

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

В. М. Пижов

ЕЛЕКТРОПРИВОД

РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка, освітня програма «Електротехнічні пристрої та
електротехнологічні комплекси»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Рецензент: *Островерхов М.Я.*, доктор технічних наук, професор, зав.
кафедрою теоретичної електротехніки

Відповідальний редактор *Печеник М.В.*, канд. техн. наук, професор кафедри
автоматизації електромеханічних систем та електроприводу.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 8 від 24.06.2021 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроенерготехніки та автоматики
(протокол № 10 від 24.05.2021 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Пижов Володимир Михайлович, канд. техн. наук, доцент

ЕЛЕКТРОПРИВОД

РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА

Електропривод: розрахунково-графічна робота [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів вищої освіти спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» / В.М. Пижов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 0.4 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 57 с.

Навчальний посібник включає завдання та методичні матеріали щодо виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Електропривод». Призначений для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітня програма «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси». Може бути корисним також для студентів факультету електроенерготехніки та автоматики, які навчаються за іншими спеціалізаціями та вивчають дисципліну «Електропривод».

© В.М. Пижов
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. ЗАВДАННЯ НА РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНУ РОБОТУ	5
2. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ «ДПС»	6
2.1. Підготовка до виконання завдання «ДПС»	6
2.2. Методика розрахунку та побудови статичних характеристик двигуна постійного струму	7
2.3. Методика розрахунку та побудови перехідних процесів	10
2.4. Приклад виконання завдання «ДПС»	13
3. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ «АД»	19
3.1. Підготовка до виконання завдання «АД»	19
3.2. Методика розрахунку та побудови характеристик асинхронного двигуна	19
3.3. Приклад виконання завдання «АД»	25
4. ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ РОБОТИ	31
5. ДЕЯКІ ПРАКТИЧНІ ПОРАДИ ДО ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ	33
6. РЕЙТИНГОВА ОЦІНКА ВИКОНАННЯ РГР	33
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	34
ДОДАТОК 1. ЗАВДАННЯ «ДПС»	36
ДОДАТОК 2. ЗАВДАННЯ «АД»	47

ВСТУП

Електропривод є найбільшим споживачем електричної енергії в Україні і в світі. Тому для фахівців у галузі генерації, передачі та розподілу електричної енергії, а також електротехнології, необхідно мати чітку уяву про цього споживача: сфери застосування, електромеханічні властивості, особливості керування, енергетичні характеристики, потенціал для енергозбереження, взаємодія з електричними мережами.

Дисципліна «Електропривод» є базовою для підготовки бакалаврів за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Розрахунково-графічна робота (РГР) є складовою частиною дисципліни «Електропривод» для освітньої програми «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси».

РГР охоплює такі теми робочої навчальної програми з дисципліни «Електропривод»:

Тема 2.2. Типові статичні навантаження електропривода.

Тема 3.1. Статичні характеристики двигунів постійного струму.

Тема 3.2. Гальмівні режими двигунів постійного струму.

Тема 4.1. Статичні характеристики асинхронного двигуна.

Тема 4.2. Гальмівні режими асинхронного двигуна.

Тема 6.2. Електромеханічні перехідні процеси у електроприводі.

РГР має на меті поглиблення знань з відповідних розділів дисципліни та розвиток відповідних навичок через вирішення практичних завдань, розрахунків та візуалізації графічних елементів.

Робота складається з двох завдань.

Перше завдання з назвою «ДПС» стосується електроприводу з двигуном постійного струму з незалежним збудженням (ДПС з НЗ), побудови його

статичних механічних характеристики, впливу різних параметрів на характеристики, визначення робочих точок на характеристиках, аналізу гальмівних режимів. Також це завдання охоплює побудову електромеханічних перехідних процесів електроприводу з лінійною/лінеаризованою механічною характеристикою на прикладі ДПС з НЗ.

Друге завдання з назвою «АД» стосується електроприводу змінного струму з асинхронним двигуном (АД), побудови його статичних механічних характеристик, оцінки впливу різних параметрів електроприводу, аналізу гальмівних режимів.

Методичні матеріали включають варіанти завдань, методичні вказівки з виконання, приклади вирішення завдань, вимоги до оформлення, систему оцінки якості виконання РГР, корисні джерела інформації.

1. ЗАВДАННЯ НА РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНУ РОБОТУ

Завдання до РГР вибирається студентом відповідно до заданого викладачем варіанту згідно з Табл. 1.

Таблиця 1 - Варіанти завдання до РГР

№ вар.	Завдання ДПС	Завдання АД
1	ДПС 1	АД 10
2	ДПС 2	АД 9
3	ДПС 3	АД 8
4	ДПС 4	АД 7
5	ДПС 5	АД 6
6	ДПС 6	АД 5
7	ДПС 7	АД 4
8	ДПС 8	АД 3
9	ДПС 9	АД 2

10	ДПС 10	АД 1
----	--------	------

Завдання ДПС наведені у Додатку 1, а завдання АД - у Додатку 2. Кількість варіантів може бути збільшена у разі потреби.

2. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ «ДПС»

2.1. Підготовка до виконання завдання «ДПС»

Перед початком виконання роботи необхідно опрацювати або згадати відповідний теоретичний матеріал.

Для виконання завдання ДПС, що стосується статики електропривода постійного струму, треба звернути увагу на наступні питання:

- механічні характеристики механізмів; визначення статичного моменту M_c ; активний та реактивний M_c ; (*джерела*: [1, стор. 58-60], [2, стор. 29-31], [3, стор. 13-14, 23-25], [4, стор. 24-31, 64-66] [7, стор. 17-22], [8, лекція № 3]);

- природні електромеханічні та механічні характеристики ДПС; математичний опис статичних характеристик; визначення робочої точки на статичній характеристиці; аналіз штучних характеристик при зміні напруги на якорі, магнітного потоку та опору у колі якоря ДПС; гальмівні режими ДПС (*джерела*: [1, стор. 95-102, 102-104], [2, стор. 59-77], [3, стор. 38-42], [4, стор. 11-23, 120-130], [5, pages 38-42], [6, стор. 95-122], [8, лекції № 4 та №5]).

Щодо компоненту, пов'язаного з динамікою електропривода, треба опрацювати такі питання:

- математичний опис електроприводу у динаміці; електромагнітна T_e та електромеханічна T_m сталі часу електропривода; умови знехтування електромагнітною сталою часу; вирішення рівнянь динаміки електроприводу при $T_e = 0$; зв'язок між графіками статичних механічних характеристик та перехідних процесів; визначення початкових та кінцевих значень координат

електроприводу; (джерела: [1, стор. 162-173, 185-197], [4, стор. 138-147], [8, лекції № 9 та № 10], [9, стор. 6 – 10, 10-19]).

2.2. Методика розрахунку та побудови статичних характеристик двигуна постійного струму

Статична електромеханічна характеристика ДПС з незалежним збудженням $\omega = f(I)$ має вигляд:

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{R_{я\Sigma}}{c\Phi} I,$$

де

U - напруга, прикладена до якоря;

Φ - магнітний потік;

c - конструкційна стала;

$R_{я\Sigma}$ - повний активний опір якірного кола;

I - струм якоря.

Статична механічна характеристика ДПС $\omega = f(M)$:

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{R_{я\Sigma}}{(c\Phi)^2} M,$$

де M – електромагнітний момент двигуна.

Якщо $M=0$, то швидкість двигуна дорівнює $\omega_0 = \frac{U}{c\Phi}$, яка називається швидкістю ідеального холостого ходу.

Величина, зворотна до коефіцієнту при M , називається жорсткістю статичної механічної характеристики:

$$\beta = \frac{(c\Phi)^2}{R_{я\Sigma}}.$$

Вочевидь, механічні характеристики є лінійними. Тож побудова механічних характеристик може бути здійснена за будь-якими двома точками.

Механічна характеристика є природною, якщо відповідає таким умовам:

1) $U = U_n$;

2) $\Phi = \Phi_n$;

3) $R_{\Sigma} = R_{\text{я}}$, тобто додатковий опір у якірному колі $R_{\text{доп}} = 0$.

Побудувати природну механічну характеристику можна за двома її точками:

точка 1 ($M = 0$; $\omega = \omega_0 = \frac{U}{c\Phi}$, де $\Phi = \Phi_n$);

точка 2 ($M = M_n$; $\omega = \omega_n$), це номінальна точка.

У завданні звичайно задають такі номінальні дані та параметри двигуна:

- номінальна потужність P_n [кВт];
- номінальна швидкість n_n [об/хв.];
- номінальна напруга якоря U_n [В];
- номінальний струм якоря I_n [А];
- активний опір якоря $R_{\text{я}}$ [Ом];
- приведений момент інерції механічної частини J [кгм²].

Інколи опір якоря не задано. Тоді його можна знайти з номінальних даних, враховуючи, що в номінальній робочій точці змінні втрати на активному опорі якоря приблизно дорівнюють половині номінальних втрат:

$$R_{\text{я}} \approx 0,5 \cdot R_n (1 - \eta_n),$$

де $R_n = \frac{U_n}{I_n}$ - номінальний (розрахунковий) опір якоря;

$\eta_n = P_{\text{мех.н}} / P_{\text{ел.н}} = P_n / U_n \cdot I_n$ - номінальний ККД двигуна; $P_{\text{мех.н}} = P_n$ - номінальна механічна потужність на валу двигуна [Вт]; $P_{\text{ел.н}} = U_n \cdot I_n$ - номінальна електрична потужність двигуна [Вт].

Треба зауважити, що всі розрахунки необхідно робити у міжнародній системі одиниць SI. Для цього, наприклад, необхідно перевести номінальну частоту обертання двигуна n_n [об/хв] у кутову номінальну швидкість ω_n [1/с] за формулою:

$$\omega_H = \frac{2\pi n_H}{60}.$$

Важливою величиною, яка необхідна для розрахунків, є $c\Phi_H$. Її можна знайти з номінальних даних:

$$c\Phi_H = \frac{U_H - I_H R_{\Sigma}}{\omega_H}.$$

Тепер можна знайти номінальний електромагнітний момент двигуна

$$M_H = c\Phi_H I_H$$

та швидкість ідеального холостого ходу для природної характеристики

$$\omega_{0H} = U_H / c\Phi_H.$$

На основі отриманих даних можна побудувати природну механічну характеристику за двома точками: ($M = 0$; $\omega = \omega_{0H}$) та ($M = M_H$; $\omega = \omega_H$).

