

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»**



**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра електропривода**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
ДО КУРСОВОГО ПРОЄКТУ З ДИСЦИПЛІНИ
«ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА»
для студентів спеціальності
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Дніпро
НТУ «ДП»
2021

Колб А.А. Методичні рекомендації до курсового проєкту з дисципліни «Теорія електропривода» для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / А.А. Колб, Г.Г. Дяченко; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д.: НТУ «ДП», 2021. – 37 с.

Укладачі:

– Колб Антон Андрійович – доцент, кандидат технічних наук, професор кафедри електропривода;

– Дяченко Григорій Григорійович – асистент кафедри електропривода.

Погоджено рішенням науково-методичної комісії спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (протокол № 20/21-05 від 10.03.2021)

Методичні вказівки призначені для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Наведено загальні вказівки до виконання курсового проєкту, вихідні дані про проєкту, порядок виконання розрахунків, вимоги до оформлення проєкту.

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Зміст проекту.....	5
2. Вихідні дані до проекту	6
3. Попередній вибір потужності двигуна	8
4. Приведення статичних моментів та моментів інерції до валу двигуна	9
5. Побудова механічних характеристик електродвигунів та розрахунок опорів.....	11
6. Розрахунок перехідних процесів та побудова навантажувальної діаграми двигуна.....	17
7. Перевірка двигуна за нагріванням	22
8. Вибір додаткових опорів та складання схеми їх з'єднань.....	25
9. Розрахунок перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна з урахуванням пружних механічних зв'язків.....	26
10. Вимоги до оформлення проекту.....	30
Додаток 1. Варіанти завдання.....	32
Додаток 2. Форма титульного листа пояснювальної записки.....	34
Додаток 3. Форма завдання на курсовий проект	35

Вступ

Метою курсового проекту є розширення, поглиблення та закріплення знань, отриманих на лекціях та лабораторних заняттях, а також здобування навичок самостійної роботи.

До теми курсового проекту приймається електропривод механізму циклічної дії.

Для більш повного обсягу матеріалу основних розділів дисципліни в кожному проекті розглядаються два варіанта привода від двигуна постійного струму незалежного збудження та асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Механічна система може бути або абсолютно жорсткою, або з урахуванням пружності елементів.

У методичних вказівках даються практичні рекомендації до виконання завдання на проектування та формулюються вимоги до оформлення проекту. Це повинно допомогти студенту в самостійній роботі та дозволяє уніфікувати вимоги до змісту та оформлення проекту.

При виконанні курсового проекту дозволяється використовувати засоби обчислювальної техніки.

Методичні вказівки складені з урахуванням існуючої тенденції збільшення частки та удосконалення організації самостійної роботи студентів.

Студент повністю відповідає за прийняті в проекті рішення, правильність виконання розрахунків та літературний виклад пояснювальної записки.

1.ЗМІСТ ПРОЕКТА.

Курсовий проект складається з 25-30 с. пояснювальної записки та одного листа креслення формату А-1.

Зміст пояснювальної записки :

- 1) титульний лист;
- 2) завдання на проектування;
- 3) анотація;
- 4) зміст;
- 5) попередній вибір потужності двигуна;
- 6) зведення моментів опорів та моментів інерції до валу двигуна;
- 7) розрахунок механічних характеристик і опорів;
- 8) розрахунок перехідних процесів і побудування навантажувальної діаграми двигуна;
- 9) перевірка двигуна за нагріванням;
- 10) вибір додаткових опорів та складання схеми їх з'єднань;
- 11) розрахунок перехідних процесів асинхронного двигуна при пуску з урахуванням пружних механічних зв'язків;
- 12) література.

Зміст листу кресленика:

- 1) механічні характеристики двигуна;
- 2) діаграма швидкості;
- 3) криві перехідного процесу.

Текст пояснювальної записки повинен доповнюватися ілюстраціями:

- 1) розрахункова схема електропривода;
- 2) навантажувальна діаграма механізму;
- 3) схема включення двигуна;
- 4) схема з'єднання опорів;
- 5) спрощена навантажувальна діаграма двигуна;
- 6) використання графо-аналітичного методу для побудови кривих перехідного процесу та ін.

Зміст кресленика повинен знайти відображення у пояснювальній записці у вигляді спрощених копій.

