

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДВНЗ «ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ

з дисципліни «Теорія електроприводу. Частина 2» для студентів спеціальностей 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 131 «Прикладна механіка» освітнього ступеня «Бакалавр» денної та заочної форм навчання

УДК 62-83

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни Теорія електроприводу. Частина 2» для студентів спеціальностей 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, 131 Прикладна механіка освітнього ступеня «Бакалавр» денної та заочної форм навчання [Електронний ресурс] / уклад. П. В. Белицький. – Луцьк : ДонНТУ, 2023.– 69 с.

Укладач: Белицький П. В., ст. викл. каф. електричної інженерії

Рецензент: Калиниченко В. В., доцент, канд. техн. наук, доцент каф. прикладної механіки

Відповідальний за випуск: Колларов О. Ю. зав. каф. електричної інженерії, канд. техн. наук, доцент

Затверджено навчально-методичним відділом ДВНЗ
«ДонНТУ», протокол № від 2023 р.

Розглянуто на засіданні кафедри електричної інженерії,
протокол № 11 від 27.06.2023 р.

ЗМІСТ

	Вступ.....	4
1	Практична робота № 1.....	5
2	Практична робота № 2.....	11
3	Практична робота № 3.....	18
4	Практична робота № 4.....	26
5	Практична робота № 5.....	36
6	Практична робота № 6.....	45
7	Практична робота № 7.....	52
8	Практична робота № 8.....	56
	Список використаної літератури.....	59
	Додаток А. Визначення тривалості пуску двигуна постійного струму	60
	Додаток Б. Визначення енергетичних показників електроприводу	66

ВСТУП

Електричний привід призначений для перетворення енергії електромагнітного поля на механічну енергію. Він є енергетичною основою багатьох галузей промисловості. Технічний рівень електроприводу визначається надійністю й енергоефективністю, і саме він зумовлює ефективність функціонування технологічного обладнання. Розвиток електричного приводу йде шляхом підвищення економічності, зокрема – енергетичної ефективності, а також надійності за рахунок подальшого вдосконалення двигунів, апаратів, перетворювачів і засобів керування.

Дисципліна «Теорія електроприводу» є фундаментальною, вона дає змогу описувати, пояснювати і передбачати явища, які відбуваються в усталених і перехідних режимах електроприводу, в також в електромеханічних системах, оснащених електроприводом. Основні загальні завдання сучасної теорії електроприводу полягають у з'ясуванні закономірностей, визначення характеристик і робочих режимів електропривода, обґрунтуванні раціонального вибору його елементів, у проектуванні та дослідженні автоматичних або автоматизованих електромеханічних систем автоматичного керування. Виконання практичних робіт з дисципліни «Теорія електроприводу. Частина 2» є важливим етапом з підготовки спеціалістів у галузі електромеханіки і механіки. Основними завданнями даного етапу підготовки фахівців з відповідних спеціальностей є: закріплення лекційного матеріалу з означеної дисципліни; формування знань і навичок із проектування систем електроприводу; підготовка до семестрового іспиту з означеної дисципліни. Тематика практичних занять: розрахунок параметрів перехідних процесів в електроприводі, розрахунок параметрів регулювання швидкості та параметрів регуляторів швидкості, визначення енергетичних показників, розрахунок діаграм навантаження електроприводу, нагрівання й охолодження двигунів.

Основна мета даних методичних вказівок – апробація студентами теоретичного матеріалу, набутого під час вивчення означеної дисципліни.

1 ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1

Тема. Визначення часу розгону системи «електродвигун – робоча машина» методом графоаналітичного інтегрування

Мета. Засвоїти методику розрахунку часу розгону системи «електродвигун – робоча машина» методом графоаналітичного інтегрування рівняння руху електроприводу.

Завдання № 1 – Графоаналітичне інтегрування рівняння руху електроприводу з асинхронними двигунами

Короткі теоретичні відомості

При розробці технологічних процесів, пов'язаних з частими пусками, гальмуванням і реверсуванням електродвигунів, перевірці двигунів на нагрівання під час перехідних режимів тощо виникає необхідність визначення часу пуску або гальмування системи електродвигун – робоча машина. У тих випадках, коли аналітичний розв'язок ускладнений через відсутність точного рівняння механічної характеристики (наприклад, у асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором), час пуску визначають графічним або графоаналітичним методом. Вихідними даними для визначення часу розгону є: механічна характеристика електродвигуна – залежність кутової швидкості його валу від електромагнітного обертового моменту, $\omega = f(M)$; механічна характеристика виробничого механізму, зведена до валу електродвигуна – залежність моменту статичних опорів від кутової швидкості її приводного валу, $\omega = \varphi(M_c)$; приведений до валу електродвигуна момент інерції системи електродвигун – робоча машина J_n .

Порядок розрахунку часу розгону системи «електродвигун – робоча машина» методом графоаналітичного інтегрування рівняння руху електроприводу є таким.

1. Отримання природної механічної характеристики асинхронного двигуна

Механічну характеристику асинхронного двигуна можна отримати, використовуючи формулу Клосса:

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

де M_{max} – момент, що розвивається двигуном, який відповідає його критичному ковзанню s_{cr} ;

s – поточне значення ковзання ротора двигуна.

Графік природної механічної характеристики асинхронного двигуна будується в координатах $\omega(M)$.

2. Отримання механічної характеристики виробничого механізму

Вигляд механічної характеристики виробничого механізму залежить від конкретного типу механізму та технічних умов його роботи.

3. Отримання та обробка характеристики динамічного моменту

Під час розгону виробничого механізму з асинхронним приводом виникає динамічний момент, який у довільний момент t визначається, згідно із основним рівнянням електроприводу, як

$$M_{\text{дин}}(t) = M(t) - M_c(t) = J_{\text{п}} \frac{d\omega(t)}{dt}.$$

На полі графіку характеристики асинхронного двигуна будується графік характеристики динамічного моменту як різниця між значеннями моменту M , зумовленого механічною характеристикою двигуна, і моменту опору M_c , зумовленого механічною характеристикою виробничого механізму, за певного значення кутової швидкості ω . Отриману залежність розбивають на прямолінійні ділянки, - тобто, її заміняють ступінчастою кривою.

4. Визначення кроків дискретизації для кутової швидкості та часу

Обираються кроки інтегрування рівняння руху електроприводу для кутових швидкостей ступінчастої кривої $\Delta\omega_j$, що відповідає характеристиці динамічного моменту $M_{динj}$. Знаходять кроки дискретизації для параметру часу Δt_j :

$$\Delta t_j = \frac{J_n \Delta \omega_j}{M_{динj}}.$$

5. Побудування графіків зміни кутової швидкості виробничого механізму з асинхронним приводом та моменту на валу ротора двигуна під час розгону

Будується графік зміни кутової швидкості в часі по точках, які визначаються відповідними кроками дискретизації кутової швидкості $\Delta\omega_j$ і часу Δt_j , причому:

$$\omega_j = \sum_{j=1}^j \Delta \omega_j ,$$

$$t_j = \sum_{j=1}^j \Delta t_j.$$

З урахуванням природної механічної характеристики асинхронного двигуна $M(\omega)$, визначається значення M_j для кожного значення ω_j , і будується графік зміни моменту на валу ротора двигуна $M_j(t_j)$ в процесі розгону.

Завдання на самостійне опрацювання

Побудувати природну механічну характеристику асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, механічну характеристику виробничого механізму, а також графіки зміни кутової швидкості та обертового моменту на роторі двигуна в процесі розгону механізму за вихідними даними, наведеними в таблиці 1.2. Механічну характеристика виробничого механізму слід будувати по точках: (25;0), (40;25), (80;50), (150;75), (230;100), (340;125), (435;150).

Приклад виконання завдання наведений в [1, с. 242-244].

Таблиця 1.2 – Вихідні дані для виконання завдання

варіант	P_N , кВт	n_S , хв. ⁻¹	s_{cr}	k_{Mm}	J_n , кг·м ²
1	75	1500	0,05	1,6	25
2	76		0,06	1,7	26
3	77		0,05	1,8	27
4	76		0,07	1,9	28
5	75		0,06	2,0	27
6	76		0,05	1,9	25
7	77		0,06	1,8	26
8	78		0,07	1,7	27
9	79		0,06	1,6	26
10	80		0,05	1,5	27

Завдання № 2 – Графоаналітичне інтегрування рівняння руху електроприводу із двигунами постійного струму

Короткі теоретичні відомості

Двигун постійного струму має таку технічну характеристику: P_N – номінальна потужність, n_N – номінальна частота обертання якоря, U_N – номінальна напруга мережі, η_N – коефіцієнт корисної дії номінального режиму, J_n – приведений момент інерції виробничого механізму; R_a – опір кола обмотки якоря; R_E – опір кола обмотки збудження.

Природна характеристика двигуна будується по точках $(0;n_0)$ і $(M_N;n_N)$ шляхом проведення прямої через вказані точки.

Штучна характеристика двигуна на першій ступені його запуску із повністю введеним в коло якоря опором $R_{\text{дод}}$ будується по точках $(0;n_0)$ і $(2M_N;0)$.

Приймаючи прямо пропорційну залежність струму в обмотці якоря від моменту на його валу, визначаємо максимальний момент перемикавання, $M_1=2M_N$, мінімальний момент перемикавання, $H \cdot m$:

$$M_2 = \frac{M_1}{m \sqrt{\frac{U_N}{2I_N R_a}}},$$

де m – кількість ступеней запуску двигуна.

Будується залежність статичного моменту опору на виробничому механізмі $M_c(\omega)$ за точками (25;0), (40;25), (80;50), (150;75), (230;100), (340;125), (435;150).

Будується характеристика динамічного моменту $M_{дин}(\omega)=M(\omega)-M_c(\omega)$.

Графіки зміни кутової швидкості та моменту на валу двигуна при пуску виробничого механізму здійснюється згідно із раніше розглянутою методикою.

Будується таблиця даних для побудування графіків зміни кутової швидкості та моменту на валу двигуна під час його пуску і графіки зміни вказаних параметрів під час пуску.

Завдання на самостійне опрацювання

Оцінити час розгону заданого вище виробничого механізму двигуном постійного струму з паралельним збудженням із вихідними даними, наведеними в таблиці 1.4. Запуск двигуна робити із додатковим опором в колі якоря $R_{од}$ з наступним переключенням зі штучної характеристики двигуна на природню в кілька ступеней. Кількість ступеней перемикавання, а також максимальний і мінімальний струм перемикавання визначити самостійно. Числовий приклад виконання завдання наведено в додатку А.

Контрольні питання

1. Запишіть основне рівняння руху електроприводу і проаналізуйте його.
2. Що називається моментом інерції?
3. Що називається приведеним моментом інерції системи «електродвигун – робоча машина»?
4. Як визначається приведений момент інерції системи «електродвигун – робоча машина»?

Таблиця 1.4 – Вихідні дані для виконання завдання

варіант	P_N , кВт	n_N	U_N , В	J_n , кг·м ²	R_a , Ом	R_E , Ом	η_N
1	75	1400	380	25	0,3	0,15	0,92
2	76	1410		26			0,95
3	77	1420		27			0,93
4	76	1440		28			0,94
5	75	1450		27			0,91
6	76	1430		25			0,93
7	77	1410		26			0,92
8	78	1420		27			0,94
9	79	1400		26			0,90
10	80	1410		27			0,95

- 5 Що називається механічною характеристикою виробничого механізму?
6. Запишіть рівняння механічної характеристики виробничого механізму і проаналізуйте його.
7. Як будується залежність динамічного моменту від кутової швидкості?
8. Навіщо крива динамічного моменту ділиться на ряд ділянок?
9. Як визначається загальний час пуску електроприводу.
10. Які властивості електродвигуна не ураховуються при оцінці тривалості його перехідних процесів шляхом графо-аналітичного інтегрування рівняння руху електроприводу?

2 ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2

Тема. Розрахунок кривих струму, моменту та швидкості у функції часу у перехідних режимах (пуску, гальмування та при роботі під навантаженням)

Мета. Ознайомитися із аналітичними і графо-аналітичними способами визначення параметрів перехідних процесів в електроприводі

Завдання № 1 – Розрахунок кривих моменту та швидкості як функції часу в режимі пуску електроприводу

Короткі теоретичні відомості

На результати аналітичного і графо-аналітичного визначення параметрів перехідних процесів в електроприводі суттєво впливає електромеханічна стала часу – розрахунковий час, протягом якого швидкість двигуна досягає свого усталеного значення під дією незмінного моменту, що дорівнює пусковому. При цьому $\omega(t)$ є лінійно зростаючою функцією часу і зображується дотичною, проведеною до початкової точки кривої перехідного процесу.

Для електроприводу з двигунами, що мають лінійну механічну характеристику, рівняння моменту двигуна і його кутової швидкості під час розгону матимуть вигляд:

$$M(t) = M_c \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{mk}}} \right) + M_1 e^{-\frac{t}{T_{mk}}}, \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$\omega(t) = \omega_c \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{mk}}} \right) + \omega_{\kappa.k-1} e^{-\frac{t}{T_{mk}}}, \text{ с}^{-1},$$

де M_c , ω_c – статичні момент і кутова швидкість усталеного режиму робочого механізму, відповідно; M_1 – максимальний момент перемикавання; $\omega_{\kappa.k-1}$ – кінцева кутова швидкість попередньої ступені розгону двигуна; T_{mk} – електромеханічна стала часу характеристики двигуна на поточній ступені розгону.

У випадку використання в електроприводі двигуна постійного струму з паралельним збудженням, електромеханічна стала часу визначиться по формулі:

$$T_{mk} = \frac{J_n R_{яk}}{(K\Phi)^2} = \frac{J_n (\omega_0 - \omega_{hk})}{M_H}, \text{ с},$$

де J_n – приведений момент інерції виробничого механізму, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; $R_{яk}$ – опір кола якоря на поточній ступені розгону двигуна, Ом; $K\Phi$ – коефіцієнт електрорушійної сили двигуна; ω_0 – кутова швидкість ідеального холостого ходу двигуна; ω_{hk} – кутова швидкість якоря двигуна на поточній ступені його розгону; M_H – номінальний момент двигуна.

Сумарний час перехідного процесу, с:

$$t_{nep} = \ln \frac{M_1 - M_c}{M_2 - M_c} \sum_{k=1}^m T_{mk} + (3 \dots 4) T_{mm},$$

де M_2 – мінімальний момент перемикання; T_m – електромеханічна стала часу для останньої ступені розгону двигуна.

Методи визначення параметрів перехідних процесів в електроприводі із двигунами постійного струму з паралельним збудженням використовуються і при визначенні відповідних параметрів асинхронного електроприводу.