Статична характеристика є штучною, коли не виконується хоча б одна з умов роботи ДПС на природній характеристиці, тобто якщо $U \neq U_H$, або $\Phi \neq \Phi_H$, або $R_{\text{дод}} \neq 0$ ($R_{\Sigma} = R_{\Sigma} + R_{\text{дод}}$).

Штучні механічні характеристики будуються також за двома точками. Але треба мати на увазі, що треба проаналізувати, яким чином величини, що змінюються (U , Φ чи R_{Σ}) впливають на характеристику. Для цього достатньо оцінити, чи зміняться та як зміняться такі величини:

$$\omega_0 = \frac{U}{c\Phi};$$

$$\beta = \frac{(c\Phi)^2}{R_{\Sigma}}$$

$$I_{\Pi} = \frac{U}{R_{\Sigma}} - \text{пусковий струм при } \omega = 0;$$

$$M_{\Pi} = I_{\Pi} c\Phi - \text{пусковий момент двигуна.}$$

У завданні найчастіше треба знайти швидкість ω_i або електромагнітний момент M_i , або додатковий опір $R_{\text{дод}}$ у якійсь i -тій точці статичної характеристики. Якщо застосувати вираз статичної механічної характеристики для певної точки

$$\omega_i = \frac{U}{c\Phi} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{дод}}}{(c\Phi)^2} M_i ,$$

можна бачити, що розрахувати невідому величину у цій формулі можна тільки тоді, коли всі інші величини та параметри є відомі. На цьому побудовані всі розрахунки. Інколи, необхідне значення величини (наприклад ω_i) для точки на одній характеристиці треба знаходити з іншої точки на іншій характеристиці.

2.3. Методика розрахунку та побудови перехідних процесів

Для аналізу динаміки електропривода з лінійною механічною характеристикою треба мати рівняння двигуна (електромеханічного перетворювача ЕМП) та механічної частини МЧ електропривода. Рівняння ЕМП в операторному вигляді з урахуванням електромагнітної сталої часу T_e має вигляд:

$$(1 + T_e p)M = \beta(\omega_0 - \omega)$$

де T_e – електромагнітна стала часу; для ДПС $T_e = L_{\text{я}}/(R_{\text{я}} + R_{\text{дод}})$;

β – жорсткість механічної характеристики;

ω_0 – швидкість ідеального холостого ходу; для ДПС $\omega_0 = U/c\Phi$;

ω – кутова швидкість;

M – електромагнітний момент двигуна.

Більшість перехідних процесів у розімкнутому електроприводі постійного струму з релейно-контакторним керуванням відбувається з увімкнутим додатковим опором $R_{\text{дод}}$ у коло якоря двигуна. Тому електромагнітною сталою часу T_e можна знехтувати, тобто $T_e = 0$. У цьому випадку рівняння ЕМП спрощується:

$$M = \beta(\omega_0 - \omega).$$

Рівняння МЧ має такий вигляд:

$$Jp\omega = M - M_c$$

або

$$T_m \beta p \omega = M - M_c,$$

де $T_m = J/\beta$ – електромеханічна стала часу;
 J – приведений сумарний момент інерції.

Для ДПС з НЗ:

$$T_m = J \frac{R_{\Sigma}}{(c\Phi)^2}$$

За рівняннями ЕМС та МЧ може бути побудована структурна схема електроприводу (рис. 1):

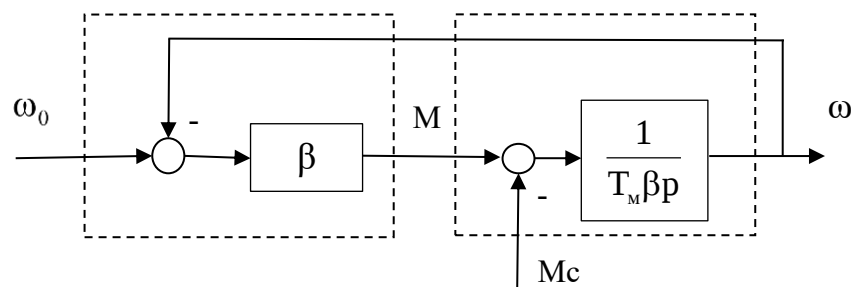


Рисунок 1 – Структурна схема електропривода при $T_e = 0$.

З рис. 1 може бути знайдена передаточна функція електропривода:

$$W(p) = \frac{1}{1 + T_m p}.$$

Тобто, електропривод є аперіодичною ланкою першого порядку з електромеханічною сталою часу T_m , за умови нехтування електромагнітною сталою часу.

Побудова перехідних процесів може бути здійснена двома шляхами:

1) Моделюванням електромеханічної системи на основі структурної схеми (рис. 1) у будь-якому середовищі для моделювання, наприклад MATLAB. Якщо студент володіє методами моделювання, такий спосіб побудови перехідних процесів рекомендується та вітається.

2) Аналітичним або цифровим рішенням рівнянь, що описують електропривод.

Враховуючи невелику ступінь диференційного рівняння, доцільно у даному випадку застосувати аналітичне рішення. Рішення для швидкості $\omega = f(t)$ та моменту $M = f(t)$ мають вигляд:

$$\omega = \omega_{кін} + (\omega_{поч} - \omega_{кін})e^{-\frac{t}{T_M}}$$

$$M = M_{кін} + (M_{поч} - M_{кін})e^{-\frac{t}{T_M}}$$

де $\omega_{поч}$ та $\omega_{кін}$ - початкові та кінцеві значення швидкості;

$M_{поч}$ та $M_{кін}$ - початкові та кінцеві значення моменту.

Таким чином, для побудови перехідних процесів необхідно визначити початкові та кінцеві значення координат електроприводу ω та M , а також значення електромеханічної сталої часу T_M , після чого скористатися наведеними формулами, задаючись значеннями t_i та розраховуючи значення ω_i та M_i .

Розрахунки слід представити у вигляді таблиці (табл. 2):

Таблиця 2 - Дані розрахунку перехідних процесів

№ точки	t_i [с]	ω_i [1/с]	M_i [Нм]

За даними таблиці графіки будуються за допомогою будь-якого відомого комп'ютерного програмного забезпечення.

Слід зауважити, що не слід розраховувати занадто багато точок, особливо наприкінці перехідного процесу. Перехідний процес вважається закінченим, коли значення координат досягли (95-98)% від усталеного статичного значення. Це відбувається у момент часу $t = (3-4)T_M$.

Необхідно пам'ятати, що T_M залежить від сумарного активного опору якірного кола та магнітного потоку:

$$T_M = J \frac{R_{\Sigma} + R_{\partial \partial \partial}}{(c\Phi)^2}$$

Початкові та кінцеві значення координат необхідно знаходити з відповідних статичних механічних характеристик. Зокрема, кінцеві значення відповідають новій статичній робочій точці, для якої $M_{кін} = M_c$.

Саме через це рекомендовано графіки механічних характеристик та перехідних процесів розташовувати поруч, механічні характеристики – ліворуч, перехідні процеси – праворуч. Бажано навіть, щоб масштаби на осях ω та M на обох графіках були однакові. Це дозволить контролювати та перевіряти правильність побудови перехідних процесів.

2.4. Приклад виконання завдання «ДПС»

Задано:

Двигун постійного струму має такі номінальні дані:

номінальна потужність $P_n = 6$ кВт;

номінальна швидкість $n_n = 1500$ об/хв.;

номінальна напруга якоря $U_n = 220$ В;

номінальний струм якоря $I_n = 33,2$ А;

активний опір якоря $R_a = 0,472$ Ом;

момент інерції якоря $J_a = 0,35$ кгм²;

приведений момент інерції механічної частини $J = 2J_a$.

Привод працює на штучній механічній характеристиці з введенням у якорний ланцюг додатковим опором $R_{дод} = 2$ Ом. Статичний момент $M_c = 0,8M_n$ (активний). За допомогою релейно-контактної апаратури $R_{дод}$ виводиться стрибком з кола якоря (шунтується).

Необхідно:

1. Визначити робочу швидкість на штучній характеристиці.
2. Знайти початковий момент $M_{поч}$ при переході на природну механічну характеристику.
3. Знайти робочу швидкість на природній характеристиці.

4. Побудувати штучну та природну статичні механічні характеристики.
5. Побудувати перехідні процеси $\omega = f(t)$ та $M = f(t)$ при переході у нову статичну робочу точку.
6. Дати оцінку енергетичним режимам електричної машини при переході до нової статичної точки.

Рішення:

1) Необхідні попередні розрахунки.

- номінальна кутова швидкість ω_n

$$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1500}{60} = 157 \text{ 1/с};$$

- номінальне значення $c\Phi_n$

$$c\Phi_n = \frac{U_n - I_n R_\Sigma}{\omega_n} = \frac{220 - 33,2 \cdot 0,472}{157} = \frac{220 - 15,67}{157} = 1,3 \text{ В} \cdot \text{с};$$

- номінальне значення електромагнітного моменту двигуна M_n

$$M_n = c\Phi_n I_n = 1,3 \cdot 33,2 = 43,16 \text{ Нм};$$

- статичний момент M_c

$$M_c = 0,8 M_n = 0,8 \cdot 43,16 = 34,53 \text{ Нм};$$

- швидкість ідеального холостого ходу ω_0

$$\omega_0 = U_n / c\Phi_n = 220 / 1,3 = 169,23 \text{ 1/с};$$

- момент інерції механічної частини електропривода J

$$J = 2 J_\Sigma = 2 \cdot 0,35 = 0,7 \text{ кгм}^2.$$

2) Аналіз завдання та побудова статичних механічних характеристик.

З умови завдання випливає, що робоча точка електроприводу переходить із штучної механічної з $R_{\text{дод}} = 2 \text{ Ом}$ на природню характеристику з $R_{\text{дод}} = 0$ (див. рис. 2). Відомо, що жорсткість штучної характеристики (позначимо її через β_1) менша за жорсткість природньої характеристики (позначимо її через β_2).

$$\beta_1 = (c\Phi_n)^2 / (R_\Sigma + R_{\text{дод}}) = 1,3^2 / (0,472 + 2) = 1,69 / 2,472 = 0,68 \text{ Нм} \cdot \text{с}$$

$$\beta_2 = (c\Phi_n)^2 / R_\Sigma = 1,3^2 / (0,472) = 1,69 / 0,472 = 3,58 \text{ Нм} \cdot \text{с}.$$

Обидві характеристики проходять через спільну точку ω_0 .

