівняння балансу потужності отримаємо

$$M_{\text{см}} \cdot \omega_{\text{м}} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{п}}} = M_{\text{с}} \cdot \omega_{\text{д}} \quad (1)$$

З рівняння (1) визначимо  $M_c$  — момент, приведений до валу двигуна

$$M_c = M_{cm} \cdot \frac{\omega_n}{\omega_d} \cdot \frac{1}{i \cdot \eta_n} = \frac{M_{cm}}{i \cdot \eta_n} \quad (2)$$

де  $M_{cm}$  — момент опору виробничого механізму, Н·м;

$M_c$  — той же момент опору, приведений до валу двигуна.

Якщо існує декілька послідовних передач між двигуном та механізмом з передаточними числами  $i_1, i_2, i_3, \dots, i_n$ , та відповідними ККД  $\eta_{n1}, \eta_{n2}, \eta_{n3}, \dots, \eta_{nn}$ , то момент опору, приведений до швидкості валу двигуна визначається як

$$M_c = M_{cm} \cdot \frac{\omega_n}{\omega_d} \cdot \frac{1}{i} = M_{cm} \cdot \frac{1}{i_1 i_2 i_3 \dots i_n} \cdot \frac{1}{\eta_{n1} \eta_{n2} \eta_{n3} \dots \eta_{nn}} \quad (3)$$

Формули (2) та (3) справедливі для напрямку потоку енергії від двигуна до виконавчого органу. При спрямуванні потоку енергії від виконавчого органу, двигун починає працювати в режимі гальмування і енергія втрат в механічній передачі компенсується за рахунок механізму. Наприклад, при опусканні вантажу, покриття втрат енергії на тертя компенсується за рахунок потенційної енергії вантажу, й формули набувають вигляду

$$M_c = M_{cm} \cdot \frac{\omega_n}{\omega_d} \cdot \eta = \frac{M_{cm} \cdot \eta_n}{i} \quad (4)$$

Для декількох послідовних передач

$$M_c = \frac{M_{cm} \cdot \eta_{n1} \eta_{n2} \eta_{n3} \dots \eta_{nn}}{i_1 i_2 i_3 \dots i_n} \quad (5)$$

При поступальному русі приведення сил опору здійснюється аналогічно приведенню моментів опору. Якщо  $V$ , м/с — швидкість поступального руху механізму, а  $\omega_d$  — рад/с — кутова швидкість валу двигуна, то баланс потужності має вигляд

$$F_{cm} \cdot V \frac{1}{\eta_n} = M_c \cdot \omega_d, \quad (6)$$

де  $F_{cm}$  — сила опору виробничого механізму, Н.



Момент опору, приведений до швидкості валу двигуна, знайдемо як

$$M_c = \frac{F_{см} \cdot V}{\omega_d \cdot \eta_n}, \text{ або } M_c = \frac{F_{см} \cdot R_{пр}}{\eta_n} \quad (7)$$

У випадку зворотного приведення обертального руху до поступального, приведенне зусилля визначиться як

$$F_{см} = \frac{M_c \cdot \omega_d \cdot \eta_n}{V}, \text{ або } F_{см} = \frac{M_c \cdot \eta_n}{R_{пр}} \quad (8)$$

При вирішенні задач цього розділу належить повторити матеріал за літературою [1] — С. 29-37; 37-43; 83-84; [3] — С. 65-67; [4] — С. 26-31; [5] — С. 20-36; [6] — С. 16-24.

### Приклад 1

Для кінематичного ланцюгу механічної частини електроприводу підйомної лебідки визначити параметри одно масової розрахункової схеми, здійснивши операції приведення до валу двигуна для випадку підйому вантажу при наступних параметрах кінематичної схеми:

Момент інерції ротору двигуна  $D$   $J_d = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;

Момент інерції муфти  $M_1$  разом з шестернею  $z_1$   $J_1 = 0,02 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;

Момент інерції барабану  $B$  разом з муфтою  $M_2$  та шестернею  $z_2$   $J_2 = 2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;

Маса вантажу  $B$   $m_b = 1000 \text{ кг}$ ;

Радіус барабану  $R_B = 0,15 \text{ м}$ ;

Число зубців шестерень  $z_1 = 14$ ,  $z_2 = 86$ ;

ККД редуктора  $\eta_p = 0,97$ ;

ККД барабану та канатної передачі  $\eta_6 = 0,96$ .

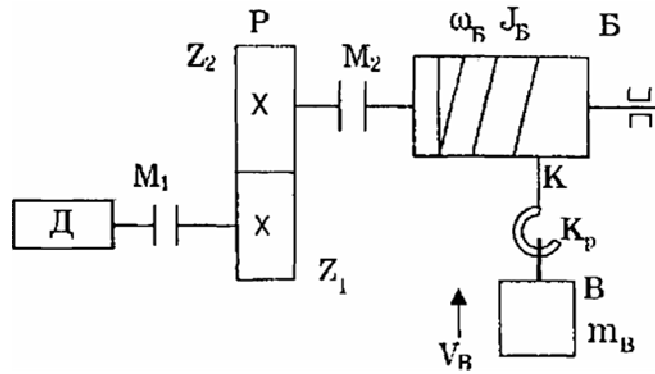


Рисунок 1 – Кінематична схема електроприводу підйомної лебідки

### Розв'язання

Передаточне відношення редуктора

$$i = \frac{z_2}{z_1}; i = \frac{26}{14} = 6.14.$$

Радіус приведення кінематичного ланцюгу

$$R_{пр} = \frac{R_б}{i}; R_{пр} = \frac{0,15}{6,14} = 0,025\text{м.}$$

Приведений до валу двигуна момент інерції

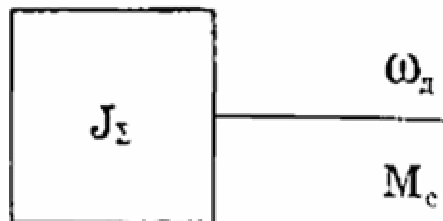
$$J_{\Sigma} = J_{д} + J_1 + \frac{J_2}{i^2} + m_{в} R_{пр}^2$$

$$J_{\Sigma} = 0,1 + 0,02 + \frac{2}{6,14^2} + 1000 \cdot 0,025^2 = 0,8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Приведений момент навантаження

$$M_c = \frac{m_{в} \cdot g \cdot R_{пр}}{\eta_p \cdot \eta_б}; M_c = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 0,025}{0,97 \cdot 0,96} = 263 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

Отримана одномасова розрахункова схема мас вигляд



### Задача 1

У котрому з наведених нижче виразів приведення фізичних величин від осі механізму до вісі обертання валу двигуна здійснене вірно?

## Зазначення

$\omega_m, \varepsilon_m$  — кутові частота та прискорення приводного колеса механізму;

$V_m, a_m, R$  — лінійні швидкість та прискорення, радіус колеса;

$M_m, J_m$  — маса та момент інерції колеса механізму;

$\omega_d, \varepsilon_d$  — кутові частота та прискорення валу двигуна;

$i, \eta$  — передаточне число та коефіцієнт корисної дії редуктора (ККД враховувати для випадку роботи електроприводу в режимі двигуна);

$M_m$  — момент опору на вихідному валу редуктора;

$M_d, J$  — моменти опору та інерції, приведені до валу двигуна.

$$\text{а) } \omega_d = \frac{\omega_m}{i}, \text{ б) } \omega_d = \frac{i \cdot V_m}{R}, \text{ в) } \omega_d = \omega_m \cdot i, \text{ г) } \omega_d = V_m \cdot R \cdot i,$$

$$\text{д) } M_d = \frac{M_m \cdot \omega_m}{\omega_d \cdot \eta}, \text{ е) } M_d = \frac{M_m \cdot \omega_m}{\omega_d \cdot R \cdot \eta}, \text{ ж) } M_d = \frac{M_m \cdot V_m}{\omega_d \cdot R \cdot \eta},$$

$$\text{з) } M_d = \frac{M_m \cdot \omega_d}{\omega_m \cdot \eta}, \text{ и) } M_d = \frac{M_m \cdot \eta}{i}, \text{ к) } M_d = \frac{M_m}{i \cdot \eta}, \text{ л) } \varepsilon_d = \varepsilon_m \cdot i,$$

$$\text{м) } \varepsilon_d = a_m \cdot R \cdot i, \text{ н) } \varepsilon_d = \frac{i \cdot a_m}{R}, \text{ о) } \varepsilon_d = \frac{\varepsilon_m}{i}, \text{ п) } J = \frac{J_m \cdot V_d}{\omega_d \cdot R},$$

$$\text{р) } J = \frac{m_m \cdot R^2}{i^2 \cdot \eta}, \text{ с) } J = \frac{J_m \cdot V_m^2}{\omega_d^2 \cdot R^2 \cdot \eta}, \text{ т) } J = \frac{m_m \cdot R^2}{2i^2}$$

### Задача 2.

Якою має бути механічна потужність електродвигуна вантажного візка, якщо він рівномірно рухається зі швидкістю 60 м/хв? Момент опору на вихідному валу редуктора складає 160 Н·м, передаточне число редуктора  $i = 20$ , а його коефіцієнт корисної дії  $\eta = 0,85$ . Радіус колеса 0,2 м.

### Задача 3.

Визначити значення моменту та механічної потужності електродвигуна приводу вантажної лебідки при підйманні та опусканні вантажу масою 3,2 т зі швидкістю 0,5 м/с, якщо передаточне число редуктора  $i = 40$ , діаметр барабану лебідки 0,5 м та ККД передачі  $\eta = 0,8$ .

### Задача 4.

Обчислити момент інерції шківу циліндричної муфти з 8 вісьовими отворами діаметром 20 мм, розташованими на відстані 100 мм від вісі обертання. Зовнішній діаметр шківу 160 мм, внутрішній — 60 мм. Товщина шківу 40 мм. Питома вага матеріалу, з якого виготовлено муфту, 7800 кг/м<sup>3</sup>.

### **Задача 5.**

Механізм повороту баштового крану приводиться до руху двома електродвигунами. На кожному валу двигунів присутня шестерня з кількістю зубців  $Z = 24$ , котра входить у зачеплення із зубцевим вінцем поворотної платформи; вінець має 2880 зубців. Маса поворотної платформи разом з вантажем складає 2000 кг, а її радіус інерції 15 м. Визначити сумарний приведений до валу двигуна момент інерції механізму повороту крана. Момент інерції одного двигуна  $2,08 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . ККД передачі  $\eta=0,87$ .

### **Задача 6.**

Електродвигун стругального верстата приводить у рух через трьохступеневий редуктор стіл з оброблюваним виробом масою 180 кг. Сила різання деталі  $F_p=300 \text{ Н}$ . Дані редуктора наступні. Перший ступінь: число зубців шестерінок  $Z_1 = 20$ ,  $Z_2 = 55$ ; їх моменти інерції відповідно  $J_1=0,01 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ,  $J_2=0,04 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Другий ступінь:  $Z_3=30$ ,  $Z_4=66$ ,  $J_3=0,025 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ,  $J_4=0,07 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Третій ступінь:  $Z_5=30$ ,  $Z_6=78$ ,  $J_5=0,04 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ,  $J_6=0,105 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , остання, шоста шестерня має зачеплення із зубцевою рейкою, встановленою на столі верстата, крок шестерні  $t_6 = 12,6 \text{ мм}$ . ККД кожної пари шестерень та зчеплення зі столом  $\eta = 0,98$ . Маса столу 123 кг. Момент інерції двигуна  $0,26 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Швидкість двигуна 955 об/хв. Визначити момент опору та момент інерції, приведені до валу двигуна. Коефіцієнт тертя столу та спрямовуючих станини  $K_T=0,06$ .