Завдання на самостійне опрацювання

1. Для електроприводу із двигуном постійного струму з паралельним збудженням із вихідними даними таблиці 2.1 необхідно: записати рівняння моменту і швидкості двигуна при пуску в одну ступінь з додатковим опором $R_d = 0,55 R_H$, де R_H – номінальний опір двигуна, та статичним моментом усталеного режиму $M_c = 0,85 M_H$; визначити електромеханічну сталу часу приводу, оцінити орієнтовну тривалість та по-будувати графіки зміни параметрів перехідного

процесу з плином часу, якщо момент інерції ви-робничого механізму, зведений до валу двигуна $J_m=0,75J_{ov}$. Приклад наведено в додатку А.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані до завдання 1

№	P_n , кВт	U_n , В	I_n , А	n_n , хв ⁻¹	$R_{я}$, Ом	J_{ov} , кг·м ²
1	14	220	78	1500	0,120	0,160
2	13	110	135	1120	0,125	0,161
3	13	220	67	1120	0,127	0,162
4	15	220	80	2100	0,130	0,163
5	15	220	78	2500	0,122	0,164
6	15	110	172	2000	0,129	0,163
7	12,5	220	69	2100	0,121	0,162
8	13	440	22,4	2500	0,123	0,161
9	16	220	82	2000	0,124	0,160
10	16	440	41	2500	0,126	0,161

Завдання № 2 – Розрахунок кривих моменту та швидкості як функції часу в режимі гальмування електроприводу

Короткі теоретичні відомості

На практиці використовуються такі види електричного гальмування приводних двигунів виробничих механізмів:

- генераторне (рекуперативне);
- динамічне;
- противмиканням (змінною полярністю).

Визначення часу перехідного процесу при електричному гальмуванні приводного механізму можливе аналітичним і графо-аналітичним способом.

При гальмуванні електроприводу з двигунами постійного струму з паралельним збудженням противмиканням, момент на валу приводного двигуна

змінюється в межах $[-M_z; M_{c1}]$, де M_z – величина гальмівного моменту в початковий момент часу гальмування (знак «мінус» вказує, що він протилежно направлений статичному моменту виробничого механізму); M_{c1} – статичний момент виробничого механізму в робочому режимі електроприводу. Причому, $|M_z| \gg |M_{c1}|$. Одночасно із цим, кутова швидкість якоря двигуна змінюється від сталої кутової швидкості робочого режиму ω_{c1} до нового усталеного значення ω_{ca} , змінюючи напрям обертання, $|\omega_{c1}| < |\omega_{ca}|$.

Рівняння параметрів перехідного процесу при гальмуванні електроприводу противмиканням матимуть вигляд:

$$\left. \begin{aligned} M &= M_{c1} \left(1 - e^{-t/T_{м.з}} \right) - M_z e^{-t/T_{м.з}}; \\ \omega &= -\omega_{ca} \left(1 - e^{-t/T_{м.з}} \right) + \omega_{c1} e^{-t/T_{м.з}}. \end{aligned} \right\}$$

де $T_{мз}$ – стала часу гальмівної характеристики двигуна, с:

$$T_{м.з} = \frac{J \omega_{c1}}{M_z - M_n},$$

J – момент інерції виробничого механізму, M_z – момент на валу якоря двигуна в початковий момент часу гальмування, M_n – «пусковий» момент двигуна, який відповідає при його гальмуванні кутовій швидкості $\omega=0$; ω_{ca} – усталене значення кутової швидкості двигуна при гальмуванні, c^{-1} :

$$\omega_{ca} = \frac{U}{K\Phi} + \frac{M_z (R_d + r_a)}{(K\Phi)^2},$$

Момент на валу якоря двигуна на початку гальмування визначиться, Н·м:

$$M_z = - \frac{(U_n + K\Phi \cdot \omega_{c1}) K\Phi}{(R_d + r_a)},$$

де U_n – номінальна напруга, В, $K\Phi$ – конструктивний коефіцієнт двигуна; r_a , R_d – опори кола якоря і гальмівного реостату, відповідно, ω_n – номінальна кутова швидкість двигуна.

Момент на валу якоря двигуна, який відповідає при його гальмуванні кутовій швидкості $\omega=0$, визначиться:

$$M_n = \frac{U_n K\Phi}{(R_d + r_a)},$$

Час перехідного процесу електроприводу, с:

$$t_e = T_{м.з} \ln \frac{M_e + M_{c1}}{M_n + M_{c1}}$$

При динамічному гальмуванні електроприводу із двигунами постійного струму з паралельним збудженням, момент на валу приводного двигуна також змінюється в межах $[-M_e; M_{c1}]$. Причому, $|M_e| > |M_{c1}|$. Одночасно із цим, кутова швидкість якоря двигуна змінюється від сталої кутової швидкості робочого режиму ω_{c1} до нового усталеного значення ω_e , змінюючи напрям обертання, $|\omega_{c1}| > |\omega_e|$. В цьому випадку гальмівна характеристика двигуна проходить через початок координат механічної характеристики двигуна.

Рівняння параметрів перехідного процесу електроприводу при динамічному гальмуванні двигуна постійного струму з паралельним збудженням матимуть такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} M &= M_c \left(1 - e^{-t/T_{в.з}} \right) - M_e e^{-t/T_{в.з}}; \\ \omega &= -\omega_e \left(1 - e^{-t/T_{в.з}} \right) + \omega_{c1} e^{-t/T_{в.з}}, \end{aligned} \right\}$$

Електромеханічна стала гальмівної характеристики, с:

$$T_{\partial,z} = \frac{J\omega_{cl}}{M_z} = \frac{J(R_{\partial} + r_{я})}{(K\Phi)^2},$$

Момент на валу якоря двигуна на початку гальмування, Н·м:

$$M_z = \frac{\omega_{cl}(K\Phi)^2}{(R_{\partial} + r_{я})},$$

Тривалість перехідного процесу, с:

$$t_{\partial,z} = T_{\partial,z} \ln \frac{M_z + M_c}{M_c}.$$

Значення усталеної в результаті динамічного гальмування кутової швидкості якоря двигуна ω_c знаходиться аналогічно швидкості ω_{ca} у випадку гальмування противмиканням. Всі інші позначення у формулах, які описують режим динамічного гальмування, аналогічні таким у формулах, які відповідають режиму гальмування противмиканням.

Завдання на самостійне опрацювання

Записати рівняння і визначити час перехідного процесу при гальмуванні електроприводу із двигунами постійного струму з паралельним збудженням противмиканням і при його динамічному гальмуванні за вихідних даних, а також даних попереднього усталеного режиму, який відповідає результатам виконання завдання 2 даної практичної роботи. Опір гальмівного реостату обрати 1 Ом. Скласти звіт з практичної роботи із висновками щодо тривалості перехідних процесів в електроприводі із двигунами постійного струму з паралельним збудженням при пуску й електричному гальмуванні виробничого механізму.

Числовий приклад розв'язку завдання наведений в [1, с. 235-236, 237-278].

Таблиця 2.2 – Вихідні дані для виконання завдання

№	P_N , кВт	n_N	U_N , В	J_n , кг·м ²	η_N
1	75	3500	440	25	0,925
2	75	1410	440	26	0,885
3	80	2800	440	27	0,888
4	75	1440	440	28	0,915
5	80	2800	220	27	0,891
6	80	2400	220	25	0,890
7	79	2250	440	26	0,890
8	80	1500	220	27	0,895
9	79	1000	440	26	0,884
10	80	1180	440	27	0,885

Контрольні питання

1. В чому полягає сутність параметру «електромеханічна стала часу»?
2. Який характер має графік зміни кутової швидкості, струму, моменту на валу двигуна під час перехідних процесів роботи електроприводу?
3. Чому тривалість перехідних процесів, що оцінена за допомогою розрахунку кривих перехідного процесу, більша за тривалість перехідних процесів, яку оцінено методом графоаналітичного інтегрування рівняння руху приводу?
4. Від чого залежить розрахунковий час пуску двигуна з механізмом?
5. Назвіть способи гальмування двигунів приводу виробничих механізмів .
6. Який основний недолік гальмування електроприводу противмиканням?
7. Яка сутність параметру «розрахунковий час гальмування електроприводу» і від яких параметрів двигуна та виробничого механізму він залежить?
8. Від яких параметрів залежить значення усталеної швидкості електродвигуна після його динамічного або гальмування противмиканням?
9. Які властивості електроприводу не ураховує спосіб розрахунку кривих параметрів перехідного процесу із використанням сталої часу?

3 ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3

Тема. Розрахунок основних показників регулювання кутової швидкості електроприводу

Мета. Навчитися визначати основні показники регулювання кутової швидкості промислових механізмів з електроприводом

Завдання № 1 – Основні показники регулювання швидкості в системі
«генератор – двигун»

Короткі теоретичні відомості

Регулювання швидкості електроприводу здійснюється із метою підвищення технічного рівня промислових установок і механізмів із електроприводом: підвищення його продуктивності, надійності та зниження витрат енергії на функціонування відповідної установки, механізму.

Розглянемо показники регулювання кутової швидкості в сторону зменшення для електроприводу.

А) Статичні показники – не ураховують параметр часу. Головним статичним показником регульованого електроприводу є діапазон регулювання:

$$D = \omega_{\max} / \omega_{\min} = \omega_{\max} \beta / M_n = \omega_n K\Phi / (I_a R_a) \approx U_n / (I_n R_a),$$

де $\omega_{\max}$ – максимальна кутова швидкість електроприводу; $\omega_{\min}$ – мінімальна кутова швидкість електроприводу; β – модуль жорсткості робочої зони механічної характеристики, $\beta = \Delta M / \Delta \omega$, ΔM – зміна моменту в діапазоні регулювання швидкості; $\Delta \omega$ – зміна кутової швидкості в діапазоні регулювання; M_n – номінальний момент електроприводу; $K\Phi$ – механічний коефіцієнт двигуна; I_a , I_n – струм в колі якоря двигуна в режимі регулювання швидкості та в номінальному режимі, відповідно; U_n – номінальна напруга живлення двигуна.

Абсолютна похибка (точність регулювання):

$$\delta = \Delta\omega / \omega_{\min} = \Delta\omega D / \omega_n = \omega_n \beta D / M_n.$$

Синтез системи регулювання:

$$v = \Delta\omega / \omega_n = \delta / D,$$

$$v(\%) = \Delta\omega \cdot 100 / \omega_n = \delta \cdot 100 / D.$$

Плавність регулювання:

$$k_{nl} = \omega_n / \omega_{n-1},$$

де ω_n, ω_{n-1} – найближчі суміжні швидкості.

Б) Динамічні показники – ураховують параметр часу. Характеризують керуючу та збурювальну дію регулятора швидкості, а також стрибки параметрів регулювання в процесі такого. Перерегулювання визначиться по формулі:

$$\sigma = \Delta\omega_{\max} / \omega_c,$$

де $\Delta\omega_{\max}$ – максимальне відхилення регульованої величини; ω_c – усталене значення регульованої величини.

Час першого узгодження t_1 визначається тривалістю, за яку регульована величина вперше досягає свого усталеного значення. Час регулювання t_2 – тривалість, за яку регульована величина остаточно стабілізується на рівні свого усталеного значення. Час перехідного процесу t_{nep} – тривалість, по закінченні якої регульована величина відрізняється від її усталеного значення не більш, ніж на 5 %. Динамічна зміна швидкості – її максимальна короткочасна зміна відносно усталеного значення при переході на нову ступінь регулювання. Статична зміна швидкості t_{cm} – різниця між усталеними значеннями швидкості при переході на нову ступінь регулювання. Час встановлення t_ϵ – тривалість переходу на нову ступінь регулювання.

Система «генератор – двигун» (Г-Д) є електромеханічним перетворювачем енергії, яка дозволяє плавне регулювання кутової швидкості двигуна в досить великому діапазоні без перемикання кола якоря. Якщо задані номінальна потужність, що розвивається двигуном P_N , номінальна частота обертання n_N , номінальна напруга живлення U_N і коефіцієнт корисної дії двигуна в номінальному режимі η_N , то діапазон регулювання визначається таким чином.

- 1) Будується природна характеристика двигуна по точках $(0; \omega_0)$ і $(I_n; \omega_N)$.
- 2) Визначається швидкість ідеального холостого ходу двигуна при зниженні ЕРС генератора до значення $E_{г.к}$:

$$\omega_{0к} = E_{г.к} / K\Phi, \text{ с}^{-1}.$$

- 3) Визначається нижня межа регулювання швидкості $\omega_{\min}$ для максимального допустимого струму $I_{\max} = 2I_n$:

$$\omega_{\min} = I_n R_{я} / K\Phi, \text{ с}^{-1}.$$

- 4) Визначається діапазон та інші показники регулювання швидкості.

Завдання на самостійне опрацювання

Користуючись наведеними методичними рекомендаціями визначити діапазон регулювання швидкості для системи Г-Д при номінальному струмі збудження двигуна, якщо допустимі короткочасні перевантаження складають $I_{\max} = 2I_n$, а також $R_{я.дв.н} = R_{я.г.н} = 0,07R_{дв.н}$, де $R_{я.дв.н}$, $R_{я.г.н}$ – опір кола якоря двигуна і генератора, відповідно, $R_{дв.н}$ – номінальний опір двигуна, $E_{г.н} = 1,05U_N$, де $E_{г.н}$ – номінальна ЕРС генератора. Побудувати природну і штучні характеристики при ЕРС генератора $E_{г1} = 0,8E_{г.н}$, $E_{г2} = 0,6E_{г.н}$ і $E_{г3} = 0,4E_{г.н}$. Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 3.1. Визначити, який додатковий опір потрібно увімкнути в коло якоря задля зниження кутової швидкості втричі відносно номінального значення. Знайти втрати енергії від такого регулювання кутової швидкості.

Числовий приклад вирішення завдання наведено [1, с. 273-274].

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для виконання завдання

№	P_N , кВт	n_N	U_N , В	η_N
1	75	3500	440	0,925
2	75	1410	440	0,885
3	80	2800	440	0,888
4	75	1440	440	0,915
5	80	2800	220	0,891
6	80	2400	220	0,890
7	79	2250	440	0,890
8	80	1500	220	0,895
9	79	1000	440	0,884
10	80	1180	440	0,885

Завдання № 2 – Параметри регулювання кутової швидкості двигунів при використанні різних способів регулювання

Короткі теоретичні відомості

Технічно регулювання кутової швидкості електроприводу здійснюється різноманітними способами: реостатний, зміною струму збудження, зміною напруги живлення, шунтуванням кола ротора (якоря) двигуна за допомогою перетворювачів: механічного – система «генератор – двигун» (Г-Д), а також напівпровідникового – система «тиристорний перетворювач – двигун» (ТП-Д).