Знайдемо статичну швидкість на штучній характеристиці, позначивши її через ω_1 .

У формулу для штучної механічної характеристики підставимо значення моменту $M = M_c = 34,53 \text{ Нм}$.

$$\omega_1 = \frac{U_H}{c\Phi_H} - \frac{R_{я} + R_{\text{дод}}}{(c\Phi_H)^2} M_c \text{ або}$$

$$\omega_1 = \omega_0 - \frac{M_c}{\beta_1} = 169,23 - \frac{34,53}{0,68} = 169,23 - 50,78 = 118,45 \text{ 1/с.}$$

Тепер штучну механічну характеристику можна побудувати по двом точкам (всі точки будуть далі позначені на графіках механічних характеристик):

т.1 ($\omega = \omega_0$; $M = 0$);

т.2 ($\omega = \omega_1$; $M = M_c$).

Природну механічну характеристику будемо за двома точками, координати яких вже відомі:

т.1 ($\omega = \omega_0$; $M = 0$);

т.3 ($\omega = \omega_H$; $M = M_H$); це є номінальна точка на природній характеристиці.

Природну характеристику можна побудувати і після знаходження координат, які треба визначити у відповідності до завдання.

Знайдемо статичну швидкість ω_2 на природній характеристиці.

Для цього у формулу для природньої механічної характеристики підставимо значення моменту $M = M_c = 34,53 \text{ Нм}$.

$$\omega_2 = \frac{U_H}{c\Phi_H} - \frac{R_{я}}{(c\Phi_H)^2} M_c \text{ або}$$

$$\omega_2 = \omega_0 - \frac{M_c}{\beta_2} = 169,23 - \frac{34,53}{3,58} = 169,23 - 9,65 = 159,58 \text{ 1/с.}$$

У цьому випадку другою точкою для побудови природньої механічної характеристики є точка т. 4 ($\omega = \omega_2$; $M = M_c$).

Знайдемо початковий момент $M_{\text{поч}}$ при переході на природну механічну характеристику.

Оскільки перехід відбувається стрибком, робоча точка перейде стрибком у точку т.5 з координатами ($\omega = \omega_1$; $M = M_{\text{поч}}$). Тож $M_{\text{поч}}$ визначимо, підставивши значення ω_1 у формулу для природної механічної характеристики:

$$\omega_1 = \frac{U_H}{c\Phi_H} - \frac{R_{\text{я}}}{(c\Phi_H)^2} M_{\text{поч}}, \text{ або } \omega_1 = \omega_0 - \frac{M_{\text{поч}}}{\beta_2}.$$

Звідси знайдемо $M_{\text{поч}}$:

$$M_{\text{поч}} = \beta_2 (\omega_0 - \omega_1) = 3,58 (169,23 - 118,45) = 3,58 \cdot 50,78 = 181,28 \text{ Нм.}$$

Таким чином, точку т.5 ($\omega = \omega_1$; $M = M_{\text{поч}}$) також можна використати як другу точку для побудови природної механічної характеристики.

Виходячи з визначених значень координат, для побудови приймаємо приблизно такі максимальні значення координат на осях ω та M : $\omega_{\text{max}} = 200 \text{ 1/с}$; $M_{\text{max}} = 200 \text{ Нм}$.

Механічні характеристики зображені на рис. 2.

3) Побудова перехідних процесів

Перехідні процеси будуюмо за формулами аналітичного рішення рівнянь, що описують електропривод при умові $T_e = 0$.

Перехідний процес відбувається відповідно до природної механічної характеристики. Тому значення T_m для цього випадку обчислюємо таким чином:

$$T_m = J \frac{R_{\text{я}}}{(c\Phi_H)^2} = J/\beta_2 = 0,7 / 3,58 = 0,2 \text{ с.}$$

З механічних характеристик (рис. 2) отримаємо початкові та кінцеві значення координат:

$$\omega_{\text{поч}} = \omega_1 = 118,45 \text{ 1/с};$$

$$\omega_{кин} = \omega_2 = 159,58 \text{ 1/c};$$

$$M_{поч} = 181,28 \text{ Нм};$$

$$M_{кин} = M_c = 34,53 \text{ Нм}.$$

Підставляючи ці значення у формули для $\omega = f(t)$ та $M = f(t)$, отримаємо:

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_{кин} + (\omega_{поч} - \omega_{кин})e^{-\frac{t}{T_M}} = 159,58 + (118,45 - 159,58)e^{-\frac{t}{0,2}} = \\ &= 159,58 - 41,13 e^{-5t} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M &= M_{кин} + (M_{поч} - M_{кин})e^{-\frac{t}{T_M}} = 34,53 + (181,28 - 34,53)e^{-\frac{t}{0,2}} = \\ &= 34,53 + 146,75 e^{-5t} \end{aligned}$$

Вважаємо, що розрахунок перехідних процесів можна закінчувати для моменту часу $t_{пп} = 4 T_M = 4 \cdot 0,2 = 0,8 \text{ с}$.

Задаємось значеннями часу від 0 до 0,8 с. Результати розрахунків заносимо у таблицю (нумерація таблиць та рисунків у РГР робиться індивідуально).

Таблиця 3 – Результат розрахунку перехідних процесів

№ точки	t_i [с]	ω_i [1/с]	M_i [Нм]
1	0	118,45	181,28
2	0,1	134,48	124,05
3	0,2	144,36	88,86
4	0,3	150,53	66,82
5	0,4	153,82	55,08
6	0,6	157,52	41,87
7	0,8	158,76	37,47

За даними таблиці будемо графіки перехідних процесів (рис. 3).

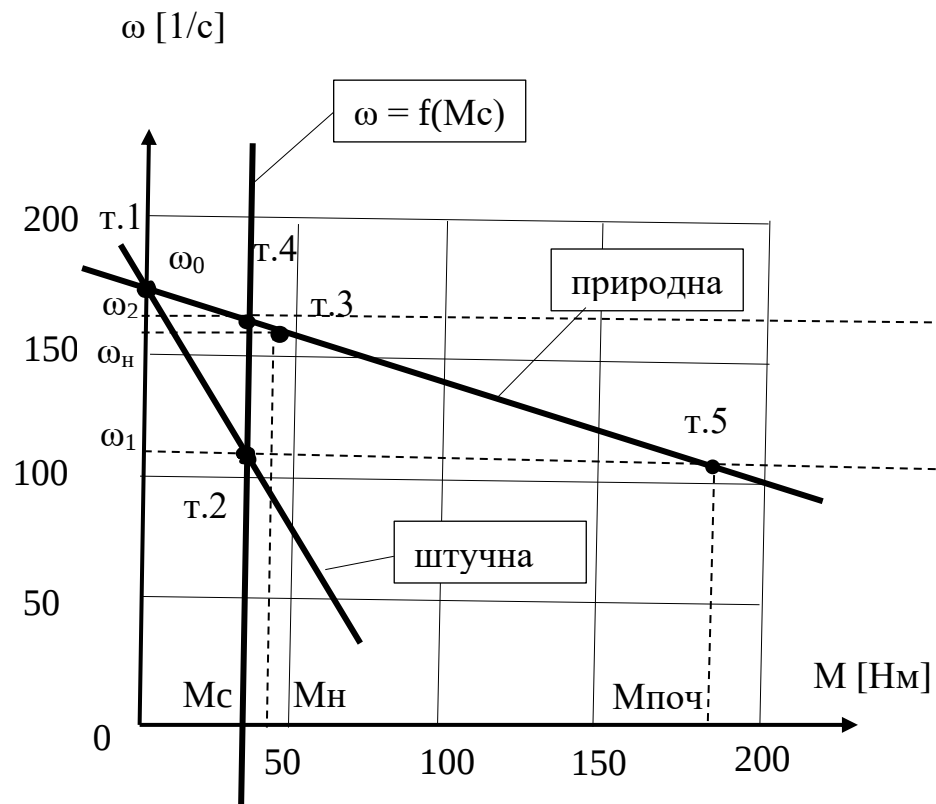


Рисунок 2 – Статичні механічні характеристики

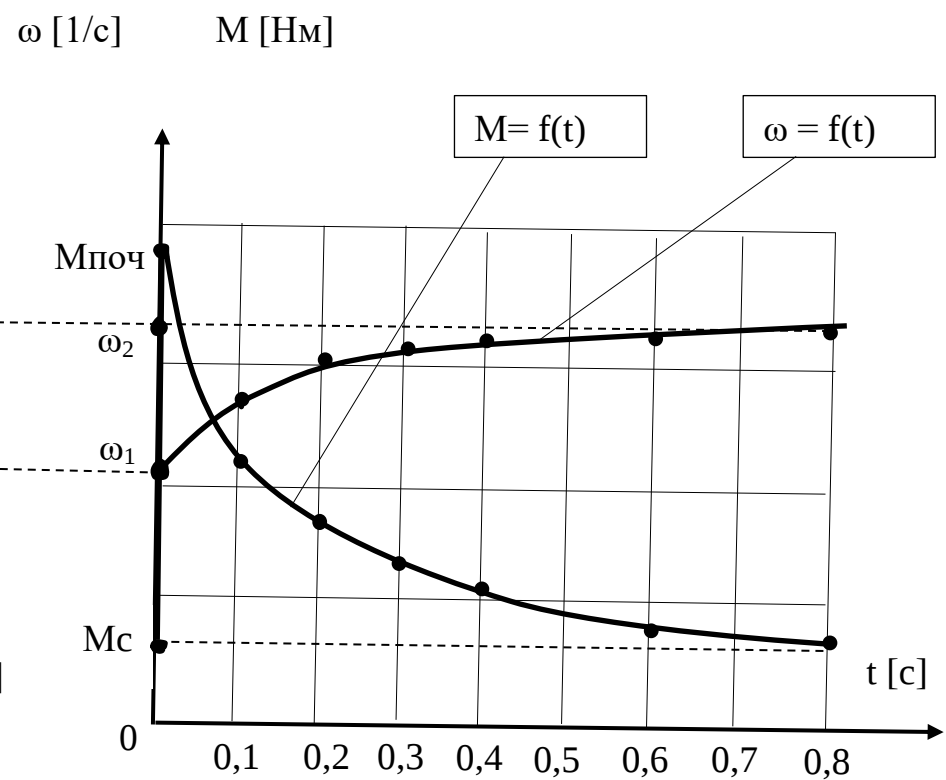


Рисунок 3 – Перехідні процеси

4) Аналіз енергетичних режимів.