### **Задача 7.**

Визначити приведений до валу двигуна момент навантаження та кутову швидкість двигуна, якщо в кінематичній схемі приводу підйомної лебідки (приклад 1.) використано рухомий блок або поліспаст, а підйом вантажу здійснюється зі швидкістю  $V=0,5 \text{ м/с}$ .

### **Задача 8.**

Визначити необхідну потужність двигуна, що приводить до руху підйомник нерівноваженої системи вантажопідйомністю 1000 кг. Вага вантажної платформи 400 кг. Швидкість підйому  $V=0,5 \text{ м/с}$ . ККД передачі  $\eta=0,7$ .

### **Задача 9.**

Визначити, яка потужність необхідна для підйому ліфту з вантажем, рівним 2 т, зі швидкістю  $V=0,3 \text{ м/с}$  при власній вазі кабінки  $G_0=1,9 \text{ т}$

1) при системі без противаги;

2) при системі з противагою, вага якої  $G_{пр}=2,9 \text{ т}$ .

ККД підйомного механізму (лебідки та системи спрямовуючих)  $\eta=0,75$ .

### **Задача 10.**

Обчислити значення  $J$  та  $M_c$  при підйманні вантажу (рис. 1), якщо дано моменти інерції двигуна разом з муфтою  $M_1$  та шестернею  $z_1$   $J_d=0,15$  кг·м<sup>2</sup>, а барабана разом з муфтою  $M_2$  та шестернею  $z_2$   $J_6=1,8$  кг·м<sup>2</sup>, передаточне число редуктора  $i_p=z_2/z_1=86/14=6,14$ , ККД редуктора  $\eta_p=0,97$ , барабана  $\eta_6=0,95$ , швидкість двигуна  $\omega=93$  рад/с, підйому вантажу  $V_B=0,1$  м/с, маса вантажу разом з гаком  $m=850$  кг.

### **Задача 11.**

Визначити приведений до валу двигуна момент інерції механізму лебідки та ротора двигуна, якщо при вимкненому двигуні та знятих гальмах вантаж масою 1000 кг опустився протягом 8 с на 10 м. Маса вантажу, необхідна для подолання втрат в механізмі, складає 400 кг. Припустити, що втрати моменту в механізмі не залежать від швидкості. Діаметр барабану  $D_6=0,5$  м, передаточне число редуктора  $i=15$ .

### **Задача 12.**

Визначити статичний момент на валу двигуна при підйомі та спуску вантажу, а також приведений до валу двигуна момент інерції механізму лебідки з вантажем (рис. 2).

Маса вантажу  $m=12000$  кг, швидкість підйому вантажу  $V=0,5$  м/с, швидкість обертання двигуна  $n_d=1430$  об/хв, ККД передачі при підйомі та спуску прийняти  $\eta=0,85$ . Маси гака та тросу припустимо вважати незначущими. Діаметр барабану  $D_6=0,5$  м. Момент інерції барабану  $J_6=0,3$  кг·м<sup>2</sup>. Момент інерції редуктора, приведений до валу двигуна,  $J=0,01$  кг·м<sup>2</sup>.

### **Задача 13.**

Двигун постійного струму з незалежним збудженням через редуктор приводить до руху барабан, на якому за допомогою троса підвішено вантаж.

Частота обертання якоря двигуна  $n=750$  об/хв, частота обертання барабану  $n_6=100$  об/хв, момент сил опору барабану  $M_c=200$  Н·м, момент інерції барабану  $J_6=100$  кг·м<sup>2</sup>, ККД передачі  $\eta_n=0,85$ . Визначити приведений до валу двигуна момент інерції барабану, момент сил опору.

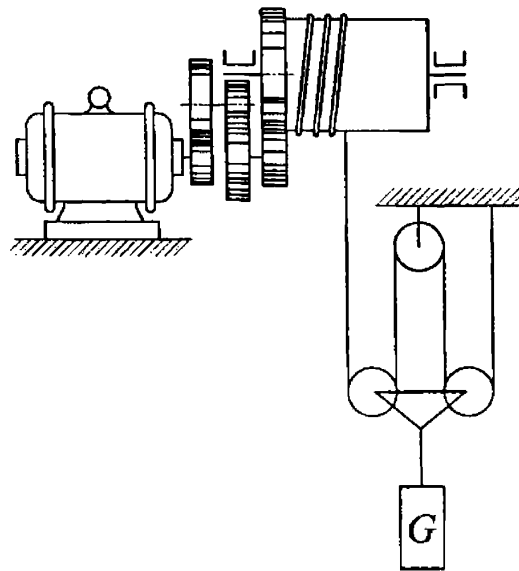


Рисунок 2 – Кінематична схема електроприводу механізму лебідки

#### Задача 14.

Опускання та підймання вантажу масою 150 кг здійснюється електродвигуном через двохступеневий редуктор та барабан. Діаметри циліндричних зубчатих коліс редуктора  $D_1=40$  мм,  $D_2=120$  мм,  $D_3=40$  мм,  $D_4=160$  мм; ширина коліс  $l_k=30$  мм. Барабан є пустотілим циліндром, зовнішній діаметр котрого  $D_6=300$  мм, а довжина  $l_6=500$  мм. Товщина стінок барабану  $b = 10$  мм. Питома вага металу, з якого виготовлено редуктор та барабан  $\gamma=7800$  кг/м<sup>3</sup>. ККД першого ступеню редуктора  $\eta_1 = 0,95$ , другого  $\eta_2=0,93$ , барабану з канатом  $\eta_6=0,9$ .

Момент інерції двигуна  $J_d=0,12$  кг·м<sup>2</sup>.

Визначити приведені до валу двигуна моменти опору та інерції при опусканні та підйманні вантажу. Масу канату та валів редуктора вважати незначущою; зубчаті колеса розглядати як циліндричні тіла.

#### Задача 15.

Маса столу стругального верстата з оброблюваною деталлю 4т. Передаточне число до приводного валу верстату  $i=45$  Робота столу здійснюється зі швидкістю 15 м/хв та при цьому швидкість двигуна 560 об/хв. Визначити приведені до валу двигуна сумарний момент інерції верстату.

Момент інерції якоря двигуна дорівнює  $J_я=2,5$  кг·м<sup>2</sup>, а момент інерції всіх поступальних мас верстату, приведені до валу зубчатого колеса, найбільш віддаленого від валу двигуна, 2900 кг м<sup>2</sup>.

### Задача 16.

Визначити приведені до валу двигуна статичний момент опору та момент інерції механізму візка. Маса візка  $m_v=3000$  кг, швидкість пересування візка  $V=80$  м/хв. Діаметр коліс візка  $D_k=300$  мм, діаметр цапф вісей візка  $D_{ц}=60$  мм. Коефіцієнт тертя у підшипниках вісей візка  $D_{ц}=0,1$ , коефіцієнт тертя кочення коліс на рейках  $f=0,05$  см. Коефіцієнт, що враховує тертя реборд коліс об рейки  $K=1,3$ . Швидкість обертання двигуна  $n_d=960$  об/хв. ККД передачі  $\eta=0,85$ . Момент інерції обертальних частин передачі та коліс припустимо вважати незначущими.

### Приклад 2.

Для механічної частини електроприводу підйомної лебідки, розглянутої в прикладі 1., отримати розрахункову схему з урахуванням пружності тросу, коефіцієнт жорсткості котрого прийняти  $C=10^6$  Н/м. Масу тросу не враховувати. Записати рівняння руху для отриманої розрахункової схеми.

### Розв'язання

Пружний елемент — трос — поділяє вантаж, що підіймається, та решту механічної частини приводу на дві частини. Зважаючи на те, що за умовами задачі перед бачено урахування лише однієї пружності, то розрахункова схема буде двох масовою.

Момент інерції першої маси

$$J_{1m} = J_d + J_1 + \frac{J_2}{i_2}; J_{1m} = 0,1 + 0,02 + \frac{2}{6,14} = 0,75 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент інерції другої маси

$$J_{2m} = m \cdot R_{пр}^2; J_{2m} = 1000 \cdot 0,025^2 = 0,625 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Коефіцієнт жорсткості зв'язків між масами

$$C_{12} = C_{p2} = 10^6 \cdot 0,025^2 = 625,00 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент навантаження, прикладений до другої маси

$$M_{c2} = m \cdot g \cdot R_{пр}; M_{c2} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,025 = 245,24 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

До першої маси прикладений момент двигуна та момент статичного навантаження, що є моментом втрат у редукторі та барабані

$$M_{c1} = \frac{M_{c2}}{\eta_p \cdot \eta_b} - M_{c2}; M_{c1} = 18,1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент навантаження передається до двигуна через пружну ланку  $C_{12}$ .

Звідси, розрахункова схема має вигляд, рис. 3., а рух цієї двох масової системи описується рівняннями

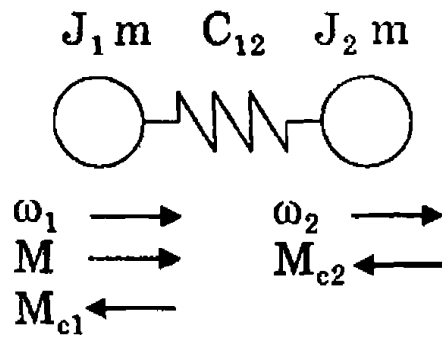


Рисунок 3 – Розрахункова схема електроприводу підйомної лебідки

$$\begin{cases} M - C_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) - M_{c1} = J_{1m} \frac{d^2 \omega_1}{dt^2} \\ C_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) - M_{c2} = J_{2m} \frac{d^2 \omega_2}{dt^2} \end{cases}$$

де  $\varphi_1, \varphi_2$ — кутові переміщення першої та другої мас.

#### Задача 17.

Із використанням даних прикладу 2, розрахувати пружну деформацію тросу при підйомі вантажу. На який кут повинен обернутися вал двигуна, щоб вантаж відірвався від поверхні і почав підйом?



## 2 РЕЖИМИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ. УСТАЛЕНИЙ ТА НЕУСТАЛЕНИЙ РУХ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНОГО ОБЛАДНАННЯ

### 2.1 Основні положення та методичні рекомендації

Головна задача електроприводу — приводити до руху різноманітні машини та механізми. Електрична енергія перетворюється в двигуні, як електромеханічному перетворювачі, в енергію механічного руху. В такому випадку він працює в режимі двигуна. В багатьох випадках механізми треба гальмувати, наприклад для швидкої зупинки верстату, уповільнення пасажирського ліфту або електротранспорту із урахуванням комфортності для пасажирів. Тут електричний двигун перетворює механічну енергію в електричну і працює в режимі гальмування. Взагалі електропривод може перебувати у стані усталеного, або неусталеного рухів, в режимі двигуна або гальмування. Є і проміжні режими роботи двигунів, такі як ідеальній холостий (неробочий) хід, режим короткого замикання.

При прискоренні або уповільненні в електроприводі виникає інерційна сила, або інерційний момент, котрі двигун має подолати, перебуваючи у перехідному режимі.