Розглянемо регулювання кутової швидкості двигуна постійного струму із незалежним збудженням. Реостатний спосіб регулювання полягає у зменшенні частоти обертання якоря двигуна через наявність у колі ротора додаткового опору R_0 , причому збільшення додаткового опору в колі якоря зменшує

жорсткість механічної характеристики двигуна та кутову швидкість його робочого режиму.

Кутова швидкість якоря двигуна при реостатному регулюванні визначиться:

$$\omega = \omega_0 - \frac{M}{(K\Phi)^2} [R_{\text{я}} + R_{\text{д}}(1 - \gamma)], \text{ c}^{-1},$$

де ω_0 – кутова швидкість ідеального холостого ходу, c^{-1} ; M – момент робочого режиму двигуна, $\text{Н} \cdot \text{м}$; $K\Phi$ – електромеханічний коефіцієнт двигуна, $\text{В} \cdot \text{с}$; $R_{\text{я}}$, $R_{\text{д}}$ – опір кола якоря двигуна і додатковий опір регульовального реостату, відповідно, Ом ; γ – відносний час замикання ключа, який шунтує додатковий опір $R_{\text{д}}$, $0 \leq \gamma \leq 1$, визначає відносну частку періоду комутації, коли опір зашунтовано, $R_{\text{д}}=0$. При $\gamma=0$ додатковий опір не шунтується протягом періоду комутації, опір у колі якоря $R_{\text{д}} \neq 0$; при $\gamma=1$ додатковий опір постійно зашунтований, опір кола якоря $R_{\text{д}}=0$; при $0 < \gamma < 1$ здійснюється імпульсне реостатне регулювання швидкості двигуна, причому його дійсний додатковий опір становитиме $R_{\text{д}}' = (1 - \gamma)R_{\text{д}}$.

При зміні напруги живлення використовується електромеханічна система «керований вентиль – двигун» (КВ-Д), яка подає на обмотку якоря двигуна потрібну напругу. Напруга U змінюється з урахуванням опору системи КВ-Д – $R_{\text{н}}$, причому збільшення $R_{\text{н}}$ призводить до зниження напруги U , що подається на двигун, і швидкості обертання останнього ω ,

$$U = E_{\text{н}} - \frac{M}{K\Phi} R_{\text{н}}, \text{ В},$$

де $E_{\text{н}}$ – електрорушійна сила керованого вентиля, В:

$$E_{\text{н}} = U_{\text{Н}} - \frac{M}{K\Phi} R_{\text{я}},$$

$U_{\text{Н}}$ – номінальна напруга мережі живлення, В.

Швидкість обертання якоря двигуна при регулюванні зміною напруги, с^{-1} :

$$\omega = \omega_0 - \frac{M}{(K\Phi)^2} (R_{\text{я}} + R_n) = \frac{E_n}{K\Phi} - \frac{M}{(K\Phi)^2} (R_{\text{я}} + R_n).$$

При регулюванні кутової швидкості двигуна зменшенням магнітного потоку збільшується швидкість холостого ходу двигуна, зменшується жорсткість його штучної механічної характеристики. Введемо поняття відносного магнітного потоку двигуна при зменшенні струму збудження Φ^* . При ослабленому магнітному полі конструктивний коефіцієнт двигуна становитиме:

$$K\Phi_0 = \Phi^* \cdot K\Phi,$$

де $K\Phi$ – конструктивний коефіцієнт двигуна при номінальному струмі збудження, $\text{В} \cdot \text{с}$.

Швидкість холостого ходу при ослабленому магнітному полі, с^{-1} :

$$\omega_{0.0} = \frac{U_N}{K\Phi_0}.$$

Перепад швидкості при ослабленому полі й номінальному моменті двигуна:

$$\Delta\omega_0 = \frac{\omega_{0.0} - \omega_N}{K\Phi_0}, \text{с}^{-1}.$$

Кутова швидкість якоря при номінальному моменті й ослабленому полі, с^{-1} :

$$\omega_0 = \omega_{0.0} - \Delta\omega_0.$$

При шунтуванні кола якоря несуттєво падає жорсткість механічної характеристики двигуна. Кутова швидкість якоря двигуна визначиться по формулі, с^{-1} :

$$\omega = \omega_0 \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_{д}} - \frac{M}{(K\Phi)^2} \left(R_{я} + \frac{R_{ш}R_{д}}{R_{ш} + R_{д}} \right).$$

Завдання на самостійне опрацювання

Користуючись вихідними даними для розрахунку, наведеними в таблиці 3.2, побудувати природну механічну характеристику двигуна постійного струму із незалежним збудженням; штучні механічні характеристики аналогічного двигуна при регулюванні кутової швидкості в реостатний спосіб, а також імпульсним регулюванням опору при $\gamma=0,6$, а також при зміні напруги, що подається на коло якоря двигуна, при діапазоні регулювання $D=2$. Визначити: потрібний опір кола якоря при реостатному регулюванні, а також при імпульсному регулюванні додаткового опору при $\gamma=0,6$, які забезпечують діапазон регулювання $D=2$; опір шунта кола якоря, необхідний для збільшення діапазону регулювання до $D_1=3$, якщо додатковий опір кола якоря забезпечує діапазон реостатного регулювання $D=2$; потрібні ЕРС генератора, який працює в системі Г-Д, які забезпечують діапазони регулювання кутової швидкості двигуна $D=2$, $D_1=3$. Знайти статистичну похибку регулювання при використанні регулювання кутової швидкості двигуна за допомогою: додаткового опору в колі якоря, зміною напруги, що подається на двигун при діапазоні регулювання $D=2$; системи Г-Д при забезпеченні діапазонів регулювання $D=2$, $D_1=3$; зменшенням струму збудження на 40 % від його номінального значення.

Числові приклади розв'язку наведено в [1, с. 273-274, 277-279, 290-291].

Контрольні питання

1. В чому сутність статичних параметрів регулювання електроприводу? Назвіть відомі Вам статичні показники регулювання і надайте їм визначення.
2. В чому сутність динамічних параметрів регулювання електроприводу? Назвіть відомі динамічні показники регулювання і надайте їм визначення.
3. Як здійснюється регулювання швидкості двигунів у реостатний спосіб, зміною напруги живлення, магнітного потоку, шунтуванням кола якоря?

Таблиця 3.2 – Вихідні дані для виконання завдання

№	P_N , кВт	n_N	U_N , В	η_N
1	75	3500	440	0,925
2	75	1410	440	0,885
3	80	2800	440	0,888
4	75	1440	440	0,915
5	80	2800	220	0,891
6	80	2400	220	0,890
7	79	2250	440	0,890
8	80	1500	220	0,895
9	79	1000	440	0,884
10	80	1180	440	0,885

4. Від чого залежить кутова швидкість двигуна при регулюванні в реостатний спосіб, зміною напруги живлення, магнітного потоку, шунтуванням якоря?
5. Які переваги і недоліки регулювання швидкості двигуна у системі «генератор – двигун», в реостатний спосіб, зміною напруги живлення, зміною магнітного потоку, шунтуванням кола якоря?

4 ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4

Тема. Розрахунок характеристик регульованого електропривода

Мета. Ознайомитися із методикою визначення статичних і динамічних параметрів системи Г-Д і ТП-Д.

Завдання № 1 – Параметри системи Г-Д

Короткі теоретичні відомості

Для визначення тривалості перехідних процесів і параметрів регулювання швидкості в системі Г-Д розглядалися електричні машини постійного струму незалежного збудження. Зокрема, сталі часу

- двигуна:

$$T_{\partial\partial} = \frac{I_{\text{я}} R_{\text{я.}\partial}}{(K\Phi)^2}, \text{ с},$$

де $I_{\text{я}}$ – струм кола якоря двигуна, А; $R_{\text{я.}\partial}$ – опір кола якоря двигуна, А; $K\Phi$ – коефіцієнт ЕРС двигуна, В·с;

- генератора:

$$T_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{1000 P_{\text{н}}}{4 n_{\text{н}} p^2}}, \text{ с},$$

де $P_{\text{н}}$ – номінальна потужність генератора, кВт; $n_{\text{н}}$ – номінальна частота обертання генератора, хв.⁻¹; p – кількість пар полюсів генератора;

- обмотки збудження:

$$T_{\text{з}} = \frac{L_{\text{з}}}{R_{\text{з}}}, \text{ с},$$

де L_3 – індуктивність обмотки збудження, Гн; R_3 – опір обмотки збудження, Ом;

- вихрових струмів:

$$T_{вс} = \frac{L_3}{R_{вс}}, \text{ с},$$

де $R_{вс}$ – опір від вихрових струмів, Ом, $R_{вс} \approx 0,1R_3$;

- електромагнітна стала двигуна:

$$T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я}},$$

де $L_{я}$ – індуктивність кола якоря, Гн; $R_{я}$ – опір кола якоря;

- перетворювача: $T_{п} \approx 0,005$ с;

- робочої машини:

$$T_{м} = \frac{4JR_{я}}{375K_{м} \cdot K\Phi},$$

де J – момент інерції механізму, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; $K_{м}$ – коефіцієнт робочої машини.

Коефіцієнт затухання системи:

$$\xi = 0,5 \sqrt{\frac{T_{м}}{T_{я}}}.$$

Частота коливань системи:

$$\psi = \frac{\sqrt{1-\xi}}{T_{об}}, \text{ Гц}.$$

Розрахункові коефіцієнти

- генератора:

$$K_z = \frac{U_z}{U_{зб}},$$

де U_z – напруга кола якоря, В; U_z – напруга кола збудження генератора, В;

- системи керування:

$$K_k = \frac{U_z}{10};$$

- робочої машини:

$$K_m = \frac{1,03}{K\Phi};$$

- зворотного зв'язку:

$$K_m = \frac{10}{\omega_N},$$

де ω_N – номінальна кутова швидкість якоря двигуна, с^{-1} .

Зміна кутової швидкості двигуна в системі Г-Д при сигналі керування:

$$\omega(t) = \omega_0 \left[1 - e^{-\frac{\xi t}{T_{\text{ос}}}} \left(\cos \psi t + \frac{\xi}{T_{\text{ос}} \psi} \sin \psi t \right) \right].$$

Характер зміни моменту при збурювальній дії:

$$M(t) = M_c \left[1 - e^{-\frac{\xi t}{T_{\text{ос}}}} \left(\cos \psi t + \frac{\xi}{T_{\text{ос}} \psi} \sin \psi t \right) \right].$$

Завдання на самостійне опрацювання

За даними таблиці 4.1 визначити: сталі часу; потрібну напругу керування для забезпечення частоти обертання якоря двигуна $0,8n_N$, $0,6n_N$ і $0,4n_N$ при номінальному моменті двигуна; записати рівняння, що визначають характер зміни кутової швидкості та моменту на валу двигуна при збурювальній дії.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для виконання завдання

№	P_N , кВт	n_N	U_N , В	η_N	U_z , В	$R_{я,z}$, Ом	R_z , Ом	$L_{я,z}$, $10^{-3} \cdot \text{Гн}$	L_z , Гн
1	75	3500	440	0,925	100	0,016	25	0,4	4
2	75	1410	440	0,885	100	0,018	24	0,5	4,5
3	80	2800	440	0,888	120	0,017	23	0,5	5
4	75	1440	440	0,915	100	0,015	22	0,4	5,5
5	80	2800	220	0,891	100	0,018	23	0,4	6
6	80	2400	220	0,890	120	0,019	24	0,5	6,5
7	79	2250	440	0,890	120	0,017	25	0,5	6
8	80	1500	220	0,895	100	0,016	26	0,4	5,5
9	79	1000	440	0,884	100	0,015	25	0,4	5
10	80	1180	440	0,885	100	0,016	24	0,5	4,5

Завдання № 2 – Параметри системи ТП-Д

Короткі теоретичні відомості

Напівпровідниковий перетворювач електроенергії, яким є система «тиристорний перетворювач – двигун» (ТП-Д), є більш компактним та економічним способом регулювання кутової швидкості електроприводу постійного струму, ніж система Г-Д. Силкові напівпровідникові елементи – тиристори – виконують подвійну функцію: перетворюють напругу мережі живлення, придатною для живлення двигуна, і регулюють швидкість обертання якоря

двигуна. Вони здатні регулювати напругу і кутову швидкість якоря двигуна із високим коефіцієнтом корисної дії (бл. 97 %), плавно у певному діапазоні.

Перетворення енергії змінного струму в енергію постійного струму за допомогою системи ТП-Д може здійснюватися в безперервному режимі, а також у режимі переривчастих струмів. Вхідною величиною є напруга комутації U_k , що подається на тиристорний перетворювач; останній подає на електричний двигун напругу керування U_{np} , яка узгоджується із ЕРС двигуна $E_{\partial\partial}$, а струм якоря двигуна $I_{\text{я}}$ при цьому узгоджується зі струмом усталеного режиму I_c за кутової швидкості двигуна ω . Параметрами та динамічними характеристиками системи ТП-Д є некомпенсована стала часу перетворювача, електромагнітна та електромеханічна сталі часу двигуна, коефіцієнти передачі тиристорного перетворювача і двигуна, жорсткість механічної характеристики, коефіцієнт затухання системи тощо, фіктивний опір, робочі струми і напруги тощо.

Некомпенсована стала часу тиристорного перетворювача приймається рівною $T_{nm}=0,005$ с, або визначається по формулі:

$$T_{nm} \approx \frac{1}{2mf}, \text{ с,}$$

де m – пульсаційність перетворювача, для трифазної схеми перетворювача $m=3$, для мостової схеми – $m=3$; f – частота мережі живлення, Гц.

Електромагнітна стала часу двигуна:

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}, \text{ с,}$$

де $L_{\text{я}}$, $R_{\text{я}}$ – індуктивність та опір кола якоря,

$$L_{\text{я}} = 2L_{mp} + L_{\partial\partial}, \text{ Гн,}$$

$L_{mp}, L_{\partial\delta}$ – індуктивність трансформатора і обмотки якоря двигуна, відповідно,

$$L_{mp} = \frac{x_{mp}}{2\pi \cdot f};$$

$$R_{\text{я}} = r_{\text{я}} + r_{\partial.n} + 2r_{mp} + \frac{x_{mp}m}{\pi}, \text{ Ом},$$

r_{mp}, x_{mp} – активний і реактивний опір трансформатора,

$$r_{mp} = \frac{P_{\kappa 3}}{3I_{2H}^2}, \text{ Ом},$$

$P_{\kappa 3}$ – втрати потужності при короткому замиканні, Вт;

$$x_{mp} = \sqrt{z_{mp}^2 - r_{mp}^2}, \text{ Ом};$$

z_{mp} – повний опір трансформатора, Ом:

$$z_{mp} = \frac{U_{2л} U_{\kappa 3}}{100\sqrt{3}I_{2H}}, \text{ Ом},$$

$U_{2л}$ – номінальна напруга на вторинній обмотці трансформатора, В; $U_{\kappa 3}$ – напруга короткого замикання трансформатора, %; I_{2H} – номінальний струм вторинної обмотки трансформатора, А; $r_{\text{я}}$ – опір якоря двигуна, Ом; $r_{\partial n}$ – опір від додаткових полюсів, Ом.