Розрахунки показали, що як у статичних, так і у динамічних режимах, робочі точки двигуна знаходяться у першому квадранті механічної характеристики $\omega = f(M)$. Тобто, двигун весь час працює в рушійному режимі. В цьому режимі електрична енергія споживається від джерела, перетворюється у механічну енергію і частково у теплову енергію на активних опорах якірного кола.

3. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ «АД»

3.1. Підготовка до виконання завдання «АД»

Для виконання завдання АД треба опрацювати такі теоретичні дані:

- природна механічна характеристика АД; її побудова за формулою Клосса; знаходження параметрів двигуна, необхідних для розрахунків з номінальних даних та параметрів обмоток АД; штучні механічні характеристики при зміні напруги статора, частоти та додаванні додаткового опору у коло ротора АД з фазним ротором; робочі точки на механічних характеристиках АД; (джерела: [1, стор. 120-133], [2, стор. 193-198], [3, стор. 64-77], [4, стор. 175-199], [5, pages 65-77], [7, стор. 26-46] [8, лекція № 7]);

- гальмівні режими АД (рекуперативне гальмування, гальмування противмиканням, динамічне гальмування); умови потрапляння двигуна у гальмівний режим, відповідні механічні характеристики; (джерела: [1, стор. 151-153], [2, стор. 254-260], [3, стор. 77-80] [4, стор. 223-229, 93-94], [8, лекція № 8].

3.2. Методика розрахунку та побудови характеристик асинхронного двигуна

Механічна статична характеристика $\omega = f(M)$ асинхронного двигуна АД є нелінійною і має точки екстремуму. Зручніше використовувати механічну характеристику у форматі $s = f(M)$, де s – ковзання:

$$s = \frac{\omega_c - \omega}{\omega_c}$$

Синхронна кутова швидкість ω_c :

$$\omega_c = \frac{2\pi f_1}{p}$$

де f_1 – частота напруги живлення статора, Гц;

p – число пар полюсів двигуна.

Якщо відоме ковзання s , то швидкість легко знаходиться через вираз:

$$\omega = \omega_c(1 - s)$$

Аналітичний опис механічної характеристики $s = f(M)$ може бути отриманий з Г-подібної схеми заміщення фази АД. Це так звана формула Клосса:

$$M = \frac{2M_k(1 + s_k \frac{R_1}{R_2'})}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 s_k \frac{R_1}{R_2'}},$$

де

M – електромагнітний момент АД;

M_k – критичний момент АД;

s_k – критичне ковзання;

R_1 – активний опір обмотки статора;

R_2' - активний опір кола ротора, приведений до кола статора.

Якщо знехтувати активним опором статора ($R_1 = 0$), отримаємо спрощену формулу Клосса:

$$M \approx \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}$$

Надалі будемо працювати із спрощеною формулою Клосса.

Таким чином, щоб скористатися формулою Клосса для побудови механічних характеристик, необхідно знати M_k та s_k . Їх можна знайти двома способами: за параметрами обмоток та за номінальними даними.

Спосіб 1 (якщо у завданні надані параметри обмоток).

Критичний момент M_k (при умові $R_1 = 0$) знаходиться за формулою:

$$M_k \approx \frac{3U_{1\phi}^2}{2\omega_c X_k},$$

де

$U_{1\phi}$ – фазна напруга обмотки статора;

$X_k = X_1 + X_2'$ – сумарний індуктивний опір;

X_1 – індуктивний опір обмотки статора;

$X_2' = X_2 k_e^2$ – приведений індуктивний опір обмотки ротора;

k_e – коефіцієнт трансформації ЕРС.

Інколи замість коефіцієнта трансформації задають коефіцієнт приведення опорів: $k_r = k_e^2$. Тоді $X_2' = X_2 k_r$.

Критичне ковзання s_k знаходиться за формулою:

$$s_k \approx \frac{R_2'}{X_k},$$

де $R_2' = R_2 k_e^2$ – приведений активний опір кола ротора.

Спосіб 2 (якщо у завданні надані тільки номінальні дані)

Критичний момент M_k знаходиться через перевантажувальну здатність λ_m , тобто відношення критичного моменту M_k до номінального M_n . Цей параметр зазвичай задається разом з номінальними даними:

$$\lambda_m = M_k / M_n.$$

Звідси можна знайти M_k :

$$M_k = \lambda_m M_n.$$

Але перед тим необхідно обчислити номінальний електромагнітний момент M_n . Він знаходиться із припущення, що в номінальній робочій точці електромагнітний момент M_n приблизно на 5% більший, ніж механічний момент $M_{в.н}$ на валу АД. Тобто,

$$M_n = 1,05 P_n / \omega_n,$$

де

P_n – номінальна механічна потужність [Вт];

ω_n – номінальна кутова швидкість [1/с].

Значення ω_n знаходиться з формули

$$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60}.$$

Критичне ковзання s_k знаходять з номінальної робочої точки за такою формулою:

$$s_k \approx s_n (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1})$$

де s_n – номінальне ковзання:

$$s_n = \frac{\omega_c - \omega_n}{\omega_c}.$$

Але тут виникає запитання: де взяти значення синхронної швидкості ω_c , але ж його, як правило, не задають у номінальних даних. Звичайно, ω_c можна обчислити за формулою, але кількість пар полюсів обмотки статора також не завжди зазначена. Тому можна скористатися стандартними значеннями синхронних швидкостей, які наведені у таблиці 4 для стандартної частоти $f_1=50$ Гц та різної кількості пар полюсів p .

Таблиця 4 – Стандартний ряд синхронних швидкостей АД

p	n_c [об/хв]	ω_c [1/с]
1	3000	314
2	1500	157
3	1000	104,7

4	750	78,5
5	600	62,8

Якщо відома номінальна швидкість, синхронною швидкістю є швидкість з табл. 4, найближча до номінальної швидкості. Наприклад, якщо $\omega_n = 99,6$ 1/с, це означає, що $\omega_c = 104,7$ 1/с.

З формули Клосса випливає важлива властивість для реостатних механічних характеристик з різними опорами у колі ротора: для будь-якого сталого значення моменту M_i має місце співвідношення:

$$\frac{s_{1i}}{s_{2i}} = \frac{R_{21}}{R_{22}},$$

де

s_{1i} та s_{2i} – ковзання на відповідних характеристиках при M_i ;

$R_{21} = R_2 + R_{\text{дод}1}$; $R_{22} = R_2 + R_{\text{дод}2}$ – повні опори кола ротора.

Вочевидь, це співвідношення вірно також для $M = M_k$, тобто і для s_{ki} .

Наведена властивість проілюстрована на графіках рис. 4.

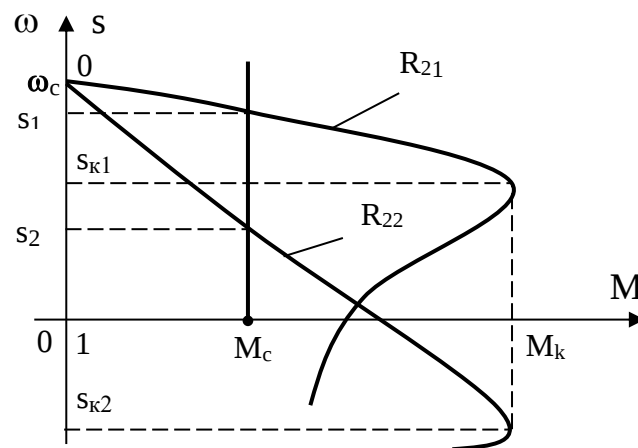


Рисунок 4 – Реостатні механічні характеристики.

У деяких випадках активний опір ротора двигуна R_2 може бути не задано. Тоді його можна обчислити з номінальних даних:

$$R_2 = s_{ном} \cdot R_{2ном} = s_{ном} \cdot E_{2н} / (\sqrt{3} \cdot I_{2н}).$$

Формула Клосса застосовується для знаходження необхідних за завданням координат, наприклад M або ω (через s) для певної точки характеристики. Для цього необхідно, щоб всі значення у формулі Клосса, крім того, яке треба знайти, були відомі для цієї точки.

Для розв'язку завдань, де є зміни частоти f_1 , необхідно пам'ятати, що для кожної механічної характеристики шкали осі s є різні, тобто точка ідеального холостого ходу ($\omega = \omega_c$ або $s = 0$) знаходиться на різних точках осі s для різних характеристик. Варто також враховувати те, що сумарний індуктивний опір $X_k = X_1 + X_2'$ змінюється пропорційно частоті f_1 . Це викликає необхідність подальшого перерахунку значень s_k та M_k , які залежать від X_k .

Для завдань, у яких є зміна порядку чергування фаз статора (реверс), необхідно прийняти до уваги, що шкала осі s також змінюється, бо ω_c змінює свій знак на протилежний.

Важливе зауваження для розрахунків.

Механічні характеристики АД мають дві точки екстремуму для різних ділянок характеристики, які мають фізичне обґрунтування. Наприклад, має місце два значення s_k , які відповідають формулі Клосса. Тому при розрахунках s або s_k за формулою Клосса необхідно розв'язувати квадратне рівняння, яке має 2 корені.

У деяких випадках обидва рішення є фізично правильними. Наприклад, одному й тому ж пусковому моменту M_n відповідають дві характеристики з різними значеннями активного опору $R_{2\Sigma}$ у колі ротора. У цьому випадку треба надати відповідні пояснення, а потім зосередитись на одній характеристиці і продовжувати розрахунки.

В інших випадках друге рішення може не мати фізичного змісту або може відноситись до неробочих ділянок характеристики. В цьому випадку необхідно

провести відповідний аналіз, дати пояснення та продовжувати розрахунки для «реального» значення.

Важливе зауваження для побудови механічних характеристик.

Вочевидь, механічну характеристику можна обчислити та побудувати у дуже широкому діапазоні зміни s (теоретично від $s = \infty$ до $s = -\infty$). Тому розрахунок та побудову графіків треба обмежити діапазоном s , який відповідає умовам завдання. Теж саме стосується і квадрантів системи координат $\omega = f(M)$ $s = f(M)$. Тобто, побудову механічних характеристик вести тільки у тих квадрантах, які відповідають завданню.