Механічним перехідним режимом електроприводу називають режим роботи при переході від одного сталого стану до іншого, коли змінюються швидкість та кінетична енергія механічної частини.

Причинами виникнення перехідних режимів в електроприводі є зміна навантаження, пов'язаного з виробничими процесами, або зміна керуючого впливу на електропривод (пуск, гальмування, реверс), а також аварійні ситуації (зміна живлення, частоти, несиметрія живлення).

Рух механічної частини електроприводу у вигляді жорсткої приведеної ланки визначається другим законом Ньютона. Рівняння цього руху має вигляд

—для твердого тіла, що обертається навколо нерухомої вісі

$$\sum \bar{M} = J \frac{d\bar{\omega}}{dt}, \quad (9)$$

—для тіла, що поступально рухається

$$\sum \bar{F} = m \frac{d\bar{v}}{dt}, \quad (10)$$

де —  $\sum \bar{M}, \sum \bar{F}$  векторні суми моментів та сил, що діють на тіло;

$J, m$  — момент інерції та маса тіла;

$\frac{d\bar{\omega}}{dt} = \bar{\epsilon}$  — кутове прискорення тіла, що обертається;

$\frac{d\bar{v}}{dt} = \bar{a}$  — прискорення тіла, що поступально рухається.

Рівняння (9) та (10) дозволяють визначити характер механічного руху електроприводу. Права частина (9) та (10) має назву динамічного моменту або динамічної сили.

Якщо  $\sum \bar{M} \neq 0$  або  $\sum \bar{F} \neq 0$  то електропривод здійснює рух з прискоренням або уповільненням. Знак динамічного моменту або сили має знак лівої частини рівнянь і відповідає знаку похідної швидкості або прискорення.

Якщо  $\sum \bar{M} = 0$  або  $\sum \bar{F} = 0$ , то електропривод рухається зі сталою швидкістю або знаходиться у нерухомому стані.

Умови  $\sum \bar{M} = 0, \sum \bar{F} = 0$  називають умовами сталого режиму.

Рівняння руху електроприводу має враховувати всі сили та моменти, що діють в перехідних режимах, та для обертального руху має вигляд

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (11)$$

де  $M$  — момент двигуна,

$M_c$  — момент опору виробничого механізму, приведений до вісі двигуна,

$J \frac{d\omega}{dt}$  — інерційний, або динамічний момент.

Рівняння (11) показує, що сумарна дія моменту двигуна  $M$  та моменту опору виробничого механізму  $M_c$  врівноважується інерційним або динамічним моментом  $M_{\text{дин}}$ . В цьому рівнянні приводу  $J$  є постійним, що притаманно значному числу виробничих механізмів.

В загальному вигляді рівняння руху електроприводу має вигляд

$$\pm M \mp M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (12)$$

Перш ніж говорити про знаки діючих моментів, треба встановити знаки швидкостей механізму, та, відповідно, двигуна. Знаки швидкостей залежать від встановленої спрямованості технологічних процесів, зручностей операторів. Так, напрям робочих рухів верстатів позначається позитивним знаком. Позитивним напрямом руху є, наприклад, підйом вантажу. Швидкості механізму та двигуна теж надається відповідний знак. Якщо механізм рухається в позитивному напрямі, то швидкість є позитивна. Щодо знаків діючих моментів, то треба відзначити, що і момент двигуна і момент навантаження є рівноправними і підкорюються одному правилу знаків: якщо момент допомагає рухатися в заданому напрямі із заданим знаком швидкості, то він має знак швидкості; якщо момент перешкоджає руху із заданим знаком швидкості, його знак є оберненим від знака швидкості. Від цього правила є одне відхилення, яке дає суттєві зручності при графічних побудовах: при побудові механічних характеристик знак моменту двигуна береться природним, а знак статичного моменту дається як обернений. При такому представленні можна легко графічно знайти динамічний момент як алгебраїчну суму моментів двигуна та механізму.

Динамічний момент з'являється лише в перехідних режимах, коли змінюється швидкість приводу. При прискоренні приводу цей момент спрямований проти руху, при гальмуванні він підтримує рух. Динамічний момент, як за значенням, так і за знаком визначається алгебраїчною сумою моментів двигуна та моменту опору.

Аналіз рівняння руху електроприводу дозволяє дійти наступних висновків.

1. При  $M_{\text{дин}}=d\omega/dt>0$  має місце прискорення (розгін) приводу;
2. При  $M_{\text{дин}}=d\omega/dt <0$  має місце уповільнення (гальмування) приводу;
3. При  $M_{\text{дин}}=d\omega/dt =0$  привод працює в усталеному режимі.

Якщо розглядати перехідні процеси у 4 квадрантах, то слід враховувати, що позитивна похідна швидкості (випадок 1) відповідає розгону в позитивному напрямі руху в першому квадранті, а також гальмуванню від негативного напрямку руху в четвертому квадранті. Аналогічно, випадок 2 відповідає гальмуванню від позитивної швидкості в другому квадранті та прискоренню при розгоні в зворотній бік у третьому квадранті.

Задачі з цієї теми і в подальшому можна поділити на два типи: задачі аналізу та задачі синтезу. При вирішенні задач аналізу за заданими параметрами механізмів та діючих сил і моментів треба розрахувати час перехідного процесу, швидкості, прискорення, та пересування електроприводу.

В задачах синтезу вирішується, які сили або моменти повинні діяти в електроприводі, щоб він рухався із заданим прискоренням, або пройшов заданий шлях пуску чи гальмування за заданий час.

При вирішенні задач цього розділу належить повторити матеріал за літературою [1] — С. 46-68; [3] — С. 51-53; 58-64; [4] — С. 32-40; 42-45; [5] — С. 36-44; 44-50; 50-57; [6] — С.16-19; 24-39; [8] — С. 11-24.

## 2.2 Режими роботи двигунів

### Задача 18.

В якому режимі (двигуна чи гальмування) та в якому напрямку (на підйом чи спуск) працює двигун підйомної лебідки, якщо маса вантажу 1600кг, передаточне число редуктора  $i = 10$ , радіус барабана 0,1 м, а двигун при рівномірному обертанні розвиває момент

а) 200 Н м? б) 120 Н м?

### Задача 19.

З рисунку 4. визначити, яку механічну характеристику повинен мати електродвигун, а яку — механізм, щоб у точках їх перетинання робота була

а) стабільною; б) нестабільною.

### Задача 20.

З рисунку 4. визначити, з якою швидкістю працює електродвигун, що має механічну характеристику 3:

а) якщо він розвиває момент у сталому режимі 10 Н·м; 3 Н·м; -5 Н·м; 20 Н·м.

б) якщо він приводить у рух механізми з механічними характеристиками 1, 2, 4, 5.

### Задача 21.

Визначити, в якому напрямку здійснюється перетворення енергії та в якому режимі працює електродвигун, що має характеристику 3 (див. рис. 4), якщо момент опору на його валу складає -0,5 Н·м; 10 Н·м; 17 Н·м; 20 Н·м?

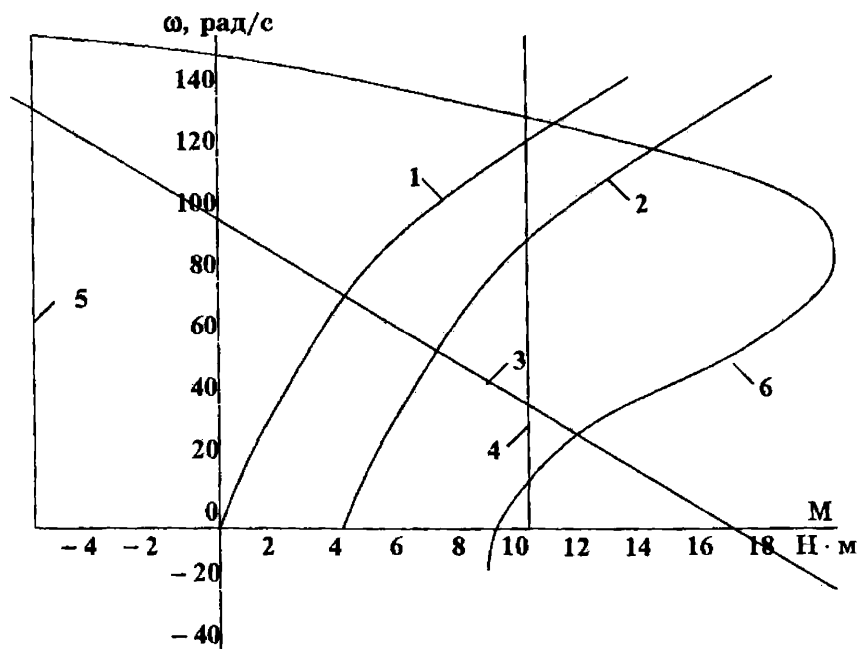


Рисунок 4 – Механічні характеристики електродвигуна та виробничого механізму

### Задача 22.

З рисунку 4. визначити, що відбудеться з двигуном, який має характеристику 3 й працює на холостому ході, якщо

- підключити навантаження з механічною характеристикою 2, 4, 5.
- момент опору на його валу збільшиться до 17 Н·м; 19 Н·м.

### 2.3 Перехідні процеси при постійному значенні динамічного моменту

Багато механізмів, наприклад, вантажно-підйомні, мають незалежне від швидкості постійне значення моменту. Постійним за значенням може бути і момент двигуна. В деяких випадках, для орієнтовних розрахунків, моменти двигуна та механізму беруться як середні на заданому інтервалі швидкості і приймаються постійними умовно. Якщо вважати  $M = \text{const}$  та  $M_c = \text{const}$ , тоді, звісно, згідно (12) буде постійним і  $M_{\text{дин}}$ . За таких обставин стає постійною і похідна швидкості, рух приводу стає рівноприскореним або рівноуповільненим, а графіки швидкості у часі представлені прямими лініями. В рівняннях (11) та (12) похідну швидкості можна замінити на прирощення швидкості на заданому прирощенні часу, причому прирощення швидкості можуть дорівнювати всьому діапазону її зміни, а прирощення часу відповідає повному часу перехідного процесу.

$$\pm M \mp M_c = J \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = J \frac{\omega_{\text{кінц}} - \omega_{\text{поч}}}{t_{\text{кінц}} - t_{\text{поч}}} \quad (13)$$

Типовими перехідними процесами електроприводу є пуск, реверс та гальмування. Динаміка електроприводу залежить від величини і знаку моменту двигуна, а також від величини та характеру статичного моменту навантаження. Розрізняють перехідні процеси без навантаження, коли  $M_c=0$  і під навантаженням із статичним моментом активного характеру більше або менше нуля та реактивного характеру. Проста формула (13) дає можливість в алгебраїчній формі розрахувати прискорення електроприводу  $\varepsilon$ , тривалість перехідного процесу  $t_{пп}$ , шлях або пересування електроприводу за час перехідного процесу  $\varphi$  і побудувати графіки перехідних процесів

$$\varepsilon = \frac{M - M_c}{J} \quad (14)$$

$$t_{пп} = J \frac{\omega_{кінц} - \omega_{поч}}{M - M_c} \quad (15)$$

$$\varphi = \varphi_{поч} + \omega_{поч} \cdot e + \varepsilon \frac{t^2}{2} \quad (16)$$

### Приклад 3

Електричний двигун має однаковий за абсолютним значенням момент в режимі двигуна та гальмування  $|M|=30$  Н·м. Сумарний момент інерції  $J=0,5$  кг·м<sup>2</sup>. Статичний момент реактивного характеру  $M_c=20$  Н·м. Всі моменти постійні і не залежать від швидкості. Розрахувати тривалість перехідних процесів, кутове пересування валу двигуна, побудувати динамічні механічні характеристики та графіки перехідних процесів  $M_{дин}(t)$  та  $\omega(t)$  в циклі руху: пуск — реверс — гальмування. Максимальна швидкість двигуна 100 рад/с.