2. ВИХІДНІ ДАНІ ДО ПРОЕКТУ.

Як вже відмічалось у введєні в кожному проекті розглядається два варіанта привода: від двигуна постійного струму незалежного збудження та асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Двигуни низьковольтні кранові або краново-металургійні.

Розрахункова схема електропривода показана на рис.2.1, де Д-двигун, ПП-передавальний пристрій; РО-робочий орган; ЗМ1 і ЗМ2-з'єднувальні муфти; М і M_p - моменти на валу двигуна та робочого органу; ω і ω_p - кутові швидкості двигуна та робочого органу; J_d і J_p - моменти інерції двигуна та робочого органу; J_{m1} і J_{m2} - моменти інерції муфт; i - передавальне число ПП; $\eta_{пп}$ - ККД ПП; c_1 і c_2 - коефіцієнти жорсткості.

Навантажувальна діаграма механізму приведена на рис. 2.2, де t_{p1} , t_{p2} - час роботи; $t_{п1}$, $t_{п2}$ - час паузи; $T_{ц}$ - час циклу.

На рис. 2.3 показана спрощена діаграма швидкості. Ділянка t_{p1} відповідає підйому й опусканню вантажа при моменті навантаження M_{p1} , а t_{p2} - при моменті навантаження M_{p2} .

Вихідні дані до проекту приведені у завданні на курсове проектування.

Режим роботи - повторно-короткочасний.

Перелік вихідних даних до курсового проекту наведено в табл. 2.1, чисельні значення вихідних даних та варіанти завдань - у додатку 1.

Таблиця 2.1

Перелік вихідних даних

№ пп	Назва величин	Букв. познач.	Одиниці Вимір.
1	Моменти навантаження (опору) на валу робочого органу	M_{p1} , M_{p2}	Нм
2	Кутова швидкість робочого органу	ω_p	Рад/с
3	Момент інерції робочого органу	J_{p1} , J_{p2}	Кгм ²
4	ККД передавального пристрою при моменті навантаження M_{p1}	$\eta_{п1}$	—
5	Коефіцієнт жорсткості пружного елемента на валу двигуна	c_1	Нм/рад
6	Коефіцієнт жорсткості пружного елемента на валу робочого органу	c_2	Нм/рад
7	Час цикла	$T_{ц}$	С
8	Тривалість включення механізму	$TВ_m$	%