3.3. Приклад виконання завдання «АД»

Задано:

Асинхронний двигун має такі номінальні дані:

- номінальна потужність $P_n = 17.5$ кВт;
- номінальна частота обертання $n_n = 945$ об/хв;
- номінальна напруга статора $U_{1n} = 380$ В;
- номінальний струм статора $I_{1n} = 26,5$ А;
- активний опір фази статора $R_1 = 0,34$ Ом;
- реактивний опір фази статора $X_1 = 0,43$ Ом;
- номінальна ЕРС ротора $E_{2n} = 310$ В;
- номінальний струм ротора $I_{2n} = 36$ А;
- активний опір фази ротора $R_2 = 0,12$ Ом;
- реактивний опір фази ротора $X_2 = 0,25$ Ом;
- перевантажувальна здатність $\lambda = 3,1$;
- коефіцієнт приведення ЕРС $k_c = 2,66$

Приведений момент навантаження $M_c = 0,5 M_n$.

Двигун працює на штучній реостатній характеристиці при $R_{\text{дод}} = 0,1$ Ом. Релейно-контактна схема керування шунтує додатковий опір, переводячи двигун на природну характеристику.

Необхідно:

1. Побудувати штучну та природну статичні механічні характеристики.
2. Визначити статичну швидкість на штучній характеристиці.
3. Знайти статичну швидкість на природній характеристиці.
4. Знайти початковий момент $M_{\text{поч}}$ при переході на природну механічну характеристику.

Розв'язок:

1) Припущення.

Для спрощення знехтуємо активним опором статора, вважаючи $R_1 = 0$. Тому надалі будемо використовувати спрощені формули.

2) Визначення загальних параметрів, необхідні для подальших розрахунків.

- номінальна кутова швидкість:

$$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 945}{60} = 98,91 \text{ 1/с}$$

- синхронна кутова швидкість:

$\omega_c = 104,7 \text{ 1/с}$ у відповідності до стандартної шкали синхронних швидкостей

- номінальний електромагнітний момент двигуна:

$$M_n = 1,05 P_n / \omega_n = 1,05 \cdot 17500 / 98,91 = 185,77 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

- приведений активний опір ротора:

$$R'_2 = R_2 k_e^2 = 0,12 \cdot (2,66)^2 = 0,85 \text{ Ом}$$

- приведений реактивний опір ротора:

$$X'_2 = X_2 k_e^2 = 0,25 \cdot (2,66)^2 = 1,77 \text{ Ом}$$

- сумарний індуктивний опір:

$$X_k = X_1 + X'_2 = 0,43 + 1,77 = 2,2 \text{ Ом}$$

3) Визначення параметрів для розрахунку природної характеристики.

Знайдемо критичне ковзання $s_{кп}$ та критичний момент $M_{кп}$ для природної характеристики.

$$s_{кп} = \frac{R'_2}{X_k} = 0,85 / 2,2 = 0,39$$

Враховуємо, що у формулі для M_k напруга статора повинна бути фазною, тобто $U_{1ф} = 220$ В.

$$M_{кп} = \frac{3U_{1ф}^2}{2\omega_c X_k} = 3 \cdot (220)^2 / (2 \cdot 104,7 \cdot 2,2) = 315,18 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

4) Визначення параметрів для розрахунку штучної характеристики.

Знайдемо критичне ковзання $s_{кш}$ та критичний момент $M_{кш}$ для штучної характеристики.

- приведений додатковий опір у роторі:

$$R'_{\text{дод}} = R_{\text{дод}} \cdot k_e^2 = 0,1 \cdot (2,66)^2 = 0,71 \text{ Ом}$$

- приведений сумарний опір кола ротора (позначимо його через $R'_{2\Sigma}$):

$$R'_{2\Sigma} = R'_2 + R'_{\text{дод}} = 0,85 + 0,71 = 1,56 \text{ Ом.}$$

Тепер

$$s_{кш} = \frac{R'_{2\Sigma}}{X_k} = 1,56 / 2,2 = 0,71$$

Критичний момент M_k не залежить від додаткового опору, тому

$$M_{кш} = M_{кп} = 315,18 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

5) Розрахунок природної характеристики.

За спрощеною формулою Клосса отримаємо:

$$Mi = \frac{2M_{кп}}{\frac{s_i}{s_{кп}} + \frac{s_{кп}}{s_i}} = \frac{2 \cdot 315,18}{\frac{s_i}{0,39} + \frac{0,39}{s_i}} = \frac{630,36}{\frac{s_i}{0,39} + \frac{0,39}{s_i}}$$

Задаємось значеннями ковзання s_i та розраховуємо значення M_i .
 Корисно включити до розрахунку значення критичного ковзання $s_{кп}$.
 Відповідні значення кутової швидкості розраховуються як

$$\omega_i = \omega_c(1 - s_i) = 104,7 \cdot (1 - s_i).$$

Результати розрахунків зводимо до таблиці 5 (нумерацію таблиць та рисунків у РГР робити індивідуально), за якою будується природна механічна характеристика.

Таблиця 5 – Результати розрахунку природної механічної характеристики

s_i	$M_i, \text{Нм}$	$\omega_i, \text{рад/с}$
0	0	104,7
0,01	16,2	103,7
0,05	79,5	99,5
0,1	151,5	94,2
0,2	256,2	83,8
0,39	315,18	63,9
0,6	287,8	41,9
0,8	248,2	20,9
1,0	213,7	0

б) Розрахунок штучної характеристики при $R_{\text{дод}}$.

За спрощеною формулою Клосса отримаємо:

$$M_i = \frac{2M_{кш}}{\frac{s_i}{s_{кш}} + \frac{s_{кш}}{s_i}} = \frac{2 \cdot 315,18}{\frac{s_i}{0,71} + \frac{0,71}{s_i}} = \frac{630,36}{\frac{s_i}{0,71} + \frac{0,71}{s_i}}$$

Задаємось значеннями ковзання s_i та розраховуємо значення M_i .
 Корисно включити до розрахунку значення критичного ковзання $s_{кш}$.
 Відповідні значення кутової швидкості розраховуються як

$$\omega_i = \omega_c(1 - s_i) = 104,7 \cdot (1 - s_i).$$

Результати розрахунків зводимо до таблиці 6, за якою будується штучна механічна характеристика.

Таблиця 6 – Результати розрахунку штучної механічної характеристики

s_i	$M_i, \text{Нм}$	$\omega_i, \text{рад/с}$
0	0	104,7
0,01	8,88	103,7
0,05	44,1	99,5
0,1	87,1	94,2
0,3	225,9	73,3
0,5	297,3	52,4
0,71	315,18	30,4
0,8	312,1	29,9
0,9	310,5	10,3
1,0	297,3	0

7) Розрахунок статичної швидкості на штучній характеристиці.

Позначимо цю швидкість через ω_1 , а відповідне ковзання через s_1 .

У статичному режимі $M=M_c$. Відповідна робоча точка на механічних характеристиках буде позначена як «т.1».

Формула Клосса для т.1:

$$M_c = \frac{2M_{\text{кш}}}{\frac{s_1}{s_{\text{кш}}} + \frac{s_{\text{кш}}}{s_1}}.$$

Обчислимо M_c :

$$M_c = 0.5 M_H = 0.5 \cdot 185,77 = 92,9 \text{ Нм}$$

Тепер всі значення, окрім s_1 , відомі. Вираз формули Клосса для т.1 буде таким:

$$92,9 = \frac{2 \cdot 315,18}{\frac{s_1}{0,71} + \frac{0,71}{s_1}}$$

Звідси отримаємо квадратне рівняння для знаходження s_1 :

$$s_1^2 - 4.82 s_1 + 0.5 = 0.$$

Розв'язавши його, отримаємо два дійсні корені:

$$s_{11} = 0,106;$$

$$s_{12} = 4,71.$$

Обидва корені мають фізичне і математичне обґрунтування: існує дві точки на механічній характеристиці, які відповідають значенню $M=M_c$. Але значенню $s_{12} = 4,71$ відповідає точка у 4-му квадранті на неробочій ділянці характеристики. Тому відкидаємо це значення та приймаємо $s_1 = 0,106$.

Відповідна статична швидкість:

$$\omega_1 = \omega_c (1 - s_1) = 104,7 (1 - 0,106) = 93,6 \text{ 1/с.}$$

8) Розрахунок статичної швидкості на природній характеристиці.

Позначимо цю швидкість через ω_2 , а відповідне ковзання через s_2 .

У статичному режимі $M=M_c$. Відповідна робоча точка на механічних характеристиках буде позначена як «т.2».

Формула Клосса для т.2:

$$M_c = \frac{2M_{кп}}{\frac{s_2}{s_{кп}} + \frac{s_{кп}}{s_2}}.$$

Вираз формули Клосса для т.2 буде таким:

$$92,9 = \frac{2 \cdot 315,18}{\frac{s_2}{0,39} + \frac{0,39}{s_2}}$$

Звідси отримаємо квадратне рівняння для знаходження s_2 :

$$s_1^2 - 2,65 s_1 + 0,15 = 0.$$

Розв'язавши його, отримаємо два дійсні корені:

$$s_{21} = 0,058; s_{22} = 2,59.$$

Приймаємо $s_2 = 0,058$.

Відповідна статична швидкість:

$$\omega_2 = \omega_c (1 - s_2) = 104,7 (1 - 0,058) = 98,6 \text{ 1/с.}$$

9) Розрахунок початкового моменту $M_{поч}$ при переході на природну механічну характеристику.

Перехід на природну характеристику відбувається стрибком з точки 1 на штучній характеристиці при швидкості $\omega_1 = 93,6$ 1/с та при ковзанні $s_1 = 0,106$.

Позначимо відповідну точку на природній характеристиці як «т.3». Напишемо формулу Клосса для цієї точки і знайдемо $M_{\text{поч}}$:

$$M_{\text{поч}} = \frac{2M_{\text{кп}}}{\frac{s_1}{s_{\text{кп}}} + \frac{s_{\text{кп}}}{s_1}} = \frac{2 \cdot 315,18}{\frac{0,106}{0,39} + \frac{0,39}{0,106}} = 159,6 \text{ Нм.}$$

10) Побудова графіків механічних характеристик.

За даними таблиць 5 та 6 будуюмо графіки механічних характеристик, зображених на рис. 5.