### Розв'язання

Розрахунки прискорення, часу та пересування виконуємо згідно (14)-(16). Відзначимо, що в цих формулах моменти, кутові швидкості та прискорення мають свої знаки, в залежності від випадку, який розглядається.

Пуск.

$$\text{Кутове прискорення } \varepsilon = \frac{30 - 20}{0,5} = 20 \text{ рад/с}^2.$$

Час пуску до максимальної швидкості

$$t_{п} = 0,5 \cdot \frac{100 - 0}{30 - 20} = 5 \text{ с}$$

Час пуску можна знайти і за простішим виразом

$$t_{п} = \frac{\omega_{макс}}{\varepsilon}$$

Кутовий шлях пуску при нульових початковий умовах із пересування та із швидкості  $\varphi = 20 \frac{5^2}{2} = 250 \text{ рад}$ ; або  $\frac{250}{2 \cdot \pi} = 39,8$  обертів валу двигуна.

$$\text{Динамічний момент } M_{\text{дин}} = J \cdot \varepsilon = 0,5 \cdot 20 = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Графіки перехідного процесу пуску представлені на рис. 5. Зліва зображені динамічні механічні характеристики, тобто залежності від швидкості моменту двигуна  $M$  і статичного моменту навантаження  $M_c$  реактивного характеру. Згідно правил знаків моментів при побудові механічної характеристики  $M_c$ , він взятий із оберненим знаком. Тоді динамічний момент  $M_{\text{дин}}$  на графіку представлений наочно, без допоміжних побудов. У випадку пуску динамічний момент невеликий, прискорення теж і час розгону приводу до заданої швидкості складає 5с. До речі, кутовий шлях пуску, згідно трикутної форми графіку швидкості можна знайти більш простіше, ніж із (16), як площу цього трикутника  $\varphi = \frac{\omega_{\text{макс}} \cdot t_{\text{р}}}{2}$ .

## 2. Реверс.

Реверс починається із зміни знаку моменту двигуна і цей знак зберігається до кінця реверсу. Момент статичний, навпаки, змінить свій знак при зміні знаку швидкості. Тому процес реверса треба розбити на дві частини: при  $\omega > 0$  та  $\omega < 0$ .

### 2.1 Перша частина реверсу-гальмування від $\omega_{\text{макс}}$ до нуля

$$\text{Кутове прискорення } \varepsilon = \frac{-30 - 20}{0,5} = -100 \text{ рад/с}^2$$

Час гальмування від максимальної швидкості до нуля

$$t_r = 0,5 \cdot \frac{0 - 100}{-30 - 20} = 1 \text{ с}$$

Кутовий шлях гальмування при нульових початкових умовах із пересування та ненульових за швидкістю

$$\varphi_r = 100 \cdot 1 - 100 \frac{1^2}{2} = 50 \text{ рад}, \text{ або } \frac{50}{2 \cdot \pi} = 7,96 \text{ обертів валу двигуна.}$$

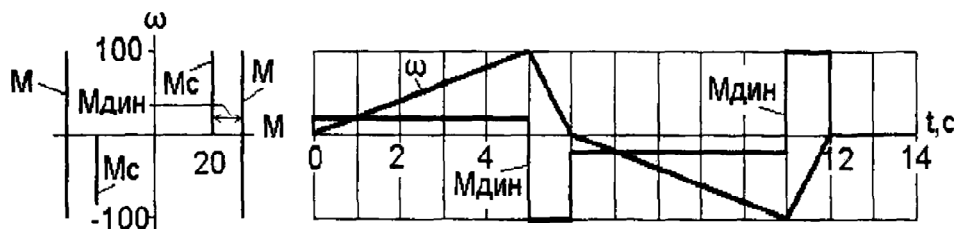


Рисунок 5 – Динамічні механічні характеристики і графіки перехідних процесів в циклі пуск — реверс — гальмування при постійному динамічному моменті та  $M_c = \text{const}$ , реактивного характеру.

$$\text{Динамічний момент } M_{\text{дин}} = J \cdot \varepsilon = 0,5 \cdot 100 = 50 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

2.2. Друга частина реверсу — розгін у протилежному напрямі, від нуля до  $-\omega_{\text{макс}}$ .

$$\text{Кутове прискорення } \varepsilon = \frac{-30+20}{0,5} = -20 \text{ рад/с}^2.$$

Час пуску до максимальної швидкості —  $\omega_{\text{макс}}$

$$t_{\text{п}} = 0,5 \cdot \frac{-100 - 0}{-30 + 20} = 5 \text{ с}$$

Кутовий шлях пуску при нульових початкових умовах із пересування та із швидкості  $\varphi_{\text{п}} = -20 \frac{5^2}{2} = -250 \text{ рад}$  обертів валу двигуна.

$$\text{Динамічний момент } M_{\text{дин}} = J \cdot \varepsilon = 0,5 \cdot (-20) = -10 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Можна бачити, що отримані числа такі самі, що і при розгоні вперед, тільки із протилежним знаком. У графіку швидкості при переході через нуль присутній характерний злам, який відображає стрибок динамічного моменту, отже і прискорення при зміні знаку статичного моменту.

Гальмування від  $-\omega_{\text{макс}}$  до нуля.

Гальмування починається при зміні знаку моменту двигуна.

$$\text{Кутове прискорення } \varepsilon = \frac{+30+20}{0,5} = 100 \text{ рад/с}^2.$$

Час гальмування від максимальної швидкості  $-\omega_{\text{макс}}$  до нуля

$$t_{\text{г}} = 0,5 \cdot \frac{0 - (-100)}{+30 + 20} = 1 \text{ с}.$$
 Кутовий шлях гальмування при нульових початкових умовах із пересування та ненульових для швидкості

$$\varphi_{\text{г}} = (-100) \cdot 1 + 100 \frac{1^2}{2} = -50 \text{ рад}, \text{ або } \frac{50}{2\pi} = -7,96 \text{ обертів валу двигуна}.$$

Динамічний момент  $M_{\text{дин}} = J \cdot \varepsilon = 0,5 \cdot 100 = 50 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Тут також процес гальмування має ті ж абсолютні параметри, що і у випадку гальмування від позитивної швидкості.

Зауважимо, що в заданому циклі сумарний шлях пересування дорівнює нулеві. Ми у прикладі розглянули окремі складові руху, де шлях не є рівним нулю.

#### Приклад 4

Визначити величину моменту на валу між двигуном та маховиком, а також на валу між маховиком та першою шестернею механізму прокатного стану при пуску двигуна вхолосту та під навантаженням, вважаючи незначущими втрати в двигуні та маховику. Момент, що розвиває двигун під час пуску,  $M_{\text{д}} = 560 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .



Статичний момент, приведений до валу двигуна при пуску під навантаженням,  $M_c=312,2$  Н·м, Момент інерції маховика, приведений до валу двигуна  $J_m=78,9$  кг·м<sup>2</sup>, решти механізму —  $J_{мех}=0,5$  кг·м<sup>2</sup>.

Момент інерції двигуна  $J_d=100$  кг·м<sup>2</sup>.

Розв'язання

Загальний момент інерції механізму та ротору двигуна  $J_{заг} = J_m + J_{мех} + J_d$ ;  
 $J_{заг} = 78,9 + 0,5 + 100 = 179,4$  кг·м<sup>2</sup>

Прискорення двигуна при пуску під навантаженням

$$\varepsilon = \frac{M_d - M_c}{J_{заг}}; \varepsilon = \frac{560 - 312,2}{179,4} = 1,38 \text{ рад/с}^2;$$

Момент на валу між двигуном та маховиком при пуску під навантаженням

$$M = M_d - J_d \cdot \varepsilon; M = 560 - 100 \cdot 1,38 = 422 \text{ Н·м}$$

Момент на валу між маховиком та першою шестернею при пуску під навантаженням

$$M = M_d - (J_d + J_m) \cdot \varepsilon;$$

$$M = 560 - (100 + 78,9) \cdot 1,38 = 313,58 \text{ Н·м}$$

Кутове прискорення двигуна при пуску вхолосту

$$\varepsilon = \frac{M_d}{J_{заг}}; \varepsilon = \frac{560}{179,4} = 3,12 \text{ рад/с}^2$$

Момент на валу між двигуном та маховиком при пуску вхолосту

$$M = M_d - J_d \cdot \varepsilon; M = 560 - 100 \cdot 3,12 = 248 \text{ Н·м}$$

Момент на валу між маховиком та першою шестернею при пуску вхолосту

$$M = M_d - (J_d + J_m) \cdot \varepsilon;$$

$$M = 560 - (100 + 78,9) \cdot 3,12 = 1,83 \text{ Н·м}$$

### Задача 23.

Визначити момент, який має розвивати двигун лебідки (рис. 6) та зусилля в тросі при підйомі та спуску вантажу масою  $m=5000$  кг з прискоренням  $1,5$  м/с<sup>2</sup>.

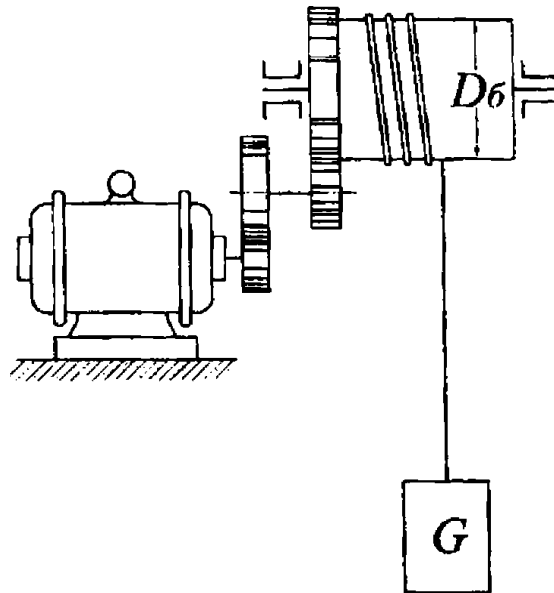


Рисунок 6 – Кінематична схема електроприводу лебідки для підйому вантажу

Передаточне число передачі  $i=15$ , діаметр барабану  $D_6=0,6$  м. Момент інерції двигуна  $J_d=4,65$  кг·м<sup>2</sup>, швидкість двигуна  $n_d=960$  об/хв.

Коефіцієнт корисної дії передачі  $\eta$  при підйомі та спуску номінального вантажу прийняти 80%. Моменти інерції барабану, редуктора та троса вважати незначущими.

#### Задача 24.

Визначити потужність, що розвиває двигун шахтового підйомника з урівнювальним канатом при підйомі скіпа з усталеною швидкістю  $V=6$  м/с, та момент, що має розвивати двигун при пуску на підйом, з метою забезпечити прискорення скіпу  $1,2$  м/с<sup>2</sup>,

Статичний момент, приведений до валу двигуна,  $M_c=103,2$  Н·м, приведений момент інерції механізму  $J=31,63$  кг·м<sup>2</sup>. Швидкість двигуна  $n_d=485$  об/хв. Момент інерції двигуна  $J_d=30$  кг·м<sup>2</sup>. Діаметр барабану  $D_6=4$  м. Передаточне число передачі  $i=16,9$ .