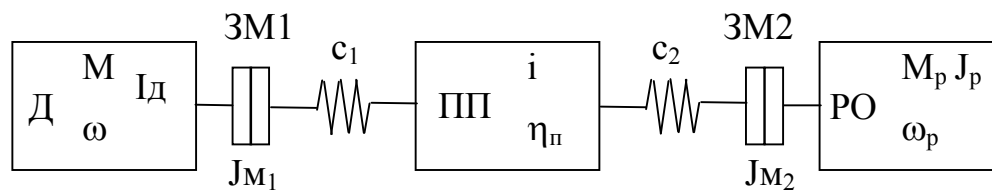


Рис. 2.1. Розрахункова схема електропривода

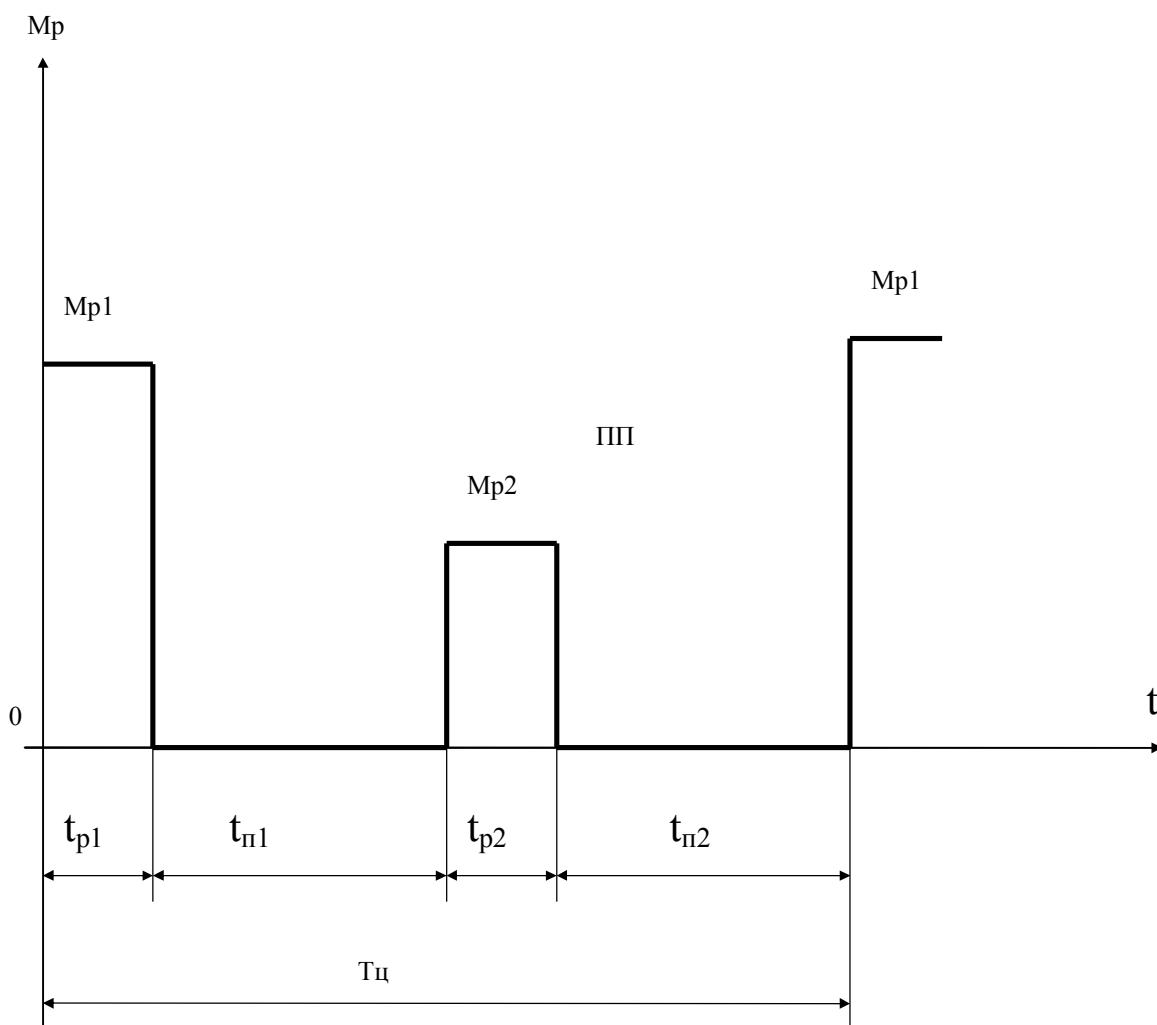


Рис. 2.2. Навантажувальна діаграма механізму

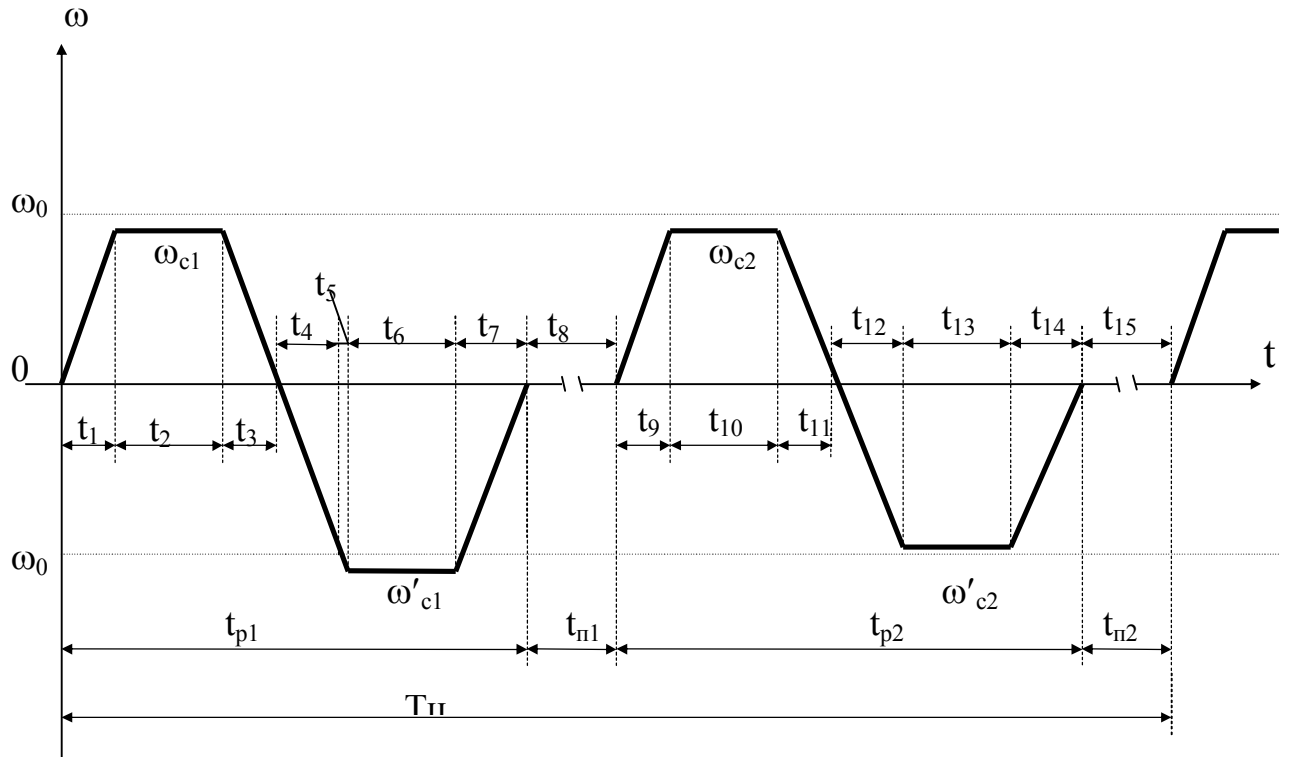


Рис. 2.3. Діаграма швидкості

3. ПОПЕРЕДНІЙ ВИБІР ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА

Потужність двигуна попередньо вибирається орієнтовно, а після розрахунків перехідних процесів та побудування навантажувальної діаграми двигуна здійснюється перевірка за нагріванням.

Потужність двигуна визначається за навантажувальною діаграмою механізму (рис.2.2).

Еквівалентний момент на валу робочого органа

$$M_{p.e} = \sqrt{\frac{M_{p1}^2 t_{p1} + M_{p2}^2 t_{p2}}{t_{p1} + t_{p2}}}, \text{ Нм} \quad (3.1)$$

Час роботи

$$t_{p1} = t_{p2} = \frac{T_{ц} \cdot T_{BМ}}{2 \cdot 100} \quad (3.2)$$

Еквівалентна потужність на валу робочого органа

$$m_{p.e} = M_{p.e} \cdot \omega_p 10^{-3}, \text{ кВт} \quad (3.3)$$

Еквівалентна потужність на валу двигуна

$$P_e = \frac{P_{p.e}}{\eta_{n1}}, \text{кВт} \quad (3.4)$$

Розшифровку параметрів, що входять до рівнянь (3.1)-(3.4), дано в табл. 2.1.