Електромеханічна стала часу двигуна:

$$T_{\text{м}} = \frac{(J_{\partial\delta} + J_{\text{м}})R_{\text{я}}}{(K\Phi)^2}, \text{ с},$$

де $J_{\partial\theta}$, J_M – моменти інерції якоря двигуна і виробничого механізму, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; $K\Phi$ – конструктивний коефіцієнт ЕРС двигуна, $\text{В}\cdot\text{с}$.

Стала часу двигуна:

$$T_{\partial\theta} = \sqrt{T_{\text{я}} T_M}, \text{ с.}$$

Коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача:

$$K_{nt} = \frac{2K_{cx} U_{2л}}{\sqrt{3} U_{оп.м}},$$

де K_{cx} – кратність ЕРС двигуна; $U_{оп.м}$ – амплітуда опорної напруги, В.

Коефіцієнт передачі двигуна:

$$K_{\partial\theta} = (K\Phi)^{-1}.$$

Коефіцієнт затухання системи:

$$\xi = 0,5 \sqrt{\frac{T_M}{T_{\text{я}}}}.$$

Жорсткість механічної характеристики двигуна:

$$\beta = \frac{(K\Phi)^2}{R_{\text{я}}}, \text{ А}\cdot\text{с.}$$

Максимальний граничний струм якоря:

$$I_{\text{я.гп}} = \frac{1,35 U_{2л} \sin \alpha}{2\pi \cdot f \cdot L_{\text{я}}} \left(1 - \frac{\pi}{m} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{m} \right), \text{ А,}$$

де α – кут керування тиристорів.

Швидкість ідеального холостого ходу:

$$\omega_0 = \frac{1,41U_{2л} \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{m}\right)}{K\Phi}, \text{ с}^{-1}.$$

Кутова швидкість двигуна:

$$\omega = \frac{1,35U_{2л} \cos \alpha - I_{я.зр} R_{я}}{K\Phi}.$$

При $\alpha=90^\circ$ $\omega=0$.

Фіктивний опір від комутації тиристорами:

$$R_{\phi} = \frac{(\omega_0 - \omega)K\Phi}{I_{я.зр}}.$$

Зміна кутової швидкості двигуна в системі ТП-Д при сигналі керування:

$$\omega(t) = \omega(0) \left[1 - e^{-\frac{\xi t}{T_{\text{дс}}}} \left(\cos \psi t + \frac{\xi}{T_{\text{дс}} \psi} \sin \psi t \right) \right],$$

де $\omega(0)$ – швидкість двигуна на початку регулювання, с^{-1} ; ψ – частота коливань системи при регулюванні,

$$\psi = \frac{\sqrt{1 - \xi}}{T_{\text{дс}}}, \text{ Гц.}$$

Характер зміни моменту при збурювальній дії:

$$M(t) = M(0) \left[1 - e^{-\frac{\xi t}{T_{\text{об}}}} \left(\cos \psi t + \frac{\xi}{T_{\text{об}} \psi} \sin \psi t \right) \right],$$

де $M(0)$ – момент на валу якоря двигуна на початку регулювання, Н·м,

$$M(0) = I(0) \cdot K\Phi,$$

$I(0)$ – струм двигуна на початку його регулювання, А.

Завдання на самостійне опрацювання

Провести розрахунок сталих часу і передавальних коефіцієнтів електроприводу системи ТП-Д і визначити максимальний граничний струм, кутову швидкість холостого ходу і робочого режиму, а також фіктивний опір для такого регулювання при куті регулювання 30° і 60° . Записати закономірності зміни кутової швидкості та моменту двигуна при його регулюванні системою ТП-Д, якщо момент на початку регулювання дорівнює номінальному моменту двигуна, а кутова швидкість – розрахунковим значенням кутової швидкості робочого режиму. Дані електродвигуна наведені в таблиці 4.2. Тиристорний перетворювач виконаний за мостовою схемою і підключений до трансформатора, що дає номінальну напругу на вторинній обмотці $U_{2\pi} \approx U_n$, потужність – 100 кВ·А, напруга короткого замикання – 4 %, потужність короткого замикання – 1970 Вт. Опір додаткових полюсів двигуна – 60 % від опору обмотки якоря. Числовий приклад завдання наведений в [1, с. 316-319].

Контрольні питання

1. Які параметри двигуна і виробничого механізму впливають на структуру і параметри системи регулювання Г-Д і ТП-Д?
2. Надайте визначення сталих часу генератора, двигуна, перетворювача, обмотки збудження, вихрових струмів, машини, електромагнітної сталої двигуна.

Таблиця 4.2 – Вихідні дані для розрахунку

№	P_N , кВт	n_n	U_n , В	η_n	$r_{я}$, Ом	$L_{я}$, $10^{-3} \cdot \text{Гн}$	$J_{\partial\partial} + J_M$, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$
1	75	3500	440	0,925	0,016	0,4	0,50
2	75	1410	440	0,885	0,018	0,5	0,70
3	80	2800	440	0,888	0,017	0,5	0,60
4	75	1440	440	0,915	0,015	0,4	0,65
5	80	2800	220	0,891	0,018	0,4	0,55
6	80	2400	220	0,890	0,019	0,5	0,45
7	79	2250	440	0,890	0,017	0,5	0,75
8	80	1500	220	0,895	0,016	0,4	0,50
9	79	1000	440	0,884	0,015	0,4	0,70
10	80	1180	440	0,885	0,016	0,5	0,60

3. Що таке коефіцієнт затухання системи «генератор – двигун» («тиристорний перетворювач – двигун»), і на які показники регулювання він впливає?
4. Від яких параметрів електродвигуна і виробничого механізму залежить значення швидкості обертання двигуна при її регулюванні в системі «генератор – двигун» і «тиристорний перетворювач – двигун»?
5. Який характер зміни кутової швидкості та моменту на валу якоря двигуна при його регулюванні в системі «генератор – двигун» і «тиристорний перетворювач – двигун»?

5 ПРАКТИЧНА РОБОТА № 5

Тема. Розрахунок енергетичних показників роботи електроприводу

Мета. Ознайомитися із методикою визначення коефіцієнту корисної дії електроприводу, абсолютних та питомих витрат енергії на функціонування виробничого механізму з електроприводом

Завдання № 1. Енергетичні показники роботи нерегульованого приводу

Короткі теоретичні відомості

Основним показником, який визначає енергетичну ефективність будь-якого технічного об'єкту, є його коефіцієнт корисної дії (к.к.д.), - відношення корисної роботи технічного об'єкту до роботи, яку слід витратити ззовні для функціонування даного об'єкту в усталеному режимі його роботи. Для виробничого механізму із електроприводом його загальний к.к.д. визначиться по формулі:

$$\eta = \eta_{\text{ем}} \eta_{\text{рш}} \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{мч}} \eta_{\text{мех}},$$

де $\eta_{\text{ем}}$ – к.к.д. електричної мережі; $\eta_{\text{рш}}$ – к.к.д. регулятора (-ів) швидкості; $\eta_{\text{дв}}$ – к.к.д. електричного (-их) двигуна (-ів); $\eta_{\text{мч}}$ – к.к.д. механічної частини приводу; $\eta_{\text{мех}}$ – к.к.д. виробничого механізму.

Всі перелічені вище часткові к.к.д. вказаної технічної системи залежать від ступеню завантаженості виробничого механізму та швидкості руху його виконавчого елемента, схеми комплектування машини.

К.к.д. виробничого механізму залежить від його завантаженості та ураховує негативний вплив параметрів холостого ходу механізму на енергетичну ефективність його роботи в усталеному режимі,

$$\eta_{\text{мех}} \approx \frac{M_p - M_{\text{хх}}}{M_p},$$

де M_p , M_{xx} – к.к.д. виробничого механізму в робочому режимі та на холостому ході, відповідно.

Таким чином, на холостому ході, коли машиною не виконується корисна робота, к.к.д. виробничого механізму дорівнює нулю. Чим більшою є завантаженість виробничого механізму, тим більший його к.к.д.

У випадку використання нерегульованого приводу, к.к.д. електродвигуна можна визначити по формулі:

$$\eta_{дв} = \frac{K_3}{K_3 + (a + K_3^2) \frac{\Delta P_{vN}}{P_N}}$$

де K_3 – коефіцієнт завантаженості електродвигуна; a – відношення постійних і змінних втрат потужності двигуна, для двигунів малої та середньої потужності $a=0,5 \dots 1$, для потужних двигунів $a=1,5$; ΔP_{vN} – номінальні змінні втрати двигуна, для двигунів постійного струму становлять, Вт:

$$\Delta P_{vN} = I_N^2 R_{я},$$

I_N – номінальний струм кола якоря, А; $R_{я}$ – опір кола якоря, Ом;

для асинхронних двигунів:

$$\Delta P_{vN} = I_{1N}^2 (R_1 + \sigma_n^2 R_2'), \text{ Вт,}$$

I_{1N} – номінальний струм статора, А; R_1 , R_2' – опір обмотки статора і приведений опір обмотки ротора, відповідно, Ом; σ_n – відношення приведенного номінального струму ротора і струму статора, $\sigma_n=0,85 \dots 0,95$; P_N – номінальна потужність двигуна.

Абсолютні витрати енергії на роботу виробничого механізму визначаються:

$$E = P_1 t,$$

де t – час функціонування виробничого механізму.

Питомі витрати енергії на роботу виробничого механізму визначаються як

$$W = \frac{P_1}{Q_1}, \text{ кВт} \cdot \text{год.}/\text{т},$$

де Q_1 – продуктивність виробничого механізму в заданому режимі роботи.

Навантаження на валу двигуна у більшості механізмів їх продуктивність є випадковою функцією часу. Режим завантаженості виробничого механізму суттєво впливає на енергетичні показники електроприводу. Нерівномірність

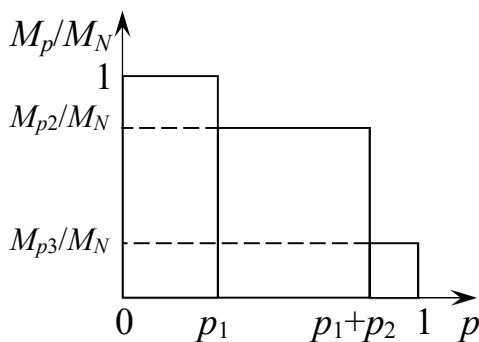


Рисунок 5.1 – Приклад діаграми навантаження виробничого механізму

навантаження на виконавчому елементі механізму можна враховувати діаграмою навантаження (рис. 5.1). По осі абсцис даної діаграми відкладається імовірність роботи механізму в означеному режимі із навантаженням, відносно значення якого відкладається по осі ординат. Імовірність роботи механізму в тому чи іншому режимі p_k визначається відношенням часу функціонування механізму в означеному

режимі t_k до повного часу функціонування виробничого механізму t .

Визначення к.к.д., абсолютних і питомих витрат енергії на функціонування виробничого механізму здійснюється із урахуванням імовірності роботи механізму в тому чи іншому режимі. Загальні к.к.д., абсолютні й питомі витрати енергії визначаються як математичне очікування відповідних величин.

К.к.д. нерегульованого електродвигуна, який працює в режимі роботи зі змінним навантаженням, визначиться по формулі:

$$\eta_{\text{дв}} = \sum_{k=1}^m \frac{K_{3k} p_k}{K_{3k} + (a + K_{3k}^2) \frac{\Delta P_{vN}}{P_N}}$$

$$K_{3k} = \frac{M_{p1k}}{M_N},$$

$$M_{p1k} = \frac{M_{pk}}{\eta_{мч}}.$$

m – кількість характерних режимів роботи механізму із k -м навантаженням.

Абсолютні E та питомі W витрати енергії для механізму зі змінним навантаженням:

$$E = t \sum_{k=1}^m P_{1k} p_k, \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

$$W = \sum_{k=1}^m \frac{P_{1k} p_k}{Q_k}, \text{ кВт} \cdot \text{год./т.}$$

Завдання на самостійне опрацювання

Виробничий механізм працює зі змінним навантаженням у двох характерних режимах, характеристика яких наведена в табл. 5.1. Навантаження $M_1=M_N$, $Q_1=Q_{\max}$. Порівняти к.к.д., абсолютні та питомі енергетичні витрати механізму із електроприводом з двигунами постійного струму й асинхронними двигунами. Характеристика двигунів наведені в табл. 5.2 і 5.3. Зробити висновок щодо доцільності використання типу двигунів для приводу виробничого механізму.

Числовий приклад завдання наведений в додатку Б.

Таблиця 5.1 – Характеристика робочого режиму
виробничого механізму

№ з/п	$M_{p2}/$ M_N	$M_{p3}/$ M_N	$Q_{\max},$ т/год.	$Q_2/$ $Q_{\max}$	$Q_3/$ $Q_{\max}$	Імовірності навантаження, режим №1			Імовірності навантаження, режим № 2		
						p_1	p_2	p_3	p_1	p_2	p_3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,8	0,4	20	0,75	0,38	0,3	0,2	0,5	0,1	0,2	0,7

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	0,7	0,5	30	0,65	0,46	0,5	0,2	0,3	0,2	0,3	0,5
3	0,7	0,4	40	0,75	0,37	0,4	0,4	0,2	0,3	0,2	0,5
4	0,6	0,4	50	0,55	0,37	0,2	0,4	0,4	0,2	0,3	0,5
5	0,6	0,5	40	0,50	0,40	0,4	0,2	0,4	0,1	0,2	0,7
6	0,9	0,4	30	0,80	0,35	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3	0,5
7	0,9	0,5	20	0,85	0,45	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,5
8	0,5	0,4	30	0,45	0,36	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,6
9	0,7	0,3	40	0,65	0,26	0,2	0,3	0,5	0,1	0,2	0,7
10	0,6	0,3	50	0,55	0,24	0,3	0,5	0,2	0,2	0,3	0,5

Таблиця 5.2 – Технічна характеристика
двигуна постійного струму

№	P_N , кВт	U_N , В	I_N , А	$R_{я}$, Ом
1	75	440	170	0,016
2	75	440	175	0,018
3	80	440	186	0,017
4	75	440	173	0,015
5	80	220	378	0,018
6	80	220	391	0,019
7	79	440	180	0,017
8	80	220	384	0,016
9	79	440	182	0,015
10	80	440	171	0,016

Завдання № 2. Доцільність заміни недовантаженого електродвигуна

Короткі теоретичні відомості

Недовантажений до номінальної потужності (або близької до неї) двигун є джерелом непродуктивних витрат енергії, яка споживається з електричної мере-

Таблиця 5.3 – Технічна характеристика
асинхронного двигуна

№	P_N , кВт	I_{1N} , А	R_1 , Ом	R_2' , Ом
1	75	114	0,16	0,051
2	75	115	0,18	0,049
3	80	126	0,17	0,054
4	75	113	0,15	0,050
5	80	128	0,18	0,053
6	80	121	0,19	0,052
7	79	120	0,17	0,048
8	80	124	0,16	0,055
9	79	119	0,15	0,047
10	80	121	0,16	0,056

жі, що призводить до зростання абсолютної та питомої енергоємності виробничого механізму, а також підвищених реактивних струмів у мережі, що спонукає збільшувати переріз дротів або кабелів мережі електропостачання.