#### Задача 25.

Двигун з незалежним збудженням 20кВт, 900 об/хв, 220В, 104А,  $R_{\text{я}}=0,121$  Ом, струм збудження  $I_3=4$  А працює з моментом опору 170 Н·м. Визначити, який постійний гальмівний момент має розвивати двигун для того, щоб зупинити його протягом 1 сек. Сумарний момент інерції, приведений до валу двигуна,  $J=0,32$  кг·м<sup>2</sup>.

#### Задача 26.

Асинхронний двигун трьохфазного струму 16,5кВт, 380В, 955об/хв,  $J=0,385$  кг·м<sup>2</sup> пов'язаний з виробничим механізмом через трьохступеневу

зубчату передачу з передаточним числом 90. Момент інерції механізму  $J_M=22725 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Статичний момент, що діє на валу виробничого механізму перед початком гальмування  $M_M=7000 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Обертний момент, необхідний для приведення в дію виробничого механізму при його повному навантаженні без урахування втрат в передачах  $M_{с.н.}=144 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Визначити величину постійно діючого моменту на валу двигуна, необхідного для зупинення двигуна протягом двох секунд.

#### **Задача 27.**

Визначити час розгону електродвигуна з нерухомого стану до швидкості обертання 960 об/хв із постійним значенням обертального моменту  $M=360 \text{ Н}\cdot\text{м}$  та за моменту інерції, приведенного до валу двигуна  $J=5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Статичний момент на валу двигуна в період розгону складає  $100 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,

#### **Задача 28.**

Визначити час розбігу електроприводу з нерухомого стану до швидкості  $n_d=720 \text{ об/хв}$ , якщо середнє значення моменту, що розвиває двигун при пуску,  $M_d=440 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , а момент інерції приводу, приведений до валу двигуна,  $J_n=8,75 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Статичний момент на валу двигуна  $M_c=80 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

#### **Задача 29.**

Визначити зусилля, що виникають у канатах візка та противаги при пуску двигуна на підйом візка та при гальмуванні при підйомі візка.

Маса візка з вантажем 6000 кг, маса противаги 3000 кг. Кут нахилу шляху візка  $\alpha=30^\circ$ . Передаточне число передачі  $i=25$ . Діаметр барабану  $D_1=0,5 \text{ м}$ ,  $D_2=0,4 \text{ м}$ . Момент, що розвиває двигун при пуску  $196,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , при гальмуванні  $156,9 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Момент інерції ротора двигуна  $0,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Втрати в передачах, механізмі, двигуні, а також момент інерції передачі та барабану вважати незначущими.

#### **Задача 30.**

Визначити момент інерції ротору двигуна, якщо його частота обертання зменшилася на 200 об/хв через 8с після вимикання живлення. До вимикання двигун працював вхолосту з частотою обертання  $n_0=1000 \text{ об/хв}$  та споживав з мережі потужність  $P=5,4 \text{ кВт}$ . Механічні втрати складають 40% від втрат холостого ходу, а момент механічних втрат не залежить від швидкості двигуна.

#### **Задача 31.**

Стіл карусельного верстату обертається із швидкістю  $5 \text{ рад/с}$ . Момент тертя при обертанні столу  $800 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , момент інерції столу  $600 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Редуктор має параметри:  $i=20$ ;  $\eta=80\%$ . Момент інерції двигуна  $0,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Момент гальмування двигуна  $68 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . На якій відстані (в радіанах та градусах обертання

столу) від місця точної зупинки потрібно встановити шляховий перемикач, що подає команду на початок гальмування? Який шлях гальмування за цей час пройде вал двигуна?

### Задача 32.

Електропривод візка працює в режимі розгону та зупинок. Момент двигуна  $|M_{д\ пуск}|=|M_{д\ гальм}|=40$  Н·м. При зупинці використовується сумісна дія гальмування двигуном та електромагнітним гальмом,  $M_{емг}=25$  Н·м,  $\omega_{дв}=100$  рад/с;  $V_{віз}=2$  м/с;  $M_{с\ пр}=10$  Н·м;  $J_{дв}=0,2$  кг·м<sup>2</sup>;  $J_{віз.\ пр.}=1,3$  кг·м<sup>2</sup>.

Втрати в механічній передачі не враховувати.

Потрібно:

1. Розрахувати прискорення візка та двигуна та тривалість перехідних процесів приводу при пуску та зупинці.
2. Шлях візка при пуску та зупинці.
3. Побудувати графіки  $\omega_{дв}(t)$  та  $M_{дин}(t)$  для пуску та гальмування.
4. Розрахувати похибку у шляху гальмування візка, якщо при аварійному відключенні мережі в процесі гальмування бере участь тільки електромагнітне гальмо та момент навантаження механізму.

### Задача 33.

Визначити моменти двигуна при підйомі вантажу масою 640 кг, необхідні для розгону цього вантажу до швидкості 0,5 м/с за 2с й для його зупинення за 2с, якщо передаточне число редуктора  $i=20$ , ККД передачі  $\eta=0,8$ , діаметр барабану підйомного пристрою 0,4 м. Моменти інерції двигуна 0,5кг·м<sup>2</sup> та барабана 1,2 кг·м<sup>2</sup>.

### Задача 34.

На вантажному чотирьохколісному візку встановлено електродвигун потужністю 9,7 кВт з номінальною частотою обертання 97 рад/с та моментом інерції 0,18 кг·м<sup>2</sup>. Радіус колеса візка 0,2 м, а його момент інерції складає 9,5кг·м<sup>2</sup>, ККД механічної передачі  $\eta=0,8$ . Загальна маса візка 5 т. Момент опору на вихідному валу редуктора дорівнює 1940 Нм.

а. Визначити час та прискорення при розгоні візка до швидкості 0,4 м/с, якщо пусковий момент двигуна дорівнює  $1,5 M_{ном}$ .

б. Визначити час та уповільнення візка від швидкості 0,4 м/с, якщо гальмівний момент двигуна за абсолютною величиною дорівнює його номінальному значенню.

в. Визначити час та уповільнення візка від швидкості 0,4 м/с, якщо електричне гальмування відсутнє.

### **Задача 35.**

Приводний двигун в перехідних процесах пуску та гальмування розвиває момент 107 Н·м. Приведений статичний момент опору механізму дорівнює 10,7 Н·м, а приведений сумарний момент інерції приводу 0,35 кг·м<sup>2</sup>. Визначити час та кут повороту валу двигуна за цикл роботи пуск вперед до швидкості 150 рад/с, реверс до швидкості -150 рад/с, гальмування до швидкості 0 для наступних випадків:

- а) момент опору активний й більший за 0;
- б) момент опору активний й менший за 0;
- в) момент опору реактивний.

### **Задача 36.**

Визначити час гальмування до зупинення електроприводу, якщо середній гальмівний момент двигуна  $M_d=900$  Н·м, приведений до валу двигуна статичний опір  $M_c=300$  Н·м, момент інерції  $J=12,5$  кг·м<sup>2</sup>. Початкова швидкість двигуна  $n_d=582$  об/хв.

### **Задача 37.**

Визначити шлях двигуна в обертах за час розбігу вхолосту з нерухомого стану до швидкості  $n_d=975$  об/хв. Середнє значення моменту, що розвиває двигун при пуску,  $M_d=250$  Н·м, момент інерції, приведений до валу двигуна,  $J=11,25$  кг·м<sup>2</sup>.

### **Задача 38.**

Визначити прискорення візка при розбігу, якщо момент, розвинутий двигуном, складає  $M_d=25$  Н·м. Статичний момент, приведений до валу двигуна,  $M_c=9,5$  Н·м, момент інерції  $J=0,53$  кг·м<sup>2</sup>. Момент інерції двигуна  $J_d=0,12$  кг·м<sup>2</sup>, швидкість пересування візка  $V=80$  м/хв. Швидкість двигуна  $n_d=960$  об/хв.

Припустити, що при розбігу проковзування між колесами візка та рейками відсутнє.

### **Задача 39.**

Двигун постійного струму із номінальними даними: 6кВт, 1430 об/хв, 220 В,  $J_d=0,1$  кг·м<sup>2</sup> приводить до руху візок та розганяється зі сталим динамічним моментом, що дорівнює 70 Н·м, до своєї номінальної швидкості. При цьому швидкість візка досягає 1,5 м/с. Статичний момент при розгоні дорівнює 40 Н·м. Момент інерції механізму, приведений до валу двигуна, складає 0,775 кг·м<sup>2</sup>.

Визначити шлях, що проходить візок за час розгону.

#### Задача 40.

Двигун трьохфазного струму має номінальні дані: 22 кВт, 715 об/хв,  $J_d=1,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  і працює на лебідку з ККД  $\eta=0,7$ . Момент інерції механізму, приведений до валу двигуна, складає 20% моменту інерції електродвигуна.

Визначити

- 1) потужність, необхідну для підйому вантажу масою 1500 кг зі швидкістю 1,0 м/с.
- 2) час розгону двигуна до усталеної швидкості обертання, якщо середній пусковий момент дорівнює 1,5 моменту статичного опору.

### 2.4 Перехідні процеси при непостійному значенні динамічного моменту

У багатьох випадках немає можливості представити моменти двигуна та навантаження як постійні, незалежні від швидкості. Непостійним буде також і динамічний момент. Класичними прикладами є перехідні процеси пуску, реверсу, гальмування, накиду та скидання навантаження двигунів постійного струму та асинхронних двигунів із фазним ротором при реостатному керуванні. Їх механічні характеристики є прямі, із нахилом лінії, або лінеаризовані лінії, отже момент двигуна є лінійною функцією кутової швидкості. Якщо домовитись, що будемо враховувати тільки механічну інерційність, то маємо так звані електромеханічні перехідні процеси, які при  $M_c=\text{const}$  описуються диференціальними рівняннями першого порядку, наприклад для швидкості

$$T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_c, \quad (17)$$

де  $T_M$  — електромеханічна стала часу електроприводу, с;

$\omega$  — біжуча кутова швидкість двигуна, рад/с;

$\omega_c$  — статична, або усталена швидкість двигуна наприкінці перехідного процесу, що розглядається, рад/с.

Розв'язання цього рівняння відносно швидкості дає рішення, яке у загальному випадку має вигляд

$$\omega = \omega_c + (\omega_{\text{поч}} - \omega_c) \cdot e^{\frac{-t}{T_M}} \quad (18)$$

Такі ж за формою вирази мають рішення відносно моменту або струму, якщо між моментом та струмом є пропорційна залежність

$$M = M_c + (M_{\text{поч}} - M_c) \cdot e^{\frac{-t}{T_M}} \quad (19)$$

$$i = I_c + (I_{\text{поч}} - I_c) \cdot e^{\frac{-t}{T_M}} \quad (20)$$

Електромагнітна стала часу може бути розрахована згідно декількох виразів

$$T_M = J \cdot \frac{R_D}{(K\Phi)^2} = J \cdot \frac{1}{\beta} = J \cdot \frac{\omega_D}{M_{\text{ма}}} \quad (21)$$

Перший вираз в (21) використовується для електроприводів із двигуном постійного струму незалежного збудження, а останні два більш підходять для розрахунків електроприводів із асинхронними двигунами або у випадку лінеаризації механічних характеристик, наприклад двигуна постійного струму послідовного збудження.