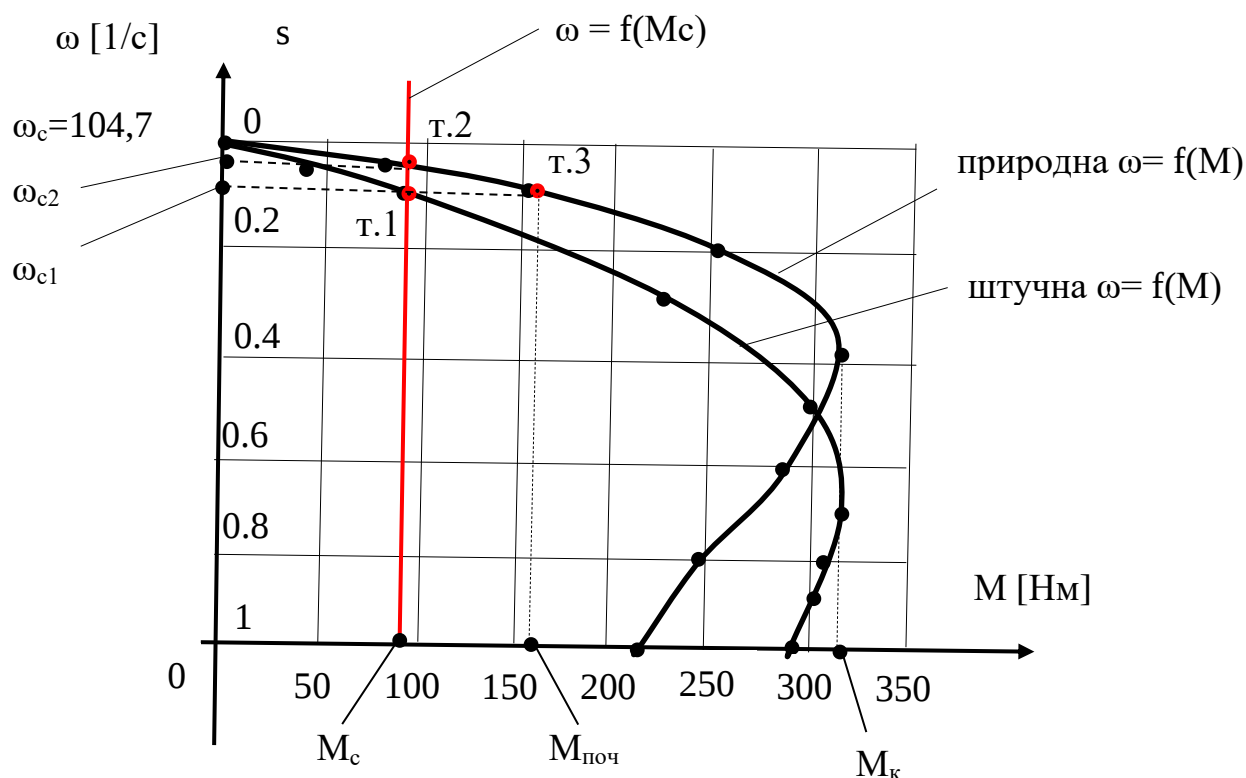


Рисунок 5 – Графіки механічних характеристик АД.

4. ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ РОБОТИ

Розрахункова робота оформлюється на аркушах паперу формату А4. Текст та інші матеріали пояснювальної записки розміщується з однієї сторони аркушів паперу.

Пояснювальна записка виконується в редакторі Word: шрифт Times New Roman, розмір 14; інтервал 1,5 рядка; ліве поле аркуша паперу 3 см, верхнє та нижнє 2 см, праве 1,5 см; нумерація сторінок проставляється вгорі праворуч (на титульному аркуші номер сторінки не вказується).

Формули представляються в будь-якому редакторі формул. Нумерація формул робиться тільки у тому випадку, коли на номер формули робиться посилання у подальшому тексті.

Розрахунки за формулами представляються у вигляді: формула - числові значення змінних - результат. Обов'язково вказуються одиниці вимірювання змінних.

Розрахунки повинні бути зведені у таблиці, за якими виконуються малюнки і графіки за допомогою будь-яких засобів створення графіків.

Рисунки та таблиці необхідно пронумерувати та дати їм відповідну назву. Перед появою рисунку або таблиці у тексті треба зробити відповідне посилання, наприклад, «*на рис. X наведено ...*», «*результати розрахунку зведено до таблиці Y*». Назва таблиці надається над таблицією, а назва рисунку – під рисунком по центру рядка.

Пояснювальна записка роботи складається з титульного листа, змісту та відповідних розділів/підрозділів. Розділи/підрозділи повинні відображати послідовність розрахунків. Рекомендується застосувати автоматичне створення змісту у Word.

Робота повинна мати коректні посилання на використані джерела інформації відповідно до ДСТУ. Тобто, необхідно відобразити, яка інформація отримана і звідки для розрахунків. Посилання на «студентські» джерела (сайти, реферати, курсові роботи тощо) не дозволяються.

Одним з ключових аспектів РГР є наявність пояснень. Тобто, необхідно текстуально пояснювати свої дії та результати. Не буде зайвим нагадати, що РГР виконується самостійно. Елементи плагіату категорично не дозволяються.

РГР виконується у відповідності з графіком виконання, узгодженим студентами та викладачем.

Після виконання роботи, студент захищає її у форматі відеоконференції, відповідає на запитання викладача та інших студентів.

5. ДЕЯКІ ПРАКТИЧНІ ПОРАДИ ДО ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ

По-перше, треба дуже уважно прочитати та обдумати завдання. Звернути увагу на характер статичного моменту M_c (активний чи реактивний). Чітко зрозуміти, який саме параметр двигуна змінюється для одержання штучних статичних характеристик.

По-друге, дуже корисно намалювати на чернетці (тобто, поки що без розрахунків) відповідні характеристики. Позначити на малюнку відповідні робочі точки. Така візуалізація завдання допомагає чітко зрозуміти, що задано і що саме треба знайти.

По-третє, корисно подивитись розв'язок схожих завдань, задач та прикладів, які викладені у наведених джерелах, наприклад [10], [11], [12].

Нарешті, намагайтеся «персоніфікувати» роботу. Тобто, уникайте стандартних формулювань та фраз, взятих з джерел інформації, в тому числі з цього посібника. Опис того, *що* і *як* ви робите у РГР, робіть самостійно своїми словами. Цим ви покращите якість роботи і продемонструєте самостійність виконання.

6. РЕЙТИНГОВА ОЦІНКА ВИКОНАННЯ РГР

Дивіться РСО до робочої навчальної програми з дисципліни «Електропривод».

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Теорія електропривода: Підручник/ За ред. М.Г. Поповича.- К.: Вища школа, 1993.
2. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат; 1986, російською мовою.
3. Основи електроприводу: Підручник / Ю.М. Лавріненко, О.Ю. Синявський, В.В. Савченко; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К. 2010.
4. Конспект лекцій "Теорія електропривода-1" для студентів денної форми навчання напряму підготовки 6.050702-"Електромеханіка" / Уклад. Островерхов М.Я. – К.: НТУУ "КПІ", 2010.
5. Electrical Drives. Principles-Planning-Applications-Solutions. Jens Weidauer, Richard Messer / Siemens, 2015, англійською мовою.
6. Електропривод: Механіка електроприводу. Електромеханічне перетворення енергії та електромеханічні властивості двигунів постійного струму: Навчальний посібник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.М. Пижов, Н.Д. Красношاپка, М.Я. Островерхов. – К.: 2020.
7. Електричні машини та електропривод: Розрахункова робота: Навчальний посібник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізації «Автоматизація хіміко-технологічних процесів і виробництва» / М. Я. Островерхов; Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 76 с.

8. Пакет PowerPoint презентацій лекцій з дисципліни «Електропривод» для електроенергетичних спеціалізацій спеціальності 141-Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, Уклад. В.М. Пижов - К.: НТУУ-КПІ, 2020 (рукопис).
9. Теорія електроприводу - 1, розділ «Динаміка розімкнених електромеханічних систем»: конспект лекцій для студентів напрямку підготовки 6.050702 «Електромеханіка» спеціальності «Електричні машини і апарати» / Уклад. В.М.Пишов – К.: НТУУ-КПІ, 2014, (рукопис).
10. Булгар В.В. Теорія електроприводу: збірник задач. Одеса, Поліграф, 2006 – 408 с.
11. Зеленов А.Б. Теорія електропривода: Методика проектування електроприводів: Підручник. – Луганськ: Вид-во "Ноулідж", 2010. – 670 с.
12. Піцан Р., Бардачевський В., Бойчук Б. Збірник задач до курсу «Електропривод». Навчальний посібник. – Львів: Видавництво державного університету «Львівська політехніка», 1999. – 426 с.

ДОДАТОК 1. ЗАВДАННЯ «ДПС»

Завдання ДПС 1.

Задано:

Двигун постійного струму з незалежним збудженням (ДПС з НЗ) має такі номінальні дані:

- номінальна потужність $P_n = 46$ кВт;
- номінальна швидкість $n_n = 625$ об/хв.;
- номінальна напруга якоря $U_n = 220$ В;
- номінальний струм якоря $I_n = 233$ А;
- активний опір якоря $R_a = 0,03$ Ом;
- приведений момент інерції механічної частини $J = 12,5$ кгм².

Двигун працює на природній механічній характеристиці, підіймаючи вантаж. Приведений активний статичний момент $M_c = 0,8 M_n$.

Необхідно:

7. Визначити швидкість підйому вантажу.
8. Знайти додатковий опір $R_{\text{дод}}$ який треба увімкнути в якірний ланцюг, щоб виконати спуск того ж самого вантажу з швидкістю $n_{\text{сп}} = -n_n$.
9. Визначити також початковий момент $M_{\text{поч}}$ при переході на штучну механічну характеристику.
10. Побудувати природну та відповідну штучну статичні механічні характеристики.
11. Побудувати перехідні процеси $\omega = f(t)$ та $M = f(t)$ при переході у нову статичну робочу точку.
12. Дати оцінку енергетичним режимам електричної машини при переході до нової статичної точки.

Завдання ДПС 2.

Задано:

Двигун постійного струму з незалежним збудженням має такі номінальні дані:

номінальна потужність $P_H = 5,4$ кВт;

номінальна швидкість $n_H = 1000$ об/хв.;

номінальна напруга якоря $U_H = 220$ В;

номінальний струм якоря $I_H = 27$ А;

активний опір якоря $R_{\text{я}} = 0,2$ Ом.

приведений момент інерції механічної частини $J = 1,8$ кгм².

Двигун працює на природній механічній характеристиці. Приведений активний статичний момент $M_c = 0,7 M_H$.