Вважається, що коли двигун завантажений менш ніж на 45 %, його заміна на менш потужний аналог є доцільною, якщо завантажений на 70 % і більше – не доцільною, а при завантаженні 45-70 % доцільність заміни має перевірятися спеціальним розрахунком. У випадку доцільності заміни двигуна та змінного навантаження на виробничому механізмі із електроприводом, розрахунок із доцільності заміни має бути із обов'язковою перевіркою знову обраного двигуна на його перевантажувальну здатність.

У випадку постійного навантаження на виробничому механізмі заміна двигуна є доцільною, якщо виконується умова:

$$\frac{1 - \eta_1}{\eta_1} + K_e \frac{\operatorname{tg} \varphi_1}{\eta_1} > \frac{1 - \eta_2}{\eta_2} + K_e \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\eta_2},$$

де η_1, η_2 – к.к.д. робочого режиму недовантаженого, а також пропонованого двигуна меншої потужності, відповідно; $\operatorname{tg}\varphi_1, \operatorname{tg}\varphi_2$ – коефіцієнти потужності в робочому режимі недовантаженого, а також пропонованого двигуна меншої потужності, відповідно; K_e – економічний еквівалент реактивної потужності.

К.к.д. і потужності двигуна залежать від завантаження останнього в базовому і пропонованому варіантах, і можуть бути представлені як добуток к.к.д. або потужності в номінальному режимі роботи двигуна на відповідний коефіцієнт K_η або K_φ [1, с. 488]. Завантаження двигуна оцінюється коефіцієнтом $K_3=P/P_N$, якому відповідають коефіцієнти K_η і K_φ у відповідному режимі роботи:

$$\begin{aligned}\eta_1 &= K_{\eta 1} \eta_{H1}, \\ \cos\varphi_1 &= K_{\varphi 1} \cos\varphi_{H1}, \\ \eta_2 &= K_{\eta 1} \eta_{H2}, \\ \cos\varphi_2 &= K_{\varphi 1} \cos\varphi_{H2},\end{aligned}$$

Потужність двигуна з постійним навантаженням на виробничому механізмі в запропонованому варіанті слід обирати за умовою:

$$P_2 \geq P_1 K_{31}, \text{ Вт.}$$

У випадку змінного навантаження на виробничому механізмі, яке представлене діаграмою навантаження, заміна двигуна є доцільною, якщо виконується умова:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{1 - \eta_{1i}}{\eta_{1i}} + K_e \frac{\operatorname{tg}\varphi_{1i}}{\eta_{1i}} \right) p_i > \sum_{i=1}^n \left(\frac{1 - \eta_{2i}}{\eta_{2i}} + K_e \frac{\operatorname{tg}\varphi_{2i}}{\eta_{2i}} \right) p_i,$$

де i – індекс характерного навантаження на виробничому механізмі; n – кількість характерних навантажень на виробничому механізмі; p_i – імовірність виникнення i -го навантаження на виробничому механізмі.

У випадку тривалого функціонування виробничого механізму, потужність двигуна зі змінним навантаженням на виробничому механізмі в запропонованому варіанті слід обирати за середнім навантаженням:

$$P_2 \geq \sum_{i=1}^n P_i p_i, \text{ Вт},$$

де P_i – потужності характерних навантажень на виробничому механізмі, Вт.

Обраний двигун перевіряється на перевантажувальну здатність за умовою:

$$\gamma = \frac{P_{\max}}{P_2} \leq \gamma_{\text{доп}},$$

де $P_{\max}$ – максимальна потужність, яку розвиває привод виробничого механізму протягом часу його функціонування; $\gamma_{\text{доп}}$ – перевантажувальна здатність двигуна, яка оцінюється відношенням максимального допустимого моменту за час роботи двигуна до номінального моменту на його валу. Для асинхронних двигунів $\gamma_{\text{доп}} = (1,6 \dots 2,0)$.

Якщо остання умова не виконується, то двигун зі зниженою потужністю остаточно обирається за умовою:

$$P_2 = \frac{P_{\max}}{\gamma_{\text{доп}}}.$$

Завдання на самостійне опрацювання

За заданою потужністю двигуна виробничого механізму в базовому варіанті, а також даними діаграми навантажень виробничого механізму (таблиця 5.5) визначити доцільність і можливість заміни недовантаженого базового двигуна менш потужним. Обрати двигун для раціонального варіанту електроприводу. Економічний еквівалент реактивної потужності призначити 0,125 кВт/квар. Числовий приклад наведено в [1, с. 488].

Таблиця 5.5 – Дані до завдання для самостійного опрацювання

№	P_N , кВт	Відносне навантаження на виробничому механізмі			Імовірність виникнення відносного на- вантаження на виробничому механізмі		
		P_1/P_N	P_2/P_N	P_3/P_N	p_1	p_2	p_3
1	110	0,6	0,4	0,1	0,3	0,3	0,4
2	220	0,5	0,4	0,2	0,4	0,3	0,3
3	180	0,5	0,3	0,2	0,3	0,4	0,3
4	32	0,6	0,3	0,2	0,5	0,2	0,3
5	55	0,6	0,3	0,1	0,3	0,2	0,5
6	63	0,6	0,4	0,2	0,2	0,3	0,5
7	320	0,5	0,4	0,1	0,2	0,5	0,3
8	500	0,5	0,2	0,1	0,4	0,1	0,5
9	110	0,6	0,5	0,1	0,4	0,5	0,1
10	320	0,6	0,3	0,2	0,4	0,4	0,2

Контрольні питання

1. В чому сутність параметру «коефіцієнт корисної дії машини»?
2. Яким чином знаходиться загальний коефіцієнт корисної дії машини?
3. Що впливає на к.к.д. двигуна постійного струму й асинхронного двигуна?
4. Яким чином параметри холостого ходу виробничого механізму впливають на його коефіцієнт корисної дії?
5. В чому відмінність абсолютних витрат енергії на функціонування машини від питомих витрат енергії?
6. Коли доцільно замінити електродвигун на двигун меншої потужності?
7. Яким чином розраховуються абсолютні та питомі витрати енергії на функціонування машини, яка в процесі роботи має змінне навантаження?
8. В чому сутність перевірки двигуна на його перевантажувальну здатність?
9. Які критерії вибору раціонального типу електроприводу з точки зору мінімізації енергоспоживання на функціонування машини?

6 ПРАКТИЧНА РОБОТА № 6

Тема. Побудова діаграм навантаження та вибір двигуна за потужністю для різних за тривалістю режимів роботи

Мета. Засвоєння методики вибору двигуна зі змінним навантаженням в різних режимах роботи.

Завдання № 1. Побудова діаграм навантаження електроприводу

Короткі теоретичні відомості

Діаграми навантаження електроприводу – це графіки залежності швидкості вихідної ланки та обертового моменту двигуна виробничого механізму за цикл роботи виробничого механізму із електроприводом. Додатково можуть будуватися графіки прискорення вихідної ланки, обертові моменту на вихідній ланці електроприводу тощо.

Цикл роботи виробничого механізму складається із часу роботи електроприводу в різних режимах і паузи. Для кожного типу виробничого механізму характерним є цикл роботи із певною структурою і тривалістю періодів роботи і пауз.

Для побудови діаграм навантаження електроприводу мостового крану розраховують вказані нижче параметри.

Час пуску t_n і гальмування t_z :

$$t_n = t_z = v_{pm} / a_{don}, \text{ с,}$$

де v_{pm} – швидкість робочого механізму в усталеному режимі, м/с; a_{don} – допустиме прискорення і уповільнення робочого механізму, м/с².

Шлях, пройдений за час пуску s_n і гальмування s_z :

$$s_n = s_z = 0,5 a_{don} t_n^2, \text{ м.}$$

Шлях s_y , пройдений із усталеною швидкістю:

$$s_y = s - 2s_n, \text{ м,}$$

де s – загальний шлях, пройдений виробничим механізмом.

Час руху із усталеною швидкістю:

$$t_y = s_y / v_{pm}, \text{ с.}$$

Допустиме прискорення кутове електроприводу ε_{np} :

$$\varepsilon_{np} = 2ia_{don}/D_k, \text{ рад/с}^2,$$

де i – передавальне число редуктора (коробки передач тощо); D_k – діаметр колісної пари механізму по колу катання, м.

Зведений до валу двигуна статичний момент опору M_{c1} під час руху виробничого механізму з вантажем:

$$M_{c1} = M_1 / (i\eta), \text{ Н}\cdot\text{м,}$$

де M_1 – обертовий момент на валу виробничого механізму із вантажем, Н·м; η – коефіцієнт корисної дії передач.

Зведений до валу двигуна статичний момент опору M_{c2} під час руху виробничого механізму без вантажу:

$$M_{c2} = M_2 / (i\eta), \text{ Н}\cdot\text{м,}$$

де M_2 – обертовий момент на валу виробничого механізму без вантажу, Н·м.

Динамічний момент $M_{дин1}$ при пуску і гальмуванні електроприводу виробничого механізму із вантажем:

$$M_{дин1}=J_1\varepsilon_{np}, \text{ Н}\cdot\text{м},$$

де J_1 – приведений до валу двигуна момент інерції виробничого механізму із вантажем, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$.

Динамічний момент $M_{дин2}$ при пуску і гальмуванні електроприводу виробничого механізму без вантажу:

$$M_{дин2}=J_2\varepsilon_{np}, \text{ Н}\cdot\text{м},$$

де J_2 – приведений до валу двигуна момент інерції виробничого механізму без вантажу, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$.

Момент на валу двигуна M_{n1} при пуску виробничого механізму з вантажем:

$$M_{n1}=M_{c1}+M_{дин1}, \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Момент на валу двигуна M_{n2} при пуску виробничого механізму без вантажу:

$$M_{n2}=M_{c2}+M_{дин2}, \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Момент на валу двигуна M_{c1} при гальмуванні виробничого механізму з вантажем:

$$M_{c1}=M_{c1}-M_{дин1}, \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Момент на валу двигуна M_{c2} при гальмуванні механізму без вантажу:

$$M_{c2}=M_{c2}-M_{дин2}, \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Завдання на самостійне опрацювання

Побудувати навантажувальну діаграму двигуна за цикл роботи механізму пересування моста крана, робочий цикл якого наведені на рис. 6.1. Цикл роботи включає: переміщення з вантажем на відстань $s=25$ м, пауза, переміщення без

вантажу, пауза. Діаметр ходових коліс, $D_k=0,8$ м; коефіцієнт корисної дії передавального пристрою механізму $\eta=0,88$. Інші вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 6.1. Числовий приклад – в [1, с. 537-540].

Таблиця 6.1 – Вихідні дані для побудування діаграми навантаження електроприводу мостового крану

варіант	v (м/с)	a (м/с ²)	i	M_{pm1} (Н·м)	M_{pm2} (Н·м)	$J1$ (кг·м ²)	$J2$ (кг·м ²)
1	1,6	0,4	12	3200	2300	20	17,2
2	1,7	0,35	14	3400	2200	21	16,1
3	1,8	0,5	15	3100	2150	21,5	15,8
4	1,5	0,45	16	3300	2100	22	17,3
5	1,4	0,4	11	3500	2350	22,5	16,5
6	1,6	0,35	13	3600	2400	20	15,5
7	1,7	0,5	12	3250	2000	21	16,3
8	1,8	0,45	14	3350	2300	21,5	17,2
9	1,5	0,4	15	3200	2400	22	16,1
10	1,4	0,35	16	3400	2150	22,5	15,8

Завдання № 2. Вибір електродвигуна за заданою діаграмою навантаження

Короткі теоретичні відомості

Діаграма навантаження для двигуна приводу механізму в табличному вигляді містить: P_i – потужність, що розвивається двигуном в i -му режимі навантаження, кВт; t_i – тривалість роботи двигуна в i -му режимі, с.

Середня розрахункова потужність на валу двигуна:

$$P_{cp} = (1,1 \dots 1,3) \frac{\sum_{i=1}^n P_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}.$$

За умовою $P_n \geq P_{cp}$, де P_n – номінальна потужність двигуна, кВт, обираємо двигун і записуємо його технічну характеристику: параметри номінального режиму (частота обертання n_n , хв.⁻¹, обертовий момент M_n , коефіцієнт корисної

дії η_n), кратність пускового M_n^* і критичного M_{κ}^* моменту, допустиму температуру нагрівання ізоляції τ , $^{\circ}\text{C}$, момент інерції J_p , $\text{кг}\cdot\text{м}^2$, або маховий момент GD_p^2 , $\text{Н}\cdot\text{м}^2$, ротора двигуна, $J_p=0,25 GD_p^2/g$.

Перевіряється обраний двигун на нагрівання за фактором середніх втрат потужності, які визначаються по формулі:

$$\Delta P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i},$$

де ΔP_i – втрати потужності в i -му режимі навантаження двигуна, кВт:

$$\Delta P_i = P_i(1-\eta_i)/\eta_i, \text{ кВт},$$

η_i – коефіцієнт корисної дії двигуна в i -му режимі навантаження.

Номінальні втрати потужності у двигуні:

$$\Delta P_n = P_n(1-\eta_n)/\eta_n, \text{ кВт}.$$

За умовою $\Delta P_n \geq \Delta P_{cp}$ визначають відсутність перегріву двигуна за втратами потужності. Якщо умова не виконується, обирають двигун із більшою потужністю.

Перевіряється обраний двигун на нагрівання за фактором еквівалентної (середньоквадратичної) потужності, яка визначається по формулі:

$$P_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}.$$

За умовою $P_n \geq P_e$ визначають відсутність перегрівання двигуна за фактором еквівалентної потужності. Якщо умова не виконується, слід обрати двигун із найближчою більшою потужністю.

Перевірка двигуна на можливість пуску здійснюється за пусковим моментом двигуна при зниженій напрузі живлення:

$$M_n = K_u^2 M_n M_n^*, \text{ Н}\cdot\text{м},$$

де K_u – коефіцієнт зниження напруги при пуску виробничого механізму, за відсутності даних приймається $K_u = 0,8$.