Графіками перехідних процесів є експоненти — спадаючі або наростаючі. Для таких процесів характерне повільне, або експоненціальне, наближення до статичного значення. Теоретичний повний час перехідного процесу наближується до безкінечності. На практиці використовуються вирази  $t_{\text{пн}} \approx 3T_M$ , якщо нас задовольняє похибка до 5%, або  $t_{\text{пн}} \approx 4T_M$ , якщо задовольняє похибка до 2%. Для розрахунку часу зміни величини від початкової  $x_{\text{поч}}$  до деякої заданої  $x$ , наприклад час гальмування від початкової швидкості до нуля в режимі противключення, користуються виразом

$$t = T_M \cdot \ln \frac{x_{\text{поч}} - x_c}{x - x_c} \quad (22)$$

де  $x_{\text{поч}}$ ,  $x$ ,  $x_c$  — початкове, біжуче та статичне значення одної із величин: швидкості, моменту або струму. Конкретна змінна обирається виходячи із її наявності, або зручності її використання.

Кутовий шлях електроприводу можна знайти як інтеграл швидкості за (18) на заданому відрізку часу

$$\varphi = t \cdot \omega - T_M (\omega - \omega_{\text{поч}}) \left( 1 - e^{\frac{-t}{T_M}} \right) \quad (23)$$

При використанні (23) попередньо треба розрахувати по (22) час зміни швидкості від  $\omega_{\text{поч}}$  до потрібного значення швидкості  $\omega$ .

Відзначимо універсальність форми рівнянь (18)-(20) та (22). Універсальними є і правила побудови експоненційних графіків перехідних процесів:

1. Будуються статичні механічні, або електромеханічні характеристики для заданих умов та обмежень роботи електроприводу, рис. 7. В даному випадку, при нехтуванні електромагнітної інерційності електричних кіл двигунів динамічні характеристики співпадають із статичними.

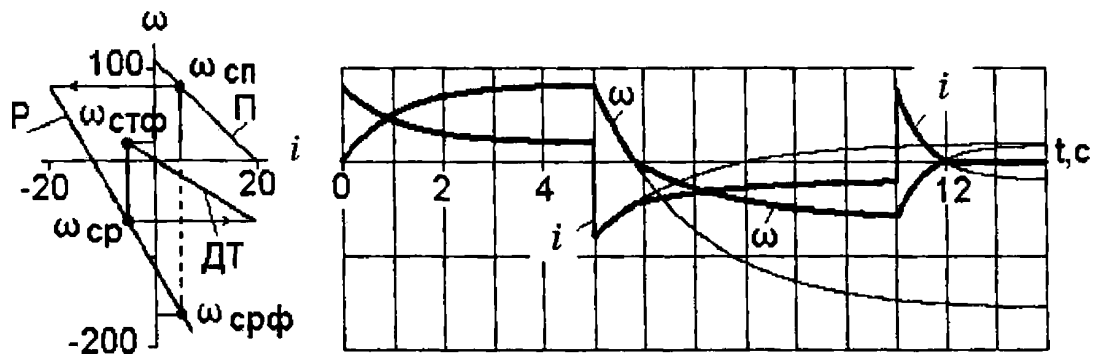


Рисунок 7 – Динамічні механічні характеристики і графіки перехідних процесів в циклі пуск — реверс — гальмування при лінійній зміні моменту двигуна та  $M_c = \text{const}$ , реактивного характеру.

2. Розраховуються відповідні координати початкових та усталених значень величин.
3. Розраховується електромеханічна стала часу.
4. Будуються графіки перехідних процесів у часі. Тут можливі два випадки.
  - 4.1. Записується аналітичний вираз зміни координати у часі, згідно (18)-(20) і будується графік по точкам в комп'ютерному або в ручному режимі розрахунків і побудов. Зразок такого способу наведений на рисунку 7, праворуч.
  - 4.2. Орієнтовна побудова у вигляді ескізу, від руки. Такий спосіб побудов використовується в практиці аналізу процесів при самостійній роботі, на практичних і лабораторних заняттях, при контролі знань студентів. Приклад такої побудови наведений на рисунку 8.



Графік перехідного процесу будується при постійному співставленні і при повній відповідності із динамічними механічними, або електромеханічними характеристиками у такій послідовності:

- встановлюються початкові умови, або координати першої точки графіку  $M_{\text{поч}}$  та  $\omega_{\text{поч}}=0$ ;
- проводиться горизонтальна лінія, яка відповідає асимптоті, або усталеному значенню величини, що розглядається;
- на асимптоті відкладається відрізок часу, який дорівнює постійній часу перехідного процесу;
- від точки початку процесу до цього відрізка проводиться пряма, яка є дотичною до графіку у початковій точці;
- від руки проводиться експонента від початкової точки до асимптотичного наближення до усталеного значення;
- при проведенні кривої керуватись таким: за час, що дорівнює постійній часу  $T_M$ , змінна досягає 62% від свого повного діапазону зміни; процес закінчується, тобто графік досягає усталеної величини, за час  $t_{\text{пп}} \approx (3-4)T_M$ .

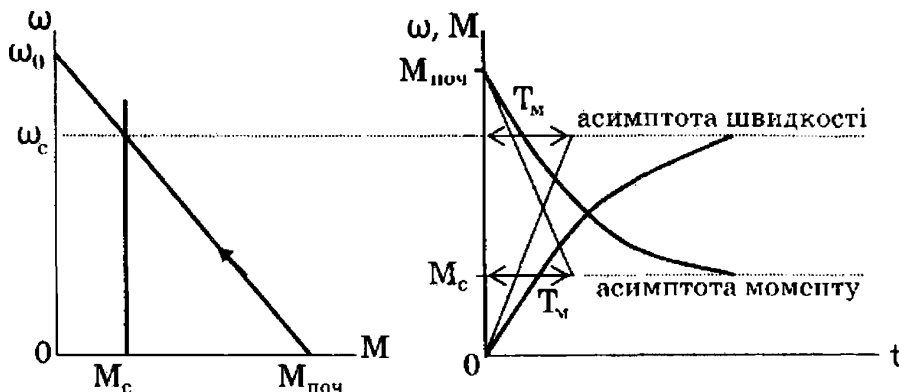


Рисунок 8 – Динамічні характеристики та графіки перехідного процесу пуску двигуна постійного струму незалежного збудження

### Приклад 5

Розрахувати та побудувати динамічні електромеханічні характеристики та графіки перехідних процесів двигуна постійного струму незалежного збудження в циклі пуск — реверс-гальмування при статичному моменті навантаження реактивного характеру.

Дані двигуна.  $P_H=2\text{кВт}$ ;  $\omega_H=100\text{ рад/с}$ ;  $U_H=220\text{ В}$ ;  $I_H=10\text{ А}$ ;  $R_r=2,0\text{ Ом}$ .  $M_c=0,5M_H$ ; сумарний момент інерції  $J = 0,4\text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . У всіх перехідних процесах максимальне припустиме значення струму  $I_{\text{макс}}=2 I_H$ .

## Розв'язання

Номінальний коефіцієнт ЕРС двигуна

$$K\Phi_n = \frac{U_n - I_n \cdot R_n}{\omega_n}; K\Phi_n = \frac{220 - 10 \cdot 2}{100} = 2 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$$

Максимальний припустимий і статичний струм

$$I_{\text{макс}} = 2 \cdot 10 = 20 \text{ А}; \quad I_c = 0.5 \cdot 10 = 5 \text{ А}$$

1. Пуск

Сумарний опір якоря для обмеження пускового струму на заданому рівні

$$R_{\text{оп}} = \frac{U_n}{I_{\text{макс}}}; R_{\text{оп}} = \frac{220}{20} = 11.0 \text{ Ом}$$

Стала часу для пуску

$$T_{\text{мп}} = J \frac{R_{\text{оп}}}{(K\Phi_n)^2}; T_{\text{мп}} = 0.4 \frac{11}{2^2} = 1.1 \text{ с}$$

Швидкість ідеального холостого ходу

$$\omega_0 = \frac{U_n}{K\Phi_n}; \omega_0 = \frac{220}{2} = 110 \text{ рад/с}$$

Статична швидкість наприкінці перехідного процесу пуску

$$\omega_{\text{сп}} = \omega_0 - \frac{I_c \cdot R_{\text{оп}}}{K\Phi_n}; \omega_{\text{сп}} = 110 - \frac{5 \cdot 11}{2} = 82.5 \text{ рад/с}$$

З урахуванням початкових та усталених значень рівняння швидкості та струму на інтервалі пуску

$$\omega = 82.5 + (0 - 82.5) \cdot e^{\frac{-t}{1.1}}; i = 5 + (20 - 5) \cdot e^{\frac{-t}{1.1}}$$

Час пуску до усталеної швидкості 82,5 рад/с  $t_n \approx 3T_m \approx 3 \cdot 1.1 = 3.3$  с. На рисунку 7. динамічна механічна характеристика позначена літерою П, а перехідний процес побудований на інтервалі часу від  $t=0$  до  $t=5$  с.

2. Реверс.

Механічна характеристика механізму реактивного характеру змінюється при переході швидкості через нульове значення. Тому процес реверсу описується у 2 етапи. Але спочатку розраховуємо повний опір ланцюга якоря, згідно обмеженню максимального струму і нове значення електромеханічної постійної часу. Для точки початку процесу реверсу з урахуванням сумісної дії ЕРС двигуна та напруги мережі

$$R_{\text{ор}} = \frac{U_n - E_c}{I_{\text{макс}}}; R_{\text{ор}} = \frac{-220 - 82.5 \cdot 2}{-20} = 19.25 \text{ Ом}$$

$$T_{\text{мр}} = 0.4 \frac{19.25}{2^2} = 1.92 \text{ с}$$

## 2.1 Перший етап, гальмування противмиканням

Усталений режим, відповідний умовам 1-го етапу реверсу є уявлюваним, оскільки процес реалізується тільки на інтервалі  $0 < \omega < \omega_c$ , а далі піде за іншими умовами при зміні знаку статичного моменту. Тому усталену швидкість позначимо як фіктивну  $\omega_{\text{срф}}$  при статичному струмі  $+5$  А.

$$\omega_{\text{срф}} = \frac{U_n - I_c \cdot R_{\text{ор}}}{K\Phi_n}; \omega_{\text{срф}} = \frac{-220 - 5 \cdot 19.25}{2} = -158.12 \text{ рад/с}$$

З урахуванням початкових та усталених значень рівняння швидкості та струму на інтервалі першого етапу реверсу

$$\omega = -158.12 + (82.5 - (-82.5)) \cdot e^{\frac{-t}{1.92}}; i = 5 + (-20 - 5) \cdot e^{\frac{-t}{1.92}}$$

Час протікання 1 -го етапу реверса, або гальмування приводу до нульової швидкості  $t_{\text{гр}}$

$$t_{\text{гр}} = T_{\text{мр}} \cdot \ln \frac{\omega_{\text{сп}} - \omega_{\text{срф}}}{\omega - \omega_{\text{срф}}}; t_{\text{гр}} = 1.92 \cdot \ln \frac{82.5 - (-158.12)}{0 - (-158.12)} = 0.806 \text{ с}$$

На рисунку 7 від  $t > 5$ с на інтервалі 0,806с жирними лініями позначені графіки струму та швидкості при гальмуванні, а тонкими — графіки уявлюваного процесу розгону в протилежну сторону до швидкості  $\omega_{\text{срф}}$ , тобто такого, якщо б момент  $M_c$  не змінював свій знак.