Розрахункова потужність на валу двигуна при заданій тривалості включення механізму

$$P_{роз} = \kappa_3 \cdot P_e, \text{кВт}, \quad (3.5)$$

де $\kappa_3 = 1.1 \div 1.5$ - коефіцієнт запасу, що враховує вплив динамічних навантажень та інших неврахованих при розрахунках факторів, зокрема, в погіршанні умов тепловіддачі двигуна при зниженій швидкості.

Значення κ_3 , що приймається, залежить від величини коефіцієнта інерції $F1$, під котрим розуміється відношення суми приведенного до валу двигуна моменту інерції системи до моменту інерції двигуна, а також від співвідношення часу перехідних та усталених процесів. При $F1$ до 1.2 рекомендується приймати $\kappa_3 = 1.1 \div 1.2$, при $F1 > 1.2$ $\kappa_3 = 1.2 \div 1.5$.

Оскільки величина коефіцієнта інерції поки що невідома, то на етапі попереднього вибору потужності двигуна рекомендується приймати $\kappa_3 = 1.2 \div 1.3$.

Приведення розрахункової потужності $P_{роз}$ до стандартної (каталожної) тривалості включення $T_{ВН}$ виконується за формулою

$$P_{кат} = P_{роз} \cdot \sqrt{\frac{T_{ВМ}}{T_{ВН}}}, \quad (3.6)$$

де $P_{кат}$ - потужність на валу двигуна, приведена до стандартної тривалості включення $T_{ВН}$.