За умовою $M_n \geq M_{c0}$, де M_{c0} – момент зрушення робочої машини, визначають можливість пуску машини при зниженій напрузі. Якщо умова не виконується, обирають двигун із більшою потужністю.

Перевіряється обраний двигун на перевантажувальну здатність за максимальним моментом, що розвивається при пониженій напрузі живлення:

$$M_{\max} = K_{up}^2 M_n M_n^*, \text{ Н}\cdot\text{м},$$

де K_{up} – коефіцієнт зниження напруги при усталеній роботі виробничого механізму, за відсутності даних приймається $K_u = 0,95$.

За умовою $M_{c.\max} \geq M_{\max}$, де $M_{c.\max}$ – максимальний статичний момент навантаження на валу двигуна, робиться висновок про відсутність критичних перевантажень двигуна. Якщо умова не виконується, обирають двигун із більшою потужністю.

Завдання на самостійне опрацювання

Використовуючи вихідні дані, наведені в таблиці 6.2, а також методику вибору і перевірки двигуна робочої машини на нагрівання, перевірити можливість використання наявного двигуна в заданих умовах. Надати рекомендації із заміни двигуна, якщо використання базового варіанту двигуна в даних умовах неможлива.

Числовий приклад розв'язання завдання знаходиться в [2, с. 334-335].

Таблиця 6.2 – Вихідні дані для розрахунку

№	Характеристика двигуна					Характеристика навантаження						$M_{с0},$ Н·м	$J_p,$ кг·м ²	$K_{Упуск}$	$K_{Уроб}$
	$P_N,$ кВт	η_N	$n_N,$ хв. ⁻¹	$M_{п}^*$	$M_{кр}^*$	$P_1,$ кВт	$P_2,$ кВт	$P_3,$ кВт	$t_1,$ год.	$t_2,$ год.	$t_3,$ год.				
1	5,5	0,85	1440	2,5	2,8	3	4	6	10	15	25	60	0,021	0,81	0,95
2	7,5	0,86	1450	2,6	2,9	4	5	8	15	20	25	63	0,022	0,83	0,96
3	5,5	0,87	1445	2,7	3,0	3	4	6	10	20	25	65	0,023	0,85	0,97
4	7,5	0,88	1435	2,6	2,9	4	5	9	10	15	20	61	0,024	0,87	0,96
5	5,5	0,89	1440	2,5	2,8	3	4	6	15	20	25	67	0,025	0,89	0,95
6	7,5	0,88	1450	2,6	2,9	4	6	8	10	15	25	69	0,026	0,87	0,96
7	5,5	0,87	1435	2,7	3,0	3	4	6	10	15	20	62	0,027	0,85	0,97
8	7,5	0,86	1445	2,6	2,9	4	7	9	15	20	25	64	0,028	0,83	0,96
9	7,5	0,85	1440	2,5	2,8	4	6	9	10	15	25	66	0,029	0,81	0,97
10	5,5	0,86	1445	2,6	2,9	3	4	6	10	20	25	68	0,020	0,83	0,96

Контрольні питання

1. З яких характерних ділянок складається діаграма навантаження двигуна електроприводу виробничого механізму?
2. Яким чином визначається обертовий момент на валу двигуна електроприводу робочої машини на різних характерних ділянках діаграми навантаження?
3. Як визначається час пуску і гальмування виробничого механізму?
4. Наведіть умову попереднього вибору двигуна для електроприводу робочої машини, для якої характерним є змінне навантаження.
5. Що передбачає методика перевірки двигуна на нагрівання? Якою є умова забезпечення пуску виробничого механізму з електроприводом? Якою є умова перевірки двигуна приводу робочої машини на перевантажувальну здатність?

7 ПРАКТИЧНА РОБОТА № 7

Тема. Розрахунок кривих нагрівання та охолодження двигунів

Мета. Навчитися визначати температуру обмоток електродвигуна при його тривалій роботі в різних режимах зі змінним навантаженням, а також часу охолодження двигуна після його тривалої роботи.

Короткі теоретичні відомості

Особливістю роботи електричного двигуна є нагрівання його складових частин внаслідок виділення тепла при проходженні електричного струму в обмотках, втрат в магнітопроводі, тертя в підшипниках і т.д. Інтенсивність виділення тепла залежить від режиму роботи двигуна, його конструктивних параметрів і правильності монтажу, способу тепловідведення, зовнішніх умов тощо. Задля безаварійної роботи, нагрітий двигун має охолоджуватися за час пауз в роботі виробничого механізму. Графік зміни із плином часу температури складових частин двигуна під час функціонування в характерному для виробничого механізму режимі роботи називається кривою нагрівання. Під час роботи виробничого механізму з електроприводом можливе як збільшення, так і зменшення температури двигуна. Графік зміни із плином часу температури складових частин двигуна під час пауз в роботі виробничого механізму або його технологічного простою називається кривою охолодження. Для процесу охолодження двигуна характерне зменшення температури його складових частин. Головними параметрами для розрахунку і побудови кривої нагрівання є втрати потужності двигуна, його тепловіддача, а також стала нагрівання двигуна.

Середні втрати потужності двигуна при його роботі із навантаженням P_i :

$$\Delta P_i = \frac{P_n(1 - \eta_n)}{\eta_n} \frac{\alpha + K_3^2}{\alpha + 1}, \text{ кВт},$$

де P_n – номінальна потужність двигуна, кВт; η_n – номінальний к.к.д. двигуна; α –

відношення постійних втрат потужності двигуна до змінних, $\alpha=(0,5\dots1,5)$; K_3 – коефіцієнт перевантаженості двигуна, $K_3=P_i/P_n$.

Постійна часу нагрівання двигуна визначиться по формулі:

$$T_n = \frac{c_0 m \tau_n \eta_n}{P_n (1 - \eta_n)}, \text{ с,}$$

де c_0 – питома теплоємність матеріалу двигуна; m – маса двигуна, кг; τ_n – номінальне перевищення температури обмотки статора.

Стале підвищення температури для i -го режиму навантаження двигуна:

$$\tau_{yi} = \frac{\Delta P_i}{A}, \text{ } ^\circ\text{C,}$$

де A – тепловіддача двигуна, кВт/ $^\circ\text{C}$:

$$A = \frac{P_n (1 - \eta_n)}{\eta_n \tau_n}.$$

Перевищення температури двигуна наприкінці i -го періоду навантаження:

$$\tau_i = \tau_{0i} (\tau_{yi} - \tau_{0i}) \left(1 - e^{-\frac{t_i}{T_n}} \right), \text{ } ^\circ\text{C,}$$

де τ_{0i} – початкове перевищення температури на i -й ділянці кривої нагрівання, $^\circ\text{C}$;

t_i – тривалість i -го періоду навантаження приводу потужністю P_i , хв.

Для розрахунку кривої нагрівання приймається $\tau_{01}=0$, $\tau_{02}=\tau_1$ і т.д.

Стала охолодження двигуна, с:

$$T_o = T_n / \beta,$$

де β – коефіцієнт, що ураховує погіршення охолодження двигунів.

Зниження температури двигуна на j -м відрізку кривої охолодження, $^{\circ}\text{C}$:

$$\tau_j = \tau_{0j} e^{-\frac{t_j}{T_o}},$$

де τ_{0j} – початкове перевищення температури на j -й ділянці кривої охолодження, $^{\circ}\text{C}$; t_j – тривалість j -го періоду паузи, приймається $t_j = jT_o$, $j=1,2,\dots,m$, де m – кількість інтервалів кривої охолодження, приймається $m \geq 4$.

Для розрахунку кривої охолодження приймається $\tau_{01} = \tau_n$, де τ_n – перевищення температури двигуна наприкінці останнього періоду нагрівання, $^{\circ}\text{C}$; $\tau_{02} = \tau_1$ і т.д.

Завдання на самостійне опрацювання

1. Побудувати криві нагрівання та охолодження двигуна, сумістивши їх із заданою діаграмою навантаження механізму. Температура двигуна до його включення дорівнює температурі навколишнього середовища, в процесі роботи двигуна температура навколишнього середовища не змінюється. Дані для розрахунку і побудови наведені в таблиці 7.1. Числовий приклад – в [6, с. 6, 7].

2. Розрахувати та побудувати криві нагрівання та охолодження двигуна електроприводу виробничого механізму, якщо задана в таблиці 7.1 діаграма навантаження доповнюється: а) за періодом роботи t_3 четвертим 30-хвилинним періодом роботи двигуна із номінальним навантаженням, б) перед періодом роботи t_1 четвертим 30-хвилинним періодом роботи двигуна із номінальним навантаженням. Порівняти обидві діаграми навантаження.

Контрольні питання

1. Які основні фактори впливають на інтенсивність нагрівання та охолодження електродвигуна?
2. В чому полягає фізичний сенс сталої часу нагрівання й охолодження електродвигуна?
3. Чим відрізняються параметри теплоємності та тепловіддачі електродвигуна?

Таблиця 7.1 – Дані для розрахунку і побудови кривих нагрівання та охолодження двигуна електроприводу виробничого механізму

Варіант	Потужність, кВт	Навантаження, кВт			Час роботи, хв			η_n , %	Маса m, кг
		P_1	P_2	P_3	t_1	t_2	t_3		
1	5,5	2	8	4	10	15	20	88	31,4
2	15	14	20	4	20	10	15	90	100
3	22	27	8	20	15	10	20	90,5	160
4	22	12	20	6	10	15	20	90,5	160
5	15	24	12	8	5	12	15	90	100
6	22	12	24	8	12	18	10	90,5	160
7	18,5	5	15	25	10	20	10	90,5	110
8	15	10	5	15	10	12	18	90	100
9	15	20	10	5	15	10	12	90	100
10	11	10	8	5	8	16	16	87,5	83,5

4. У яких випадках можливе зниження температури частин електродвигуна при його роботі?
5. Які заходи можна передбачити для зменшення інтенсивності нагрівання електродвигуна?

8 ПРАКТИЧНА РОБОТА № 8

Тема. Розробка схем автоматичного керування електроприводу з програмним та мікропроцесорним керуванням

Мета. Навчитися розробляти структуру безконтактної системи керування електроприводом на логічних елементах та інших електронних пристроях

Теоретичні відомості

Впровадження безконтактних систем керування електроприводом виробничих механізмів підприємств є перспективним напрямком удосконалення електроприводу. Безконтактні системи керування електроприводом позбавлені рухомих елементів у пристроях комутації, що призводить до пом'якшення вимог щодо міцності та жорсткості елементів системи керування приводом. Такі системи мають більшу довговічність, аніж їхні релейно-контактні аналоги, через відсутність механічного зношення контактних систем, окислення й опалення контактів під час комутації. Крім того, безконтактні системи керування електроприводом мають підвищений рівень вибухобезпеки через відсутність іскріння та електричної дуги в просторі між контактами. Однак безконтактні системи керування електроприводом є більш складними, аніж релейно-контактні, і в окремих випадках – навіть менш надійними. Тому остаточний вибір того чи іншого типу системи керування має супроводжуватися технічною оцінкою і економічним аналізом.

Безконтактні системи керування електроприводом можуть виконуватися на силових транзисторах і тиристорах, а також підсилювачах сигналів, тригерах, електронних ключах, електронних реле, логічних схемах, перетворювачах інформації, інтегральних схемах, мікропроцесорах тощо.

Одним із найбільш простих і надійних видів безконтактних систем керування є такі системи на логічних елементах І, АБО, НЕ, І/НЕ, АБО/НЕ і на тригері, який виконує логічну функцію «Пам'ять». Логічні елементи працюють із двійковим сигналом, тобто тим, який може приймати два значення: логічний

нуль (сигнал низького рівня) і логічна одиниця (сигнал високого рівня). Величина напруги, яка відповідає логічним нулю та одиниці, відрізняється одна від одної в 5-10 разів; між пороговими значеннями напруги логічного нуля та одиниці – «заборонена зона». Елемент І (кон'юнкція або логічне множення) має два і більше входів, і один вихід. Вихідний сигнал у вигляді логічної одиниці виникає у випадку, коли на всі входи подається сигнал у вигляді логічної одиниці. Елемент АБО (диз'юнкція або логічне додавання) має два і більше входів, і один вихід. Вихідний сигнал у вигляді логічної одиниці виникає у випадку, коли на один і більше входів подається сигнал у вигляді логічної одиниці. Елемент НЕ (інверсія або логічне заперечення) має один вхід і один вихід. Вихідний сигнал у вигляді логічної одиниці виникає у випадку, якщо на вхід подається сигнал у вигляді логічного нуля, а логічний нуль на виході виникає у випадку, якщо на вхід подається сигнал у вигляді логічної одиниці. В системах керування використовуються комбінації логічних елементів І/НЕ й АБО/НЕ. Логічна одиниця на виході елементу І/НЕ з'являється у випадку, коли на всі входи, або на жоден із входів даного елементу не подається логічна одиниця. Логічна одиниця на виході елементу АБО/НЕ з'являється у випадку, коли на всі входи даного елементу подається логічний нуль.

Тригер має два стійкі стани, й у вихідні кола цього пристрою може подаватися логічний нуль або одиниця, в залежності від потрапляння сигналу у вигляді логічної одиниці на вхід, а також попереднього стану тригера. Якщо до потрапляння сигналу у вигляді логічної одиниці на вхід тригера на виході останнього був нуль, після сигналу на виході тригера буде сигнал у вигляді логічної одиниці, і навпаки.

Системи керування, які виконані на логічних елементах і тригері (як і на будь-яких інших електронних пристроях) можуть взаємно замінювати одна одну, виконуючи одні й ті ж самі функції. Розглянемо релейно-контактну і безконтактні системи керування пуском асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, які виконані на тригері і логічних елементах.

Завдання на самостійне опрацювання

Розробити релейно-контактні та безконтактні системи а) реверсу двигуна, б) гальмування двигуна противмиканням, в) ступінчастого пуску асинхронного двигуна з фазним ротором (двигуна постійного струму).

Контрольні питання

1. Опишіть принцип роботи основних логічних елементів й тригера.
2. Чому тригер називають «логічною пам'яттю»?
3. Логічний елемент І/НЕ безконтактної системи керування електроприводом має три входи й один вихід. Якою є вихідна функція логічному елементу, якщо на перший вхід подається логічна одиниця, на другий і третій – логічний нуль?