## 2.2 Другий етап, розгін в протилежну сторону.

При переході швидкості через нульове значення, змінився знак моменту навантаження і тепер перехідний процес в точності повторює процес пуску в позитивному напрямі, але з деякими особливостями. Тепер початковий струм буде меншим за максимальну величину

$$I_{\text{поч}} = \frac{-U_n}{R_0}; I_{\text{поч}} = \frac{-220}{19.25} = -11.4 \text{ А}$$

Стала часу зберігається така сама, як і на першому етапі реверсу, а статична швидкість після закінчення реверсу  $\omega_{\text{ср}}$  буде значно меншою, оскільки розгін йде на більш м'якій характеристиці

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{U_n - I_c \cdot R_{\text{ор}}}{K\Phi_n}; \omega_{\text{ср}} = \frac{-220 - (-5 \cdot 19.25)}{2} = 61.87 \text{ рад/с}$$

З урахуванням початкових та усталених значень рівняння швидкості та струму на інтервалі другого етапу реверсу

$$\omega = -61.87 + (0 - (-61.87)) \cdot e^{\frac{-t}{1.92}}; i = 5 + (-11.4 - 5) \cdot e^{\frac{-t}{1.92}}$$

Час пуску до усталеної швидкості  $-61.87$ рад/с  $t_{\text{п}} \approx 3T_{\text{м}} \approx 3 \cdot 1.92 = 5.76$  с. На рисунку 7 динамічна механічна характеристика позначена літерою Р, а перехідний процес побудований на інтервалі часу від  $t = 5.806$ с до  $t = 11$ с.

### 3. Процес гальмування.

Оберемо динамічне гальмування. При динамічному гальмуванні якір двигуна відключається від мережі і замикається на гальмівний резистор. Для обмеження струму на рівні заданих 20 А, потрібний загальний опір ланцюгу якоря

$$R_{от} = \frac{0 - \omega_{ср} \cdot K\Phi_n}{I_{макс}}; R_{от} = \frac{0 - (-\omega_{ср} \cdot K\Phi_n)}{I_{макс}} = 6,870 \text{ Ом}$$

Нова стала часу

$$T_{мр} = 0,4 \frac{6,87}{2^2} = 0,62 \text{ с.}$$

Статична швидкість наприкінці динамічного гальмування  $\omega_{стф}$  буде фіктивною, розрахунковою, з огляду на те, що ані момент реактивного характеру, ані режим динамічного гальмування не спроможні забезпечити розгін двигуна в протилежному, позитивному напрямі, і процес закінчується при  $\omega=0$ .

$$\omega_{срф} = \frac{0 - I_c \cdot R_{ор}}{K\Phi_n}; \omega_{срф} = \frac{0 - (-5 \cdot 6,87)}{2} = 17,17 \text{ рад/с}$$

З урахуванням початкових та усталених значень рівняння швидкості та струму на інтервалі гальмування

$$\omega = 17,17 + (-61,87 - 17,17) \cdot e^{\frac{-t}{0,62}}; i = -5 + (20 - (-5)) \cdot e^{\frac{-t}{0,62}}$$

Час гальмування до нульової швидкості цього разу розрахуємо із використанням струму

$$t_r = T_{мт} \cdot \ln \frac{I_{поч} - I_{стф}}{0 - I_{стф}}; t_r = 0,62 \cdot \ln \frac{20 - (-5)}{0 - (-5)} = 1 \text{ с}$$

На рисунку 7 динамічна електромеханічна характеристика позначена літерами ДТ, а графік перехідного процесу побудований на інтервалі часу від 11 с до 12 с. Далі і швидкість і струм залишаються нульовими. Тонкими лініями побудований графік перехідного процесу у випадку, коли замість реактивного, на валу двигуна діяв би момент активного характеру, а швидкість двигуна досягла би фіктивного значення  $\omega_{стф}$ .

#### **Задача 41.**

Обчислити та побудувати залежності  $\omega=f(t)$  та  $M=f(t)$  при пуску двигуна, що має лінійну залежність  $\omega=f(M)$  за наступних вихідних даних: швидкість ідеального холостого ходу двигуна  $\omega_0=157$  рад/с, момент короткого замикання двигуна 100 Н·м, приведений момент інерції приводу  $J=0,15$  кг·м<sup>2</sup>, та момент опору механізму складає 25 Н·м. Скільки часу знадобиться двигуну для досягнення швидкості 75 рад/с.

### Задача 42.

Розрахувати та побудувати графік швидкості  $\omega=f(t)$  та розрахувати час пуску для двигуна постійного струму, що вмикається за допомогою двохступінчатого реостата.

Повний опір реостата слід підібрати у такий спосіб, щоб початковий момент дорівнював подвійному номінальному.

Двигун переборює момент опору  $M_c=140 \text{ Н}\cdot\text{м}=\text{const}$ .

Дані двигуна: потужність 20 кВт, номінальна швидкість обертання 800 об/хв, швидкість обертання за ідеального холостого ходу 840 об/хв, момент інерції приводу, приведений до валу двигуна,  $J=2,75 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

### Задача 43.

Побудувати залежності  $\omega(t)$  та  $M(t)$  при пуску двигуна, що має лінійну механічну характеристику  $\omega(M)$ , за наступних вихідних даних: швидкість ідеального холостого ходу двигуна  $\omega_0=157 \text{ рад/с}$ , момент короткого замикання  $M_{к.з.}=100 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , приведений момент інерції  $J=0,15 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , момент навантаження  $M_c$  незмінний, та дорівнює 50 Н·м.

### Задача 44.

Зобразити залежності  $\omega=f(t)$  та  $M = f(t)$  припуску двигуна, якщо на рисунку 4.

- а) механічна характеристика двигуна — 4, а механізму — 5;
- б) механічна характеристика двигуна — 3, а механізму — 4;
- в) механічна характеристика двигуна — 3, а механізму — 5.

### Задача 45.

ДПС НЗ має наступні дані:  $P_n=11 \text{ кВт}$ ;  $U_n=220 \text{ В}$ ;  $I_n=60 \text{ А}$ ;  $\omega_n=149,7 \text{ рад/с}$ ,  $R_y=0,17 \text{ Ом}$ . До ланцюгу якоря введено додатковий опір  $R_y=3,5 \text{ Ом}$ , приведений до валу двигуна сумарний момент інерції  $J=1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

Розрахувати і побудувати динамічні механічні характеристики та графіки перехідних процесів  $\omega(t)$  та  $M(t)$  для наступних випадків

1. Пуск двигуна з реактивним моментом навантаження  $M_{c1} = 40 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;
2. Пуск двигуна з активним моментом навантаження  $M_{c2}=120 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , напрямом котрого протилежний пусковому моменту двигуна;
3. Пуск двигуна з активним моментом навантаження  $M_{c3}=40 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , напрямом котрого співпадає з пусковим моментом двигуна.

Примітка. У другому випадку двигун розганяється у протилежному напрямі в режимі противовмикання; в третьому випадку усталений режим — режим рекуперації при швидкості, більшої за швидкість холостого ходу.

#### **Задача 46.**

Розрахувати і побудувати динамічні механічні характеристики та графіки перехідних процесів  $\omega(t)$  та  $M(t)$  при зміні полярності напруги, прикладеної до якірного ланцюгу двигуна. Дані електроприводу взяти із умов попередньої задачі. Характер моменту навантаження і дані усталеного режиму також відповідають п. 1;2;3 попередньої задачі.

#### **Задача.47.**

Двигун постійного струму з незалежним збудженням має дані:  $P_n=3,7$ кВт,  $U_n=110$  В,  $I_n=41$  А,  $n_n=1000$  об/хв,  $R_{\Sigma}=0,219$  Ом,  $J=0,125$  кг·м<sup>2</sup>. Розрахувати і побудувати динамічні механічні характеристики та графіки перехідних процесів  $\omega(t)$  та  $M(t)$  при накиді та скиданні моменту навантаження  $1M_n$ . Розрахунки і побудови провести для випадків, відповідно в усіх 4-х квадрантах, тобто при руху вперед та назад, при  $M_c$  більше, або менше нуля.

#### **Задача 48.**

Двигун прискорює привід зі стану спокою до швидкості  $n=800$  об/хв, після чого спільно з механічним гальмом уповільнює його знову до стану спокою. Визначити часи та шляхи прискорення й уповільнення приводу, якщо відомо, що

а) статичний момент визначається силами тертя й дорівнює  $M_c=80$ Н·м;

б) момент інерції приводу (двигуна та механізму), приведений до валу двигуна,  $J=6,25$  кг·м<sup>2</sup>;

в) механічне гальмо розвиває момент  $M^g=280$  Н·м;

г) двигун має прямолінійні механічні характеристики.

Двигун розвиває наступні моменти

а) при пуску  $M_n=500$  Н·м;

б) при досягненні швидкості 800 об/хв  $M_d=100$ Н·м;

в) в перший момент гальмування  $M_{r1}=400$  Н·м;

г) при зупинці момент гальмування  $M_{r0}=0$ .

#### **Задача 49.**

Визначити час гальмування противмиканням двигуна постійного струму з паралельним збудженням  $P_n=13,5$  кВт,  $U_n=110$  В,  $n_n=1050$  об/хв,  $I_n=145$  А,  $R_{\Sigma}=6$  Ом,  $J=0,55$  кг·м<sup>2</sup>, до повного зупинення для двох значень статичного моменту

а)  $M_c=0,2M_n$  та б)  $M_c=0,4M_n$ .

До початку гальмування двигун мав швидкість 1089 об/хв. Початковий струм при гальмуванні 290 А.

## 2.5 Спрощені методи розрахунків перехідних процесів

Всі приклади перехідних процесів, що розглядалися, вирішувались аналітично і розраховувались при припущеннях: механічна характеристика двигуна вертикальна або із нахилом, але обов'язково лінійна а момент навантаження є постійною величиною. Часто механічна характеристика не є лінійною, наприклад, неробоча частина механічної характеристики асинхронного двигуна або механічна характеристика двигуна постійного струму послідовного збудження. Непостійною може бути і величина статичного моменту опору, наприклад у вентилятора, або якщо механізм працює в режимі постійної потужності. Розв'язати задачі перехідних процесів в аналітичному вигляді в таких умовах дуже складно, або неможливо. У цих випадках застосовують спрощені методи розрахунків.

1. Розрахунки в комп'ютерному вигляді. Механічні характеристики двигуна та механізму записуються у аналітичному вигляді, або апроксимуються будь яким способом, як функції кутової швидкості  $M(\omega)$ ;  $M_c(\omega)$ . Диференційне рівняння механічної рівноваги (12) вирішується по крокам одним із чисельних методів інтегрування. Наприклад, при застосуванні простішого з них — метода Ейлера, це рівняння вирішується в приростах. В циклі розрахунків знаходимо біжучі значення  $M$  та  $M_c$ , а також приріст  $\Delta\omega$

$$\Delta\omega = \Delta t \cdot (\pm M \mp M_c) \cdot \frac{1}{J} \quad (24)$$

Далі розраховуємо миттєві значення швидкості та пересування

$$\omega = \omega + \Delta\omega \quad (25)$$

$$\varphi = \varphi + \omega \cdot \Delta t \quad (26)$$

2. При суттєво нелінійних формах механічних характеристик весь діапазон зміни швидкості розбивають на декілька ділянок, в межах яких вважають всі діючі моменти постійними. Перехідний процес будується як сума окремих перехідних процесів по ділянках згідно методики п. 2.3 за формулами (13)-(16). Цей метод принципово той же самий, що і метод Ейлера, але має більш грубий крок за швидкістю і виконується „в ручному режимі”. В наступному прикладі б демонструється саме цей метод.