Стандартне значення $T_{ВН}$ звичайно приймають ближче до розрахункового $T_{ВМ}$.

Для привода механізмів, що працюють у повторно-короткочасному режимі, рекомендується використовувати, як що це можливо, кранові електродвигуни. Для цих двигунів доцільно приймати $T_{ВН} = 25\%$, тому що деяких довідниках окремі параметри двигунів наведено саме при названому значенні $T_{В}$.

Далі з каталогу здійснюється вибір потужності двигуна постійного струму незалежного збудження та асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, який задовольняє співвідношенню

$$P_{Н} > P_{кат},$$

де $P_{Н}$ - номінальна потужність двигуна, котра вказана в каталозі при прийнятому в розрахунку $T_{ВН}$.

Вибір електродвигунів постійного та змінного струму необхідно здійснювати таким чином, щоб їх номінальні частоти обертання були близькі. Це забезпечує незначне розходження діаграм швидкості для обох варіантів при незмінному передавальному відношенні передавального пристрою, значення котрого визначається лише для варіанта з приводом постійного струму.

4. ПРИВЕДЕННЯ СТАТИЧНИХ МОМЕНТІВ ТА МОМЕНТІВ ІНЕРЦІЇ ДО ВАЛУ ДВИГУНА

Як вже відмічалось, в якості виробничого механізму прийнято механізм підйому. Статичні моменти, приведені до валу двигуна, у випадку підйому вантажу (ділянки t_1, t_2, t_3 та t_9, t_{10}, t_{11} на рис 2.3) :

$$M_{c1} = \frac{M_{p1}}{i\eta_{n1}}, \quad \text{Нм}; \quad (4.1)$$

$$M_{c2} = \frac{M_{p2}}{i\eta_{n2}}, \quad \text{Нм}; \quad (4.2)$$

У випадку спуска вантажу (ділянки t_4, t_5, t_6, t_7 та t_{12}, t_{13}, t_{14} на рис 2.3):

$$M'_{c1} = M_{c1}(2\eta_{n1} - 1), \quad \text{Нм} \quad (4.3)$$

$$M'_{c2} = M_{c2}(2\eta_{n2} - 1), \quad \text{Нм} \quad (4.4)$$

У наведених виразах: M_{p1}, M_{p2} моменти опору на валу механізму; i – передавальне відношення передавального пристрою; η_{n1}, η_{n2} – ККД передавального пристрою відповідно при передачі моментів навантаження M_{p1}, M_{p2} .

Припускається, що при моменті навантаження M_{p2} має місце силовий спуск.

Передавальне відношення знаходиться за формулою

$$i = \frac{\omega_n}{\omega_p}, \quad (4.5)$$

де $\omega_n = \pi n_n / 30$ – номінальна кутова швидкість двигуна, рад/с;

ω_p – кутова швидкість вихідного валу механізму, рад/с;

n_n – номінальна частота обертання вибраного двигуна постійного струму незалежного збудження, об/хв (для варіанта привода від асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором передавальне відношення залишається таким, що i для варіанта привода від двигуна постійного струму).

ККД передавального пристрою при моменті навантаження M_{p1} приймається рівним заданому у вихідних даних (див. табл.2.1). ККД передавального пристрою при моменті навантаження M_{p2} визначається за кривими рис.4.1 у залежності від коефіцієнта завантаження.

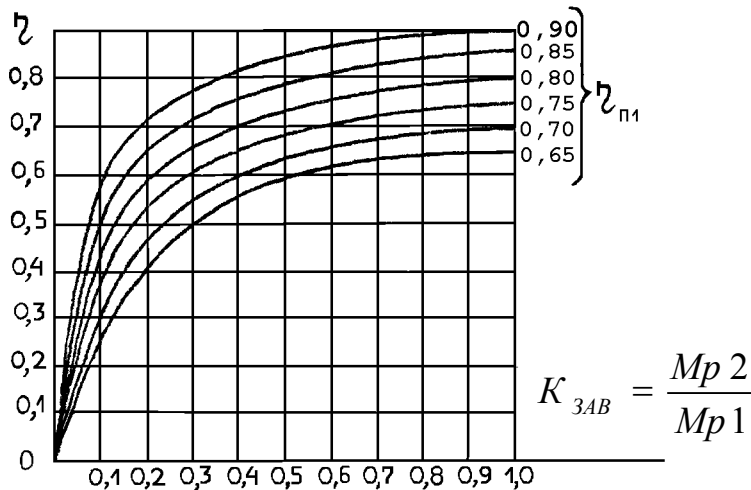


Рис.4.1. Графіки, залежності ККД передавального пристрою від завантаження

Приведені моменти інерції системи для обох варіантів привода визначаються для моментів навантаження M_{p1} та M_{p2} :