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Колб Ант. А, Колб А. А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. – 2-е вид. перероб. і доп. –Д., Національний гірничий університет, 2011. – 540 с.
2. Лавріненко Ю. М. Електропривод: Підручник / Ю. М. Лавріненко, О. С. Марченко, П. І. Савченко, О. Ю. Синявський, Д. Г. Войтюк, В. П. Лисенко. – К.: Видавництво «Ліра-К», 2009. – 504 с.
3. Донець О. В. Теорія електропривода : конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка) / В. І. Колотіло, О. В. Донець ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 148 с.
4. Робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання до вивчення дисципліни «Теорія електропривода» / Укл. В. Є. Кажан. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2010. - 100 с.
5. Методичні вказівки до виконання контрольної роботи з дисципліни «Теорія електроприводу. Частина 1» для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка освітнього ступеня «бакалавр» денної та заочної форм навчання / уклад. Н. П. Савченко. – Луцьк: ДонНТУ, 2022.– 26с.
6. Методичні рекомендації до лабораторних робіт з дисципліни «Електропривод та електрообладнання». – Дніпропетровськ, 2012 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/9979107/>
7. Безрученко В. М. Теорія електроприводу. Підручник [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://eadnurt.diit.edu.ua/bitstream/123456789/402/1/Bezruchenko.pdf>.

ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ ПУСКУ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Здійснюється визначення тривалості пуску двигуна постійного струму з паралельним збудженням із такою технічною характеристикою: номінальна потужність, $P_N=80$ кВт; номінальна частота обертання, $n_N=1400$ хв.⁻¹; номінальна напруга, $U_N=380$ В; опір кола якоря, $R_a=0,3$ Ом; опір обмотки збудження, $R_E=15$ Ом; $\eta_N=0,9$; приведений момент інерції, $J_n=25$ кг·м².

Визначається тривалість пуску шляхом графо-аналітичного інтегрування основного рівняння електроприводу.

Для побудови природної характеристики двигуна визначаються:

- номінальний струм:

$$I_N = P_N / (U_N \eta_N) = 80000 / (380 \cdot 0,9) = 234 \text{ А};$$

- номінальний струм збудження:

$$I_z = U_N / R_E = 380 / 15 = 25,3 \text{ А};$$

- номінальний струм якоря:

$$I_{aN} = I_N - I_z = 234 - 25,3 = 208 \text{ А};$$

- електрорушійна сила номінального режиму:

$$E_{nom} = U_N - I_{aN} R_a = 380 - 208 \cdot 0,3 = 318 \text{ Ом};$$

- номінальний момент:

$$M_N = 9,55 P_N / n_N = 9,55 \cdot 80000 / 1400 = 546 \text{ Н·м};$$

- кутова швидкість номінального режиму:

$$\omega_N = \pi n_N / 30 = 3,14 \cdot 1400 / 30 = 147 \text{ с}^{-1};$$

- кутова швидкість ідеального холостого ходу:

$$\omega_0 = \pi n_N U_N / (30 E_{nom}) = 3,14 \cdot 1400 \cdot 380 / (30 \cdot 318) = 175 \text{ с}^{-1}.$$

Для побудови штучних характеристики двигуна і діаграми його пуску визначаються:

- пусковий момент:

$$M_1 = 2 M_N = 2 \cdot 546 = 992 \text{ Н·м};$$

- мінімальний момент перемикання за кількості ступеней пуску $m=4$:

$$M_2 = 1,3 M_N = 1,3 \cdot 546 = 710 \text{ Н·м}.$$

Будуються природна характеристика двигуна $M(\omega)$, діаграми пуску двигуна і динамічного моменту $M_{дин}(\omega)$, зовнішньої характеристики виробничого механізму $M_c(\omega)$, які представлені на рисунку Д.1. Для полегшення сприйняття креслення діаграма динамічного моменту наведена подвійною лінією. Помічаємо координати швидкості обертання, які відповідають перемиканню двигуна на наступну ступень. Для кожної ступені пуску на графіку динамічного моменту відмічаємо координати моментів, які відповідають серединам відрізків ступеней діаграми. Будується розрахункова таблиця Д.1 із параметрами пуску двигуна, а також криві пуску двигуна, представлені на рисунку Д.2.

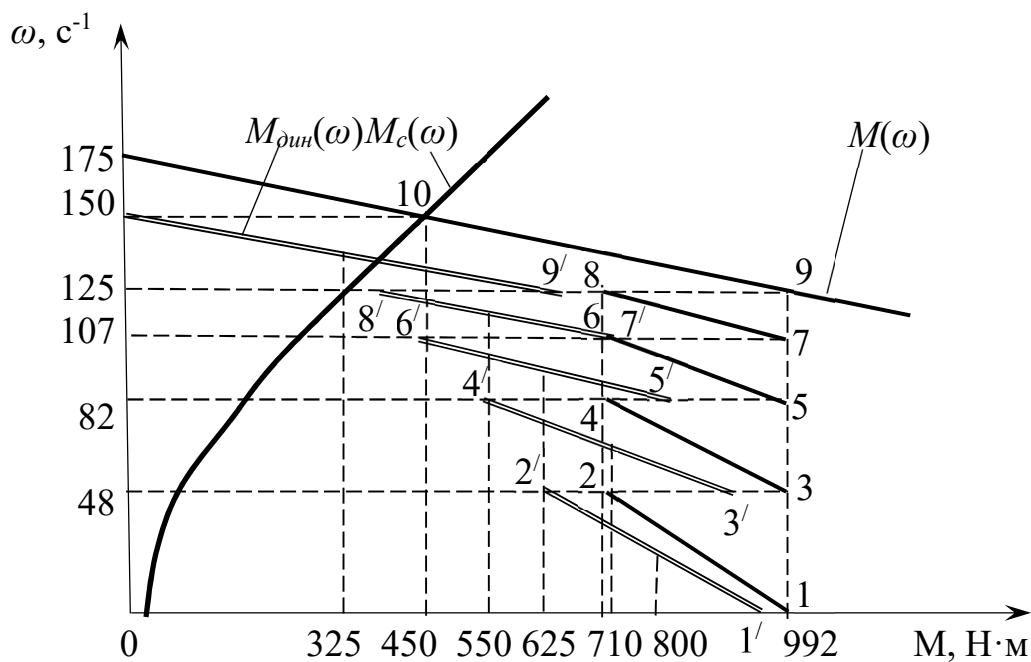


Рисунок Д.1 – Діаграма пуску і динамічного моменту двигуна

Для визначення тривалості процесу пуску двигуна аналітичним способом із використанням сталої часу також будується природна, штучні характеристики і діаграма запуску двигуна, однак із урахуванням його статичного моменту. Результати побудування такої діаграми пуску наведені на рисунку Д.3.

Визначається опір ступеней пускового реостату:

$$R_1 = U_N / I_{aN} \cdot EF / AG = 380 / 208 \cdot 12 / 70 = 0,31 \text{ Ом};$$

Таблиця Д.1 – Розрахункова таблиця параметрів пуску двигуна

j	$\Delta\omega_j, \text{с}^{-1}$	$\omega_j, \text{с}^{-1}$	$M_{\text{дин}j}, \text{Н}\cdot\text{м}$	$\Delta t_j, \text{с}$	$t_j, \text{с}$	$M_{\text{min}j}, \text{Н}\cdot\text{м}$	$M_{\text{max}j}, \text{Н}\cdot\text{м}$
1	48	48	800	1,5	1,5	710	992
2	34	82	730	1,2	2,7	710	992
3	35	107	625	1,4	4,1	710	992
4	18	125	550	0,8	4,9	710	992
5	23	150	325	1,8	6,7	450	-

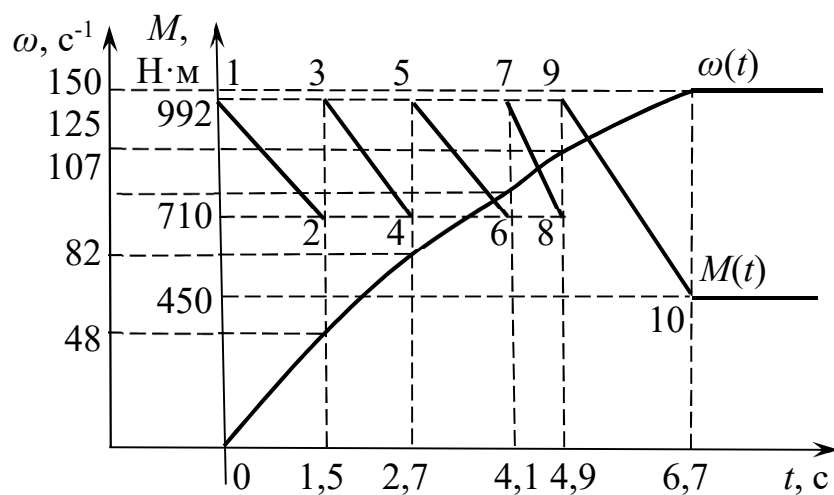


Рисунок Д.2 – Криві пуску двигуна, побудовані за методом графо-аналітичного інтегрування основного рівняння електроприводу

$$R_2 = U_N / I_{aN} \cdot DE / AG = 380 / 208 \cdot 7 / 70 = 0,18 \text{ Ом};$$

$$R_3 = U_N / I_{aN} \cdot CD / AG = 380 / 208 \cdot 5 / 70 = 0,13 \text{ Ом};$$

$$R_4 = U_N / I_{aN} \cdot BC / AG = 380 / 208 \cdot 3,5 / 70 = 0,09 \text{ Ом};$$

Опір реостата:

- при пуску:

$$R_{1234} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 0,31 + 0,18 + 0,13 + 0,09 = 0,22 \text{ Ом};$$

- при шунтуванні 1-ї ступені реостату:

$$R_{234} = R_2 + R_3 + R_4 = 0,18 + 0,13 + 0,09 = 0,40 \text{ Ом};$$

- при шунтуванні 2-ї ступені реостату:

$$R_{34}=R_3+R_4=0,13+0,09=0,22 \text{ Ом};$$

при шунтуванні третьої ступені реостату $R_4=0,09 \text{ Ом}$, четвертої – $R=0$.

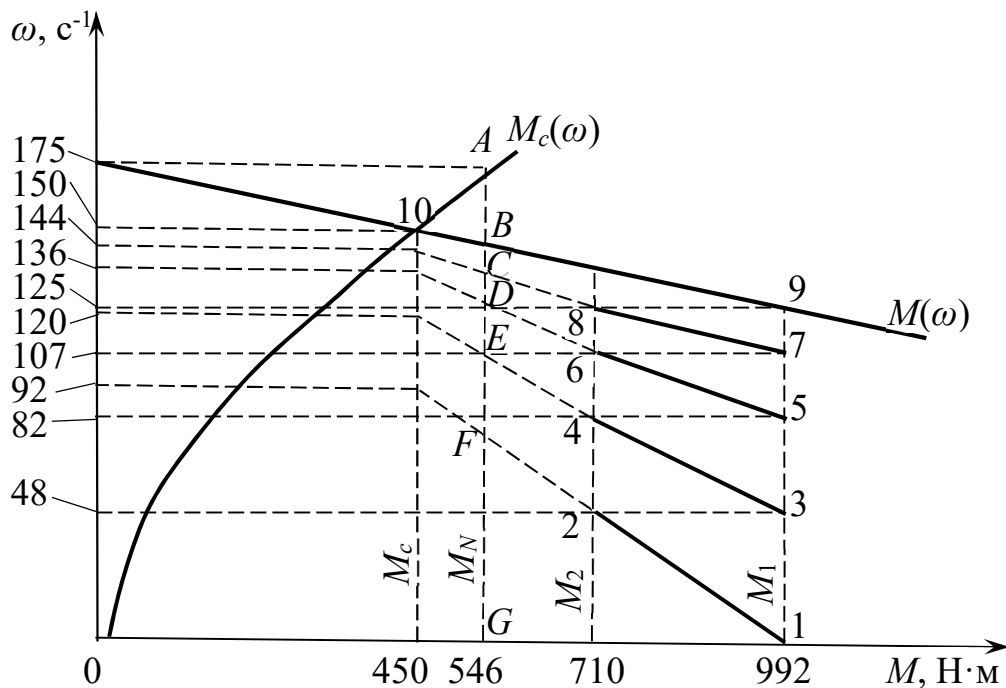


Рисунок Д.3 – Діаграма пуску двигуна

Сталі часу для штучних і природної характеристик двигуна:

- з повним опором реостату:

$$T_{MR1-R4}=J_n(R_a+R_{1234})/(K\Phi)^2,$$

де $K\Phi$ – конструктивний коефіцієнт двигуна,

$$K\Phi=(U_N-I_{aN}R_a)/\omega_N=(380-208\cdot0,3)/2,11=2,11,$$

$$T_{MR1-R4}=25(0,3+0,22)/2,11^2=5,7 \text{ с};$$

- із зашунтованою першою ступінню:

$$T_{MR2-R4}=J_n(R_a+R_{234})/(K\Phi)^2=25(0,3+0,40)/2,11^2=3,9 \text{ с};$$

- із зашунтованими першою і другою ступіннями:

$$T_{MR3-R4}=J_n(R_a+R_{34})/(K\Phi)^2=25(0,3+0,22)/2,11^2=2,9 \text{ с};$$

- із зашунтованими першою, другою, третьою ступіннями:

$$T_{MR4}=J_n(R_a+R_4)/(K\Phi)^2=25(0,3+0,09)/2,11^2=2,2 \text{ с};$$

- на природній характеристиці:

$$T_{MN}=J_nR_a/(K\Phi)^2=25\cdot0,3/2,11^2=1,7 \text{ с}.$$

Розрахунковий час перехідного процесу:

- з повними опором реостату:

$$t_1 = \ln \frac{M_1 - M_c}{M_2 - M_c} T_{MR1-R4} = \ln \frac{992 - 450}{710 - 450} 5,7 = 4,2 \text{ с};$$

$$t_2 = \ln \frac{M_1 - M_c}{M_2 - M_c} T_{MR2-R4} = \ln \frac{992 - 450}{710 - 450} 3,9 = 2,9 \text{ с};$$

$$t_3 = \ln \frac{M_1 - M_c}{M_2 - M_c} T_{MR3-R4} = \ln \frac{992 - 450}{710 - 450} 2,9 = 2,1 \text{ с};$$

$$t_4 = \ln \frac{M_1 - M_c}{M_2 - M_c} T_{MR4} = \ln \frac{992 - 450}{710 - 450} 2,2 = 1,6 \text{ с};$$

$$t_N = (3 \dots 4) T_{MN} = (3 \dots 4) 1,7 = 5,1 \dots 6,8 \text{ с}.$$

Рівняння для різних ступеней запуску:

- моменту:

$$M_i(t) = M_c(1 - e^{-t/T_{Mi}}) + M_1 e^{-t/T_{Mi}};$$

- кутової швидкості:

$$\omega_i(t) = \omega_{ci}(1 - e^{-t/T_{Mi}}) + \omega_{ni} e^{-t/T_{Mi}},$$

де ω_{ci} – швидкість двигуна при статичному моменті на i -й ступіні, с^{-1} ; ω_{ni} – швидкість перемикання двигуна на i -ту ступінь, с^{-1} .