Необхідно:

1. Обчислити швидкість роботи на природній характеристиці.
2. Знайти, який додатковий опір $R_{\text{дод}}$ треба увімкнути в якірний ланцюг при переводі у режим динамічного гальмування, щоб максимальний гальмівний момент був $M_{\text{гmax}} = -2M_H$
3. Знайти швидкість після закінчення перехідного процесу.
4. Побудувати природну та відповідну штучну статичні механічні характеристики.
5. Побудувати перехідні процеси $\omega = f(t)$ та $M = f(t)$ при переході у нову статичну робочу точку.

Завдання ДПС 3.

Задано:

Двигун постійного струму з незалежним збудженням має такі номінальні дані:

номінальна потужність $P_n = 9$ кВт;

номінальна швидкість $n_n = 900$ об/хв.;

номінальна напруга якоря $U_n = 220$ В;

номінальний струм якоря $I_n = 48$ А;

активний опір якоря $R_a = 0,3$ Ом.

приведений момент інерції механічної частини $J = 3,1$ кгм².

Двигун працює на природній механічній характеристиці з приведеним реактивним статичним моментом $M_c = 0,5 M_n$. Струм збудження зменшили стрибком із $I_z = I_{zn}$ до $I_{z1} = 0,7 I_{zn}$.

Необхідно:

1. Визначити швидкість на природній характеристиці.
2. Побудувати природну та відповідну штучну механічну характеристики.
3. Знайти швидкість, що відповідає новій робочій точці двигуна.
4. Знайти струм якоря у новій робочій точці двигуна та порівняти його із струмом якоря у вихідній робочій точці.
5. Побудувати перехідні процеси $\omega = f(t)$ та $M = f(t)$ при переході у нову статичну робочу точку.

Завдання ДПС 4.

Задано:

Двигун постійного струму з незалежним збудженням має такі номінальні дані:

номінальна потужність $P_n = 11 \text{ кВт}$;

номінальна швидкість $n_n = 2200 \text{ об/хв.}$;

номінальна напруга якоря $U_n = 220 \text{ В}$;

номінальний струм якоря $I_n = 56 \text{ А}$;

активний опір якоря $R_a = 0,109 \text{ Ом}$.

максимальний допустимий струм $I_{\text{доп}} = 3 I_n$

приведений момент інерції механічної частини $J = 1,2 \text{ кгм}^2$.

Двигун працює на природній механічній характеристиці з приведеним реактивним статичним моментом $M_{cl} = 35 \text{ Нм}$. Двигун реверсується зміною полярності напруги на якорі.

Необхідно:

1. Знайти швидкість у початковій статичній точці.
2. Обчислити додатковий опір $R_{\text{дод}}$, який треба ввімкнути у якірне коло при реверсі, щоб максимальний струм був $I_{\text{max}} = I_{\text{доп}}$.
3. Побудувати природну та відповідну штучну статичні механічні характеристики.
4. Знайти швидкість у новій робочій точці.
5. Побудувати перехідні процеси $\omega = f(t)$ та $M = f(t)$ при переході у нову статичну робочу точку.
6. Дати оцінку енергетичним режимам електричної машини при переході до нової статичної точки.

Завдання ДПС 5.

Задано:

Двигун постійного струму з незалежним збудженням має такі номінальні дані:

- номінальна потужність $P_H = 3$ кВт;
- номінальна швидкість $n_H = 1000$ об/хв.;
- номінальна напруга якоря $U_H = 220$ В;
- номінальний струм якоря $I_H = 18.1$ А;
- активний опір якоря $R_{\text{я}} = 1.52$ Ом;
- активний опір обмотки збудження $R_{\text{зб}} = 138$ Ом;
- приведений момент інерції механічної частини $J = 0,7$ кгм².

Двигун працює на природній механічній характеристиці з приведеним реактивним статичним моментом $M_c = 0.3 M_H$.

Необхідно:

1. Знайти швидкість ω_{c1} у початковій робочій точці.
2. Визначити додатковий опір, який треба ввімкнути у коло збудження, щоб одержати швидкість $n_{c2} = 4000$ об/хв на штучній характеристиці.
3. Знайти струми якоря у початковій та новій робочих точках.
4. Побудувати природну та відповідну штучну механічні характеристики.
5. Побудувати перехідні процеси $\omega = f(t)$ та $M = f(t)$ при переході у нову статичну робочу точку .

Завдання ДПС 6.

Задано:

Двигун постійного струму з незалежним збудженням має такі номінальні дані:

- номінальна потужність $P_n = 23$ кВт;
- номінальна швидкість $n_n = 2000$ об/хв.;
- номінальна напруга якоря $U_n = 440$ В;
- номінальний струм якоря $I_n = 63$ А;
- активний опір якоря $R_a = 0,73$ Ом;
- приведений момент інерції механічної частини $J = 2,4$ кгм².

Двигун працює на штучній механічній характеристиці з додатковим опором $R_{\text{дод}} = 10$ Ом. Приведений статичний момент $M_{c1} = 0.5 M_n$ (активний). Статичний момент змінюється стрибком до $M_{c2} = M_n$.

Необхідно:

1. Знайти швидкість у початковій робочій точці.
2. Побудувати статичну механічну характеристику.
3. Знайти швидкість у новій робочій точці.
4. Побудувати перехідні процеси $\omega = f(t)$ та $M = f(t)$ при переході у нову статичну робочу точку.
5. Дати оцінку енергетичним режимам електричної машини при переході до нової статичної точки.

Завдання ДПС 7.

Задано:

Двигун постійного струму з незалежним збудженням має такі номінальні дані:

номінальна потужність $P_H = 30$ кВт;

номінальна швидкість $n_H = 1060$ об/хв.;

номінальна напруга якоря $U_H = 220$ В;

номінальний струм якоря $I_H = 161$ А;

активний опір якоря $R_{\text{я}} = 0,0687$ Ом.

приведений момент інерції механічної частини $J = 15,1$ кгм².

Необхідно:

1. Визначити додаткові опори, які потрібно ввімкнути в коло якоря, щоб забезпечити роботу електроприводу у таких статичних робочих точках:
Точка 1: $n_1 = 300$ об/хв; $M_{c1} = 51$ Нм;
Точка 2: $n_2 = 600$ об/хв; $M_{c2} = 110$ Нм;
Точка 3: $n_3 = 900$ об/хв; $M_{c3} = 170$ Нм;
2. Побудувати відповідні механічні статичні характеристики.
3. Побудувати перехідні процеси $\omega = f(t)$ та $M = f(t)$ при переході з т.1 у т.2.

Завдання ДПС 8.

Задано:

Двигун постійного струму з незалежним збудженням має такі номінальні дані:
номінальна потужність $P_n = 37$ кВт;
номінальна швидкість $n_n = 1000$ об/хв.;
номінальна напруга якоря $U_n = 220$ В;
номінальний струм якоря $I_n = 198$ А;
активний опір якоря $R_a = 0,082$ Ом.
приведений момент інерції механічної частини $J = 7,2$ кгм².

Двигун працює на природній механічній характеристиці з приведеним активним статичним моментом $M_c = 0,63 M_n$.
Змінюють полярність на якорі та додають у коло якоря додатковий опір $R_{\text{дод}} = 1,7$ Ом.

Необхідно:

1. Знайти швидкість у початковій робочій точці.
2. Знайти початковий стрибок струму якоря та моменту.
3. Побудувати природну та відповідну штучну статичні механічні характеристики.
4. Визначити швидкість, яку розвине двигун після закінчення перехідного процесу.
5. Побудувати перехідні процеси $\omega = f(t)$ та $M = f(t)$ при переході у нову статичну робочу точку .
6. Дати оцінку енергетичним режимам електричної машини при переході до нової статичної точки.

Завдання ДПС 9.

Задано:

Двигун постійного струму з незалежним збудженням має такі номінальні дані:
номінальна потужність $P_n = 10$ кВт;
номінальна швидкість $n_n = 1000$ об/хв.;
номінальна напруга якоря $U_n = 220$ В;
номінальний струм якоря $I_n = 55$ А;
активний опір якоря $R_a = 0,279$ Ом.
приведений момент інерції механічної частини $J = 1,9$ кгм².

Двигун працює на природній механічній характеристиці з навантаженням $M_c = 0,71 M_n$. Стрибком змінюють напругу на якорі $U_1 = 0,6 U_n$.

Необхідно:

1. Визначити швидкість на природній характеристиці.
2. Знайти початковий стрибок моменту та струму якоря.
3. Побудувати природну та відповідну штучну статичні механічні характеристики.
4. Визначити швидкість, яку розвине двигун після закінчення перехідного процесу.
5. Побудувати перехідні процеси $\omega = f(t)$ та $M = f(t)$ при переході у нову статичну робочу точку .
6. Дати оцінку енергетичним режимам електричної машини при переході до нової статичної точки.

Завдання ДПС 10.

Задано:

Двигун постійного струму з незалежним збудженням має такі номінальні дані:

номінальна потужність $P_n = 8$ кВт;

номінальна швидкість $n_n = 1060$ об/хв.;

номінальна напруга якоря $U_n = 220$ В;

номінальний струм якоря $I_n = 43.8$ А;

активний опір якоря $R_a = 0,303$ Ом.

приведений момент інерції механічної частини $J = 0,85$ кгм².

Електричний транспортний засіб рухається вгору з певним нахилом дороги.

Приведений статичний момент $M_{c1} = 0,5$ Мн. В деякий момент часу рельєф дороги змінюється, і транспортний засіб починає рухатись вниз з нахилом, що складає 120% від нахилу при підйомі.

Необхідно:

1. Визначити швидкість підйому.
2. Побудувати природну та відповідну штучну статичні механічні характеристики.
3. Визначити швидкість спуску.
4. Побудувати перехідні процеси $\omega = f(t)$ та $M = f(t)$ при переході у нову статичну робочу точку .
5. Дати оцінку енергетичним режимам електричної машини при переході до нової статичної точки.

ДОДАТОК 2. ЗАВДАННЯ «АД»

Завдання АД 1.

Задано:

Асинхронний двигун має такі номінальні дані:

- номінальна потужність $P_n = 11 \text{ кВт}$;
- номінальна швидкість $n_n = 953 \text{ об/хв}$;
- номінальна напруга статора $U_{1n} = 380 \text{ В}$;
- номінальний струм статора $I_{1n} = 28,4 \text{ А}$;
- активний опір фази статора $R_1 = 0,415 \text{ Ом}$;
- реактивний опір фази статора $X_1 = 0,465 \text{ Ом}$;
- номінальна ЕРС ротора $E_{2n} = 200 \text{ В}$;
- номінальний струм ротора $I_{2n} = 35,4 \text{ А}$;
- активний опір фази ротора $R_2 = 0,132 \text{ Ом}$;
- реактивний опір фази ротора $X_2 = 0,27 \text{ Ом}$;
- перевантажувальна здатність $\lambda = 3,1$;
- коефіцієнт приведення ЕРС $k_e = 1,84$

Приведений момент навантаження $M_c = 0,4 M_n$.