$$J_1 = \delta(J_d + J_{M1}) + \frac{J_{p1} + J_{M2}}{i^2} \quad , \text{ кгм}^2 ; \quad (4.6)$$

$$J_2 = \delta(J_d + J_{M1}) + \frac{J_{p2} + J_{M2}}{i^2} \quad , \text{ кгм}^2 ; \quad (4.7)$$

де J_1 та J_2 –приведені до валу двигуна моменти інерції системи відповідно при моментах навантаження M_{p1} та M_{p2} ; $\delta=1,02\dots1,05$ – коефіцієнт, що враховує момент інерції передавального пристрою; J_d – момент інерції відповідного (постійного току та асинхронного) двигуна; $J_{M1}=(0,05\dots0,1)J_d$ та $J_{M2}=(0,05\dots0,1)J_{p1}$ – моменти інерції з'єднувальних муфт; J_{p1} та J_{p2} – моменти інерції робочого механізму відповідно при моментах навантаження M_{p1} та M_{p2} ; i – передавальне відношення механізму.

5. ПОБУДОВА МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ТА РОЗРАХУНОК ОПОРУ

5.1. Двигун постійного струму незалежного збудження

Побудова природної механічної характеристики двигуна, котра є прямою лінією, зручно проводити за двома точками, одна з них відповідає

номінальним значенням моменту M_n та швидкості ω_n , друга – швидкості холостого ходу ω_0 .

Номінальний момент двигуна розраховується за формулою:

$$M_n = k\Phi I_{ян} \quad , \text{ Нм} \quad , \quad (5.1)$$

де $I_{ян}$ – номінальний струм якоря, А;

$k\Phi = (U_n - I_{ян}r_я)/\omega_n$ – конструктивна постійна двигуна;

U_n – номінальна напруга, В;

$r_я$ – опір якірного кола, Ом;

Φ – магнітний потік, Вб.

Номінальна кутова швидкість двигуна

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} \quad , \text{ с}^{-1} \quad . \quad (5.2)$$

Швидкість ідеального холостого ходу

$$\omega_0 = \frac{U_n}{k\Phi} \quad , \text{ с}^{-1} \quad . \quad (5.3)$$

При розрахунку пускових та гальмівних характеристик важливим є вибір моментів. Якщо задано допустиме прискорення механізму, то пусковий та гальмівний моменти вибираються з умови

$$M_n = M_c + J\mathcal{E}_{доп} \quad , \quad (5.4)$$

$$M_T = J\mathcal{E}_{доп} - M_c \quad , \quad (5.5)$$

де M_c – приведений до валу двигуна момент статичного навантаження; J – приведений до валу двигуна момент інерції привода; $\mathcal{E}_{доп}$ – допустиме кутове прискорення двигуна, визначене за заданим прискоренням механізму.

В обох випадках знайдене значення моменту не повинно бути більше допустимого моменту двигуна.

Реалізувати підтримання заданого прискорення у всіх режимах та при будь-якому навантаженні можна тільки у замкнутій системі електропривода. У розімкнутій системі при реостатному пуску та гальмуванні привода можна обмежувати максимальне або середнє значення пускового (гальмівного) моменту двигуна згідно (5.4) та (5.5). При виборі пускового (гальмівного) моменту необхідно розглядати найбільш небезпечні режими з точки зору перевищення допустимого прискорення і для цих режимів обмежити прискорення на допустимому рівні. Для підйимально-транспортних машин найбільш небезпечними режимами звичайно є пуск та гальмування при максимальному моменті опору, що пов'язано з міцністю каната та механізму.

Розрізняють форсований та нормальний пуски. Форсований пуск (як у нашому випадку) застосовується для напружено працюючих приводів з великим числом вмиканій за годину.