3. Якщо на інтервалі зміни швидкості в перехідному процесі механічну характеристику двигуна можна апроксимувати прямою (двигун постійного

струму із послідовним збудженням, або робоча ділянка механічної характеристики асинхронного двигуна), а момент навантаження припустимо вважати постійним, то можна застосовувати методику згідно п. 2.4 за формулами (18)-(23).

### Приклад 6

Для приводу вентилятора, що працює з постійним навантаженням у тривалому режимі, застосовано асинхронний двигун, що має номінальну потужність  $P_n=1,5$  кВт, момент інерції ротора  $J_p=0,105$  кг·м<sup>2</sup>, момент інерції вентилятора  $J_v=0,6 J_p$ .

Механічна характеристика двигуна  $n(M)$  та крива залежності моменту опору на валу вентилятора від частоти обертання  $n(M_c)$  показані на рисунку 9.

Визначити час розгону приводу.

### Розв'язання

Стала частота обертання приводу визначається точкою перетинання графіків  $n=f(M)$  та  $n=f(M_c)$  й складає 1400 об/хв.

Сумарний момент інерції двигуна та вентилятора

$$J=J_p+J_v; \quad J=0,105(1+0,6)=0,168 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

Для визначення часу розгону графік розбиваємо на 6 ділянок:

- з першої по п'яту — з інтервалом прирощення швидкості  $\Delta n=250$  об/хв, або 26,16 рад/с,
- а на шостій  $\Delta n_6=150$  об/хв., або 15,7 рад/с.

Для кожної ділянки визначаємо час розгону при середньому обертальному моменті двигуна  $M_{cp}$  та середньому моменту опору  $M_{ст. ср}$ . Так, для першої ділянки  $M_{1cp}=17$  Н м,  $M_{ст1cp}=1,5$  Н м.

Час розгону на першій ділянці

$$\Delta t_1 = \frac{J \cdot \Delta \omega_1}{M_{1cp} - M_{ст1cp}}; \quad \Delta t_1 = \frac{0,168 \cdot 26,16}{17 - 1,5} = 0,284 \text{ с}$$



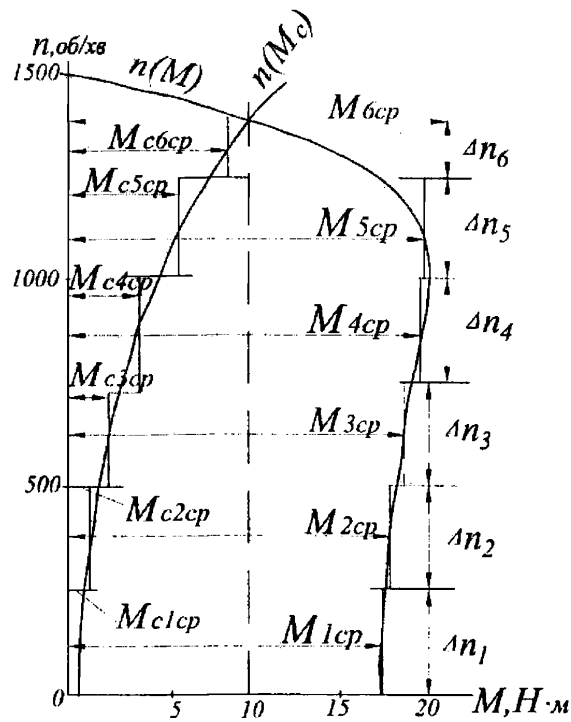


Рисунок 9 – Механічна характеристика двигуна та крива залежності моменту опору на валу вентилятора

Аналогічно визначається час розгону для решти ділянок. Результати обчислень зведено до таблиці 1.

Таблиця 1. – Результати обчислень

Номер ділянки	1	2	3	4	5	6
$M_{cp}, \text{Н}\cdot\text{м}$	17	18	21,5	23,5	23	15
$M_{ср}, \text{Н}\cdot\text{м}$	1,5	2	2,55	4	6,5	8,5
$\Delta t, \text{с}$	0,284	0,275	0,237	0,226	0,352	0,677

Час розгону електроприводу

$$t_n = \sum_1^6 \Delta t_k = 2.051 \text{с}$$

### Приклад 7

Потрібно приблизно оцінити час розбігу вхолосту ( $M_c=0$ ) АД, що має наступні технічні дані: швидкість ідеального холостого ходу  $\omega_0=314$  рад/с, пусковий момент  $M_n=80$  Н·м, максимальний (критичний) момент  $M_k=120$  Н·м, момент інерції ротора  $J=0,2$  кг·м<sup>2</sup>.

## Розв'язання

Точне визначення часу розбігу АД з нелінійною механічною характеристикою пов'язане з деякими ускладненнями.

Якщо ж обмежитись лише оцінкою цього часу, то задача спрощується й розв'язується у наступний спосіб.

Реальна характеристика двигуна  $\omega(M)$  замінюється на прямокутну. Середній пусковий момент  $M_{cp}$ , що звичайно визначається, як півсума пускового  $M_n$  та критичного  $M_k$  моментів, тобто  $M_{cp}=(M_n+M_k)/2$ , приймається за час розбігу двигуна незмінним.

Тоді справедливими будуть наступні співвідношення

$$t_{роз} = t_{п.п}$$

$$M_{cp} = (80 + 120) / 2 = 100 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$t_{п.п.} = J(\omega_{кін} - \omega_{поч}) / (M - M_c);$$

$$t_{розб} = t_{п.п} = J(\omega_0 - 0) / (M_{cp} - 0) = 0,2314 / 100 = 0,63 \text{ с};$$

### Задача 50.

Визначити час розбігу двигуна постійного струму з послідовним збудженням  $P_n = 29 \text{ кВт}$ ,  $n_n = 740 \text{ об/хв}$ ,  $U_n = 220 \text{ В}$ ,  $I_n = 154 \text{ А}$ ,  $J = 2,37 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ,  $R_{я} = 0,07 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 0,03 \text{ Ом}$ , при пуску у два ступені. Статичний момент при пуску складає 50% номінального. Максимальний момент при пуску 2,42, мінімальний 1,08 від номінального. Момент інерції механізму, приведений до валу двигуна,  $0,625 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

Природну механічну характеристику побудувати на підставі універсальної механічної характеристики (див. у додатках). Механічні характеристики в діапазоні  $1,08 < M < 2,42$  лінеаризувати. Вважати пуск завершеним при досягненні двигуном швидкості, що дорівнює 97% сталого значення.

### Задача 51.

Визначити час динамічного гальмування двигуна постійного струму з незалежним збудженням, що приводить до руху вентилятор.

Рівняння механічних характеристик двигуна  $M = -0,018n$  та вентилятора  $M = -(3 + 12 \cdot 10^{-6} \cdot n^2)$ . Гальмування починається зі швидкості 1000 об/хв. Приведений момент інерції механізму та якоря двигуна  $11,25 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

### Задача 52.

Обчислити перехідний механічний процес пуску двигуна з механічною характеристикою 6 (див. рис. 4) за наявності на його валу навантаження з характеристикою 1 та сумарного приведенного моменту інерції, що дорівнює  $0,54 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

## Список рекомендованої літератури

1. Теория злектропривода. Часть I: Учебн. по- соб./А.Б. Зеленов. — Алчевск: ДонГТУ, 2005. — 394 с.
2. Теория злектропривода. Часть II: Учебн. по- соб./А.Б. Зеленов. — Алчевск: ДонГТУ, 2005. — 513 с.
3. Теорія електропривода: Підручник/М.Г. Попович, М.Г. Борисюк, В.А. Гаврилюк та ін.; За ред. М.Г. Поповича. — К.: Вища шк., 1993. — 494 с.
4. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс злектропривода. — М.: Знергоиздат, 1981. — 576 с.
5. Теория автоматизированного злектропривода: Учеб. пособие для вузов /Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. — М.: Знергия, 1979. — 616 с., ил.
6. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. — М.: Знергоатомиздат. — 1986. — 416 с.
7. Башарин А.В., Голубев Ф.Н., Кепперман В.Г. Примеры расчетов автоматизированного злектропривода. — М.: Знергия, 1972. — 439 с.
8. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. — М.: Знергия, 1977. — 432 с.
9. Основні автоматизированного злектропривода. Учеб. пособие для вузов. — М.: Знергия, 1974. — 568 с.
10. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основні злектропривода. — М. — Л.: Госзнергоиздат, 1963. — 722 с.
11. Піцан Р., Бардачевський В., Бойчук Б. Збірник задач до курсу “Електропривід”. Навчальний посібник. — Львів, Видавництво Державного університету “Львівська політехніка”, 1999. — 426 с.
12. Куваева А.П., Липатов Д.Н. Сборник задач по основам электропривода- — М.: Госзнергоиздат, 1955. — 170 с.
13. Фатеев А.В., Норневский Б.И. Сборник при- меров и задач по теории злектрического привода. — М.: Госзнергоиздат, 1951. — 312 с.
14. Справочник по автоматизированному злектро- приводу/ Под редакцией Елисеева В.А. и Шинянского А.В. — М.: Знергоатомиздат, 1983. — 616 с.
15. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/ А.З.Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Со- боленская. — М.: Знергоиздат, 1982. — 504 с.
16. Справочник по злектрическим машинам. В 2 т./ Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. — М.: Знергоатомиздат, 1988. — 456 с.
17. Справочник по проектированию автомати- зированного злектропривода и систем управления тех- нологическими процессами/ Под ред. В.И. Круповича, Ю.Г. Барыбина, М.П. Самовера. — 3-е изд. перераб. и доп. — М.: Знергоиздат, 1982. — 416 с.
18. Крановое злектрооборудование: Справочник/ Алексеев Ю.В., Богословский А.П., Певзнер Е.М. и др.; Под ред. А.А. Рабиновича. — М.: Знергия, 1979. — 240 с.
19. Яуре А.Г., Певзнер Е.М. Крановый злектро- привод: Справочник. — М.: Знергоатомиздат, 1988. — 344 с.

*Навчальне видання*

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до практичних занять  
з дисципліни

**ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНЕ  
ТА ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ**

*(для студентів 3, 4 курсів всіх форм навчання  
напряму підготовки 6.050702 – Електромеханіка  
і слухачів другої вищої освіти за спеціальністю  
“Електромеханічні системи автоматизації та електропривод”)*

Укладачі: **ФАТЕЄВ** Віктор Миколайович  
**ШАВКУН** Вячеслав Михайлович

Відповідальний за випуск *О. В. Кульбашиний*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2012, поз. 172М

---

Підп. до друку 03.06.2013

Друк на ризографі

Зам. №

Формат 60x84/16

Ум. друк. арк. 2,6

Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач.

Харківський національний університет  
міського господарства імені О.М. Бекетова,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 4705 від 28.03.2014 р.