Необхідно:

1. Визначити швидкості двигуна на природній механічній характеристиці та на штучній при $U_1 = 0,8 U_{1n}$.
2. Побудувати природну та відповідну штучну статичні механічні характеристики.
3. Визначити значення початкового моменту $M_{\text{поч}}$ при переході з природної характеристики на штучну.

Завдання АД 2.

Задано:

Асинхронний двигун має такі номінальні дані

номінальна потужність $P_n=5,3$ кВт;

номінальна швидкість $n_n=885$ об/хв;

номінальна напруга статора $U_{1n}=380/220$ В;

активний опір фази статора $R_1=1,61$ Ом;

реактивний опір фази статора $X_1=1,14$ Ом;

активний опір фази ротора $R_2=0,603$ Ом;

реактивний опір фази ротора $X_2=0,625$ Ом;

коефіцієнт приведення опору $k_R=9,6$

Приведений момент навантаження $M_c=0,8 M_n$.

Необхідно:

1. Побудувати природну механічну характеристику.
2. Знайти швидкість на природній характеристиці.
3. Побудувати штучну механічну характеристику при законі керування $U_1/f_1 = \text{const}$ для $U_1=0,5 U_{1n}$; $f_1=0,5 f_{1n}$.
4. Знайти значення моменту при переході на штучну характеристику.
5. Знайти швидкість на штучній характеристиці.
6. Оцінити енергетичні режими при переході у нову робочу точку.

Завдання АД 3.

Задано:

асинхронний двигун МТ-71-10 має такі номінальні дані:

номінальна потужність $P_n=80$ кВт;

номінальна швидкість $n_n=582$ об/хв;

номінальна напруга статора $U_{1n}=380$ В;

номінальна ЕРС ротора $E_{2n}=294$ В;

номінальний струм ротора $I_{2n}=167$ А;

перевантажувальна здатність $\lambda=3,3$;

Приведений момент навантаження $M_c=0,6 M_n$. Двигун працює на природній механічній характеристиці.

Необхідно:

1. Знайти швидкість у вихідній робочій точці.
2. Знайти $R_{\text{дод}}$, який необхідно ввести у коло ротора, щоб статична швидкість двигуна стала $n_{c2}=400$ об/хв.
3. Побудувати природну та відповідну штучну статичні механічні характеристики.
4. Знайти початковий момент при переході на штучну характеристику.

Завдання АД 4.

Задано:

Асинхронний двигун має такі номінальні дані

номінальна потужність $P_n = 11 \text{ кВт}$;

номінальна швидкість $n_n = 953 \text{ об/хв.}$;

номінальна напруга статора $U_{1n} = 380 \text{ В}$;

номінальна ЕРС ротора $E_{2n} = 220 \text{ В}$;

номінальний струм ротора $I_{2n} = 35 \text{ А}$;

перевантажувальна здатність $\lambda = 3,1$;

Приведений статичний момент $M_c = 0,8 M_n$.

Необхідно:

1. Визначити, який додатковий опір $R_{\text{дод}}$ необхідно ввести в ланцюг ротора, щоб пусковий момент двигуна дорівнював $M_n = 0,9 M_k$?
2. Побудувати природну та відповідну штучну статичні механічні характеристики.
3. Знайти статичні швидкості на природній та штучній механічних характеристиках.
4. Знайти початковий момент двигуна при переході на штучну характеристику.

Завдання АД 5.

Задано:

Асинхронний двигун з фазним ротором шахтного підйомника має такі номінальні дані:

- номінальна потужність $P_n=850$ кВт;
- номінальна швидкість $n_n=590$ об/хв.;
- номінальна напруга статора $U_{1n}=6000$ В;
- номінальна ЕРС ротора $E_{2n}=1150$ В;
- номінальний струм ротора $I_{2n}=450$ А;
- перевантажувальна здатність $\lambda=2,5$

Двигун працює на природній механічній характеристиці із статичною швидкістю $n_{c1} = 596$ об/хв., під час підйому вантажу.

Необхідно:

1. Визначити, який додатковий опір $R_{\text{дод}}$ необхідно ввести в ланцюг ротора, щоб здійснити спуск того ж самого вантажу в режимі гальмування противмиканням з статичною швидкістю $n_{c2} = -596$ об/хв.
2. Побудувати природну та відповідну штучну статичні механічні характеристики.
3. Знайти приведений статичний момент M_c .
4. Знайти момент $M_{\text{поч}}$ при переході на нову механічну характеристику.
5. Знайти пусковий момент $M_{\text{п}}$ на штучній характеристиці.

Завдання АД 6.

Задано:

Асинхронний двигун АК 112-8 має такі номінальні дані:

- номінальна потужність $P_n=160$ кВт;
- номінальна швидкість $n_n=735$ об/хв.;
- номінальна напруга статора $U_{1n}=380$ В;
- номінальна ЕРС ротора $E_{2n}=332$ В;
- номінальний струм ротора $I_{2n}=302$ А;
- перевантажувальна здатність $\lambda=1,9$.

Приведений момент навантаження на валу двигуна $M_c = 0,8 M_n$ і має активний характер. В ланцюг ротора ввели додатковий опір $R_{\text{дод}} = 0,8$ Ом.

Необхідно:

1. Побудувати природну та відповідну штучну статичні механічні характеристики.
2. Знайти швидкість на природній характеристиці.
3. Визначити, в якому режимі та з якою швидкістю буде працювати двигун після закінчення перехідного процесу.
4. Знайти початковий момент двигуна при переході на штучну характеристику.

Завдання АД 7.

Задано:

Асинхронний двигун має такі номінальні дані:

- номінальна потужність $P_n = 7 \text{ кВт}$
- номінальна швидкість $n_n = 940 \text{ об/хв.}$
- номінальна напруга статора $U_{1n} = 380 \text{ В}$
- номінальний струм статора $I_{1n} = 16,8 \text{ А}$
- номінальна ЕРС ротора $E_{2n} = 175 \text{ В}$
- номінальний струм ротора $I_{2n} = 26 \text{ А}$
- перевантажувальна здатність $\lambda = 2,0$

Приведений момент навантаження на валу двигуна $M_c = 0,5M_n$ і має реактивний характер. Двигун працює на природній механічній характеристиці. В ланцюг ротора ввели додатковий опір у ротор $R_{\text{дод}} = 4,5 \text{ Ом}$ та змінили порядок чергування фаз статора.

Необхідно:

1. Побудувати природну та відповідну штучну статичні механічні характеристики.
2. Знайти швидкість на природній характеристиці.
3. Знайти максимальний гальмівний момент $M_{\text{гмах.}}$
4. Знайти пусковий момент на штучній характеристиці.
5. Визначити, чи буде електропривод розганятися у іншу сторону після зупинки. Якщо буде розганятися, то до якої швидкості?

Завдання АД 8.

Задано:

Асинхронний двигун має такі номінальні дані:

- номінальна потужність $P_n=60$ кВт;
- номінальна швидкість $n_n=577$ об/хв.;
- номінальна напруга статора $U_{1n}=380$ В;
- номінальна ЕРС ротора $E_{2n}=253$ В;
- номінальний струм ротора $I_{2n}=160$ А;
- перевантажувальна здатність $\lambda=2,9$.

Двигун працює на природній механічній характеристиці. Приведений момент навантаження на валу двигуна $M_c=M_n$ і має реактивний характер.

Необхідно:

1. Знайти швидкість на природній характеристиці.
2. Визначити, який додатковий опір треба увімкнути в коло ротора при переводі двигуна в режим гальмування противмиканням, щоб максимальний гальмівний момент не перевищував за модулем $M_{гmax}=0,8 M_n$.
3. Побудувати природну та відповідну штучну статичні механічні характеристики.
4. Знайти швидкість на штучній характеристиці.

Завдання АД 9.

Задано:

Асинхронний двигун з фазним ротором має параметри:

- номінальна потужність $P_n=26$ кВт;
- номінальна швидкість $n_n=710$ об/хв;
- номінальна напруга статора $U_{1n}=380$ В;
- номінальний струм статора $I_{1n}=72$ А;
- активний опір фази статора $R_1=0,202$ Ом;
- реактивний опір фази статора $X_1=0,313$ Ом;
- номінальна ЕРС ротора $E_{2n}=266$ В;
- номінальний струм ротора $I_{2n}=68$ А;
- активний опір фази ротора $R_p=0,102$ Ом;
- реактивний опір фази ротора $X_p=0,231$ Ом;
- коефіцієнт приведення ЕРС $k_e=2$
- перевантажувальна здатність $\lambda = 2,5$

Необхідно:

1. Побудувати природну механічну характеристику.
2. Побудувати та пояснити штучні механічні характеристики для випадків:
 - $f_{11} = 1,5 f_{1n}$;
 - $f_{12} = 2,0 f_{1n}$.

Завдання АД 10.

Задано:

Асинхронний двигун з фазним ротором має параметри:

- номінальна потужність $P_n=16$ кВт;
- номінальна швидкість $n_n=955$ об/хв;
- номінальна напруга статора $U_{1n}=380$ В;
- номінальний струм статора $I_{1n}=37,6$ А;
- активний опір фази статора $R_1=0,33$ Ом;
- реактивний опір фази статора $X_1=0,41$ Ом;
- номінальна ЕРС ротора $E_{2n}=208$ В;
- номінальний струм ротора $I_{2n}=42,5$ А;
- активний опір фази ротора $R_2=0,099$ Ом;
- реактивний опір фази ротора $X_2=0,25$ Ом;
- коефіцієнт приведення ЕРС $k_e=1,75$

Необхідно:

1. Побудувати природну статичну механічну характеристику.
2. Побудувати декілька штучних механічних характеристик для діапазону зміни $R_{\text{дод}}$ від $2 R_2$ до R_{2n} .
3. Знайти значення пускових моментів для всіх характеристик.
4. Побудувати залежність $M_{\text{п}} = f(R_{\text{дод}})$ пускового моменту від значення додаткового опору $R_{\text{дод}}$, який може бути введено в коло ротора.