Швидкості ω_{ci} і ω_{ni} беруться із діаграми пуску двигуна, рисунок ДЗ.

Таким чином, можна записати:

- для 1-ї ступіні:

$$M_1(t) = 450(1 - 2,72^{-t/5,7}) + 992 \cdot 2,72^{-t/5,7};$$

$$\omega_1(t) = 92(1 - 2,72^{-t/5,7});$$

- для 2-ї ступіні:

$$M_2(t) = 450(1 - 2,72^{-t/3,9}) + 992 \cdot 2,72^{-t/3,9};$$

$$\omega_2(t) = 120(1 - 2,72^{-t/3,9}) + 48 \cdot 2,72^{-t/3,9};$$

- для 3-ї ступіні:

$$M_3(t) = 450(1 - 2,72^{-t/2,9}) + 992 \cdot 2,72^{-t/2,9};$$

$$\omega_3(t) = 136(1 - 2,72^{-t/2,9}) + 82 \cdot 2,72^{-t/2,9};$$

- для 4-ї ступіні:

$$M_4(t) = 450(1 - 2,72^{-t/2,2}) + 992 \cdot 2,72^{-t/2,2};$$

$$\omega_4(t)=144(1-2,72^{-t/2,2})+107\cdot 2,72^{-t/2,2};$$

- для природної характеристики:

$$M_N(t)=450(1-2,72^{-t/1,7})+992\cdot 2,72^{-t/1,7};$$

$$\omega_N(t)=150(1-2,72^{-t/2,2})+125\cdot 2,72^{-t/2,2};$$

Криві пуску двигуна наведені на рисунку Д4.

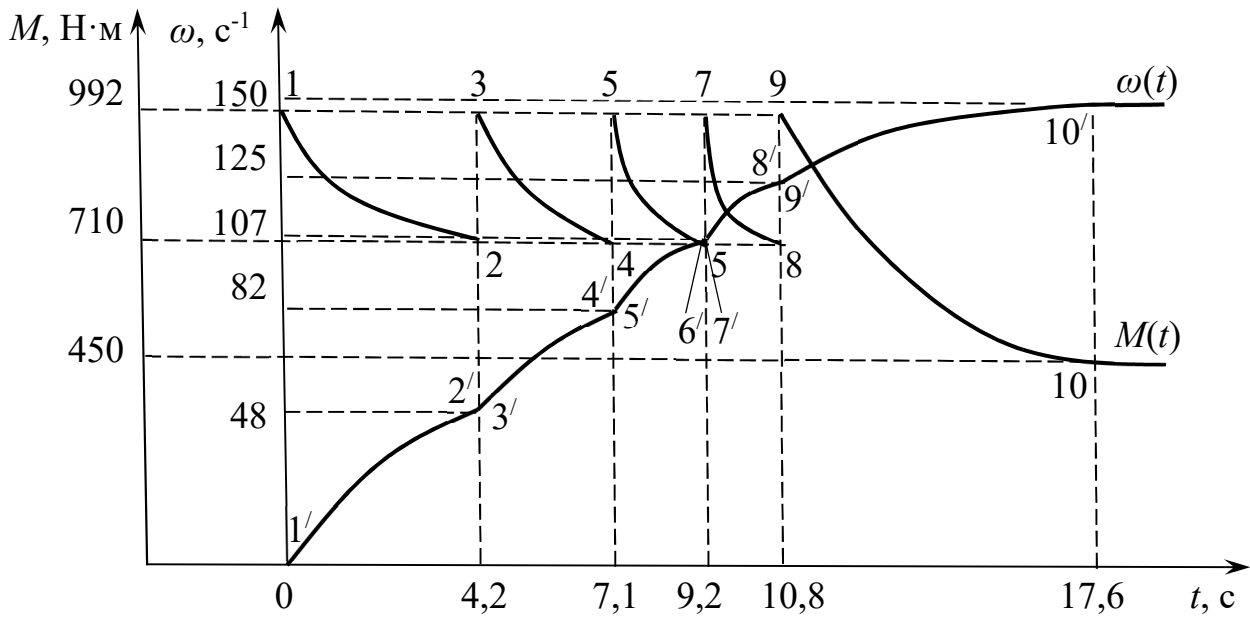


Рисунок Д4 – Криві пуску двигуна, отримані за допомогою сталої часу

ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Виробничий механізм працює зі змінним навантаженням у двох характерних режимах, характеристика яких наведена в таблиці Д2. Навантаження $M_1=M_N$, $Q_1=Q_{\max}$. Порівняти енергетичні показники (к.к.д., питомі енергетичні витрати) виробничого механізму із електроприводом з двигунами постійного струму незалежного збудження й асинхронними двигунами. Характеристика двигунів наведені в таблицях Д3 і Д4.

Таблиця Д2 – Характеристика робочого режиму
виробничого механізму

№ з/п	$M_{p2}/$ M_N	$M_{p3}/$ M_N	$Q_{\max},$ т/год.	$Q_2/$ $Q_{\max}$	$Q_3/$ $Q_{\max}$	Імовірності навантаження, режим №1			Імовірності навантаження, режим № 2		
						p ₁₁	p ₁₂	p ₁₃	p ₂₁	p ₂₂	p ₂₃
1	0,7	0,15	20	0,75	0,18	0,3	0,3	0,4	0,1	0,3	0,6

Таблиця Д3 – Технічна характеристика
двигуна постійного струму

№	P_N , кВт	U_N , В	I_N , А	$R_{я}$, Ом
1	75	220	330	0,016

Таблиця Д4 – Технічна характеристика
асинхронного двигуна

№	P_N , кВт	I_{1N} , А	R_1 , Ом	R_2' , Ом
1	75	110	0,16	0,05

Для виробничого механізму із електроприводом його загальний коефіцієнт корисної дії визначиться по формулі:

$$\eta = \eta_{\text{ем}} \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{мч}} \eta_{\text{мех}},$$

де $\eta_{ем}$ – коефіцієнт корисної дії електричної мережі, для мережі змінного струму приймаємо $\eta_{ем}=0,95$, для мережі постійного струму – $\eta_{ем}=0,9$; $\eta_{дв}$ – коефіцієнт корисної дії електричного (-их) двигуна (-ів); $\eta_{мч}$ – коефіцієнт корисної дії механічної частини приводу, $\eta_{мч}=0,95$; $\eta_{мех}$ – коефіцієнт корисної дії виробничого механізму.

Коефіцієнт корисної дії електродвигуна у відповідному режимі можна визначити по формулі:

$$\eta_{дв} = \frac{K_3}{K_3 + (a + K_3^2) \frac{\Delta P_{vN}}{P_N}},$$

де K_3 – коефіцієнт завантаженості електродвигуна; a – відношення постійних і змінних втрат потужності двигуна, для двигунів малої та середньої потужності $a=0,5 \dots 1$, для потужних двигунів $a=1,5$; ΔP_{vN} – номінальні змінні втрати двигуна, для двигунів постійного струму становлять

$$\Delta P_{vN} = I_N^2 R_{я},$$

I_N – номінальний струм кола якоря; $R_{я}$ – опір кола якоря;

для асинхронних двигунів

$$\Delta P_{vN} = I_{1N}^2 (R_1 + \sigma_h^2 R_2'),$$

I_{1N} – номінальний струм статора; R_1, R_2' – опір обмотки статора і приведений опір обмотки ротора, відповідно; σ_h – відношення приведенного номінального струму ротора і струму статора, $\sigma_h=0,85 \dots 0,95$; P_N – номінальна потужність двигуна.

Втрати потужності в номінальному режимі при використанні двигуна постійного струму

$$\Delta P_{vN} = 330^2 \cdot 0,016 = 1740 \text{ Вт} = 1,74 \text{ кВт};$$

для асинхронного двигуна

$$\Delta P_{vN} = 110^2 (0,16 + 0,9^2 \cdot 0,05) = 2430 \text{ Вт} = 2,43 \text{ кВт}.$$

Коефіцієнти завантаженості двигуна в робочих режимах [1]:

$$K_{31} = 1,0;$$

$$K_{32} = 1,0 M_{p2} / M_N = 1,0 \cdot 0,7 = 0,7;$$

$$K_{33} = 1,0 M_{p3} / M_N = 1,0 \cdot 0,15 = 0,15.$$

Приймаємо $a=1$.

Тоді коефіцієнти двигунів постійного струму за різних K_3 визначаються

$$\eta_{дв1}=1,0/[1,0+(1,0+1,0^2)1,74/75]=0,956;$$

$$\eta_{дв2}=0,7/[0,7+(1,0 \cdot 0,7^2)1,74/75]=0,952;$$

$$\eta_{дв3}=0,15/[0,15+(1,0 \cdot 0,15^2)1,74/75]=0,862,$$

для асинхронного двигуна

$$\eta_{дв1a}=1,0/[1,0+(1,0+1,0^2)2,43/75]=0,939;$$

$$\eta_{дв2a}=0,7/[0,7+(1,0 \cdot 0,7^2)2,43/75]=0,935;$$

$$\eta_{дв3a}=0,15/[0,15+(1,0 \cdot 0,15^2)2,43/75]=0,820.$$

Коефіцієнти корисної дії виробничого механізму за різних K_3 :

$$\eta_{мех} \approx \frac{M_p - M_{xx}}{M_p},$$

де M_p , M_{xx} – момент виробничого механізму в робочому режимі та на холостому ході, відповідно. Якщо $M_{xx}=0,1M_N$, то

$$\eta_{мех1} \approx \frac{M_{p1} - M_{xx}}{M_{p1}} = \frac{(1,0 - 0,1)M_N}{1,0M_N} = 0,9;$$

$$\eta_{мех2}=(0,7-0,1)/0,7=0,86;$$

$$\eta_{мех3}=(0,15-0,1)/0,15=0,33.$$

Тоді коефіцієнт корисної дії виробничого механізму із двигуном постійного струму в режимі № 1 визначиться по формулі:

$$\eta_1=\eta_{ем}(\eta_{дв1}p_{11}+\eta_{дв2}p_{12}+\eta_{дв3}p_{13})\eta_{м.ч}(\eta_{мех1}p_{11}+\eta_{мех2}p_{12}+\eta_{мех3}p_{13})=0,9(0,956 \cdot 0,3+ \\ +0,952 \cdot 0,3+0,862 \cdot 0,4)0,95(0,9 \cdot 0,3+0,86 \cdot 0,3+0,33 \cdot 0,4)=0,52;$$

в режимі № 2:

$$\eta_2=\eta_{ем}(\eta_{дв1}p_{21}+\eta_{дв2}p_{22}+\eta_{дв3}p_{23})\eta_{м.ч}(\eta_{мех1}p_{21}+\eta_{мех2}p_{22}+\eta_{мех3}p_{23})=0,9(0,956 \cdot 0,1+ \\ +0,952 \cdot 0,3+0,862 \cdot 0,6)0,95(0,9 \cdot 0,1+0,86 \cdot 0,3+0,33 \cdot 0,6)=0,42;$$

для асинхронного двигуна в режимі № 1:

$$\eta_{1a}=\eta_{ем}(\eta_{дв1a}p_{11}+\eta_{дв2a}p_{12}+\eta_{дв3a}p_{13})\eta_{м.ч}(\eta_{мех1}p_{11}+\eta_{мех2}p_{12}+\eta_{мех3}p_{13})=0,95(0,939 \cdot 0,3+ \\ +0,935 \cdot 0,3+0,820 \cdot 0,4)0,95(0,9 \cdot 0,3+0,86 \cdot 0,3+0,33 \cdot 0,4)=0,53;$$

в режимі № 2:

$$\eta_{2a} = \eta_{em}(\eta_{дв1a}p_{21} + \eta_{дв2a}p_{22} + \eta_{дв3a}p_{23})\eta_{м.ч}(\eta_{мех1}p_{21} + \eta_{мех2}p_{22} + \eta_{мех3}p_{23}) = 0,95(0,939 \cdot 0,1 + 0,935 \cdot 0,3 + 0,820 \cdot 0,6)0,95(0,9 \cdot 0,1 + 0,86 \cdot 0,3 + 0,33 \cdot 0,6) = 0,43.$$

Питомі витрати енергії на функціонування виробничого механізму при використанні двигуна постійного струму в режимі № 1

$$W_1 = \sum_{k=1}^m \frac{P_{1k}p_k}{Q_k},$$

де P_{1k} – потужність, яка споживається з електричної мережі в k -му режимі,

$$P_{1k} = P_N / (\eta_{\partial\partial k} \eta_{em}),$$

$$W_1 = P_N / \eta_{em} \cdot [p_{11} / (\eta_{\partial\partial 1} Q_{\max}) + p_{12} / (\eta_{\partial\partial 2} Q_2) + p_{13} / (\eta_{\partial\partial 3} Q_3)] = 75 / 0,9 \cdot [0,3 / (0,956 \cdot 20) + 0,3 / (0,952 \cdot 0,75 \cdot 20) + 0,4 / (0,862 \cdot 0,18 \cdot 20)] = 13,7 \text{ кВт} \cdot \text{год.} / \text{т};$$

в режимі № 2:

$$W_2 = P_N / \eta_{em} \cdot [p_{21} / (\eta_{\partial\partial 1} Q_{\max}) + p_{22} / (\eta_{\partial\partial 2} Q_2) + p_{23} / (\eta_{\partial\partial 3} Q_3)] = 75 / 0,9 \cdot [0,1 / (0,956 \cdot 20) + 0,3 / (0,952 \cdot 0,75 \cdot 20) + 0,6 / (0,862 \cdot 0,18 \cdot 20)] = 18,3 \text{ кВт} \cdot \text{год.} / \text{т};$$

для асинхронного двигуна в режимі № 1:

$$W_{1a} = P_N / \eta_{em} \cdot [p_{11} / (\eta_{\partial\partial 1a} Q_{\max}) + p_{12} / (\eta_{\partial\partial 2a} Q_2) + p_{13} / (\eta_{\partial\partial 3a} Q_3)] = 75 / 0,95 \cdot [0,3 / (0,939 \cdot 20) + 0,3 / (0,935 \cdot 0,75 \cdot 20) + 0,4 / (0,820 \cdot 0,18 \cdot 20)] = 13,6 \text{ кВт} \cdot \text{год.} / \text{т};$$

в режимі № 2:

$$W_{2a} = P_N / \eta_{em} \cdot [p_{21} / (\eta_{\partial\partial 1a} Q_{\max}) + p_{22} / (\eta_{\partial\partial 2a} Q_2) + p_{23} / (\eta_{\partial\partial 3a} Q_3)] = 75 / 0,9 \cdot [0,1 / (0,939 \cdot 20) + 0,3 / (0,935 \cdot 0,75 \cdot 20) + 0,6 / (0,820 \cdot 0,18 \cdot 20)] = 18,2 \text{ кВт} \cdot \text{год.} / \text{т}.$$