На рис.5.1 приведена схема вмикання опорів та позначення величин, необхідних при розрахунку. Опори $R_{я1}$, $R_{я2}$, $R_{я3}$ називаються опорами ступені; опори $R_{д1}$, $R_{д2}$, $R_{д3}$ – опорами секції.

Якщо в процесі пуску двигуна момент статичного опору постійний, що має місце в більшості практичних випадках, то моменти перемикавання M_1, M_2 вибираються однаковими на всіх ступенях (рис. 5.2).

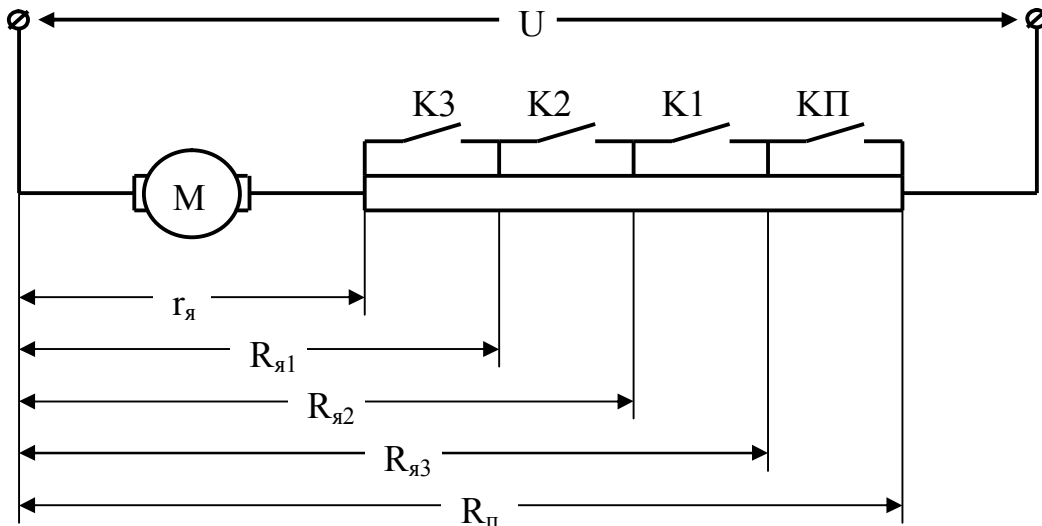


Рис.5.1. Схема вмикання опорів

Побудова пускових та гальмівних характеристик робиться в такій послідовності.

5.1.1. Задаються максимально допустимим моментом двигуна при пуску.

$$M_1 = (2,0 - 2,5)M_n, \quad (5.6)$$

5.1.2. Для заданої кількості ступенів пускового реостата знаходять відношення пускового моменту M_1 до моменту перемикавання M_2 :

$$\lambda = \frac{M_1}{M_2} = \sqrt[m]{\frac{R_{ям}}{r_{я}}}, \quad (5.7)$$

де $R_{ям} = U_n / I_1 = U_m k\Phi / M_1$ – опір якірного кола на першому ступені пускового реостата; $r_{я} = r_{оя} + r_{дп} + r_{щ}$ – опір якоря, який вмикає опір обмоток якоря $r_{оя}$, додаткових полюсів $r_{дп}$ та щіток $r_{щ}$.

При відсутності у каталозі даних опір якоря знаходиться за формулою

$$r_{я} = 0,5 \frac{U_n}{I_{ян}} (1 - \eta_n). \quad (5.8)$$

Величина $k\Phi$ визначається відношенням:

$$k\Phi = \frac{M_n}{I_{ян}}. \quad (5.9)$$

При контактному керуванні рекомендується приймати для двигунів малої потужності (до 10 кВт) число ступенів $m = 2 \dots 3$, а середньої потужності (до 50 кВт) – $m = 3 \dots 4$.

5.1.3. Знаходять момент перемикання

$$M_2 = M_1 / \lambda . \quad (5.10)$$

При цьому додержуються умов $M_2 \geq (1,1 \dots 1,2)M_{C1}$.

Якщо умови не виконуються, то потрібно збільшити число ступенів пускового реостата або вибрати двигун більшої потужності.

5.1.4. За отриманими значеннями M_1 та M_2 будуються, як показано на рис.5.2, пускові характеристики для піднімання та спуску вантажу.

5.1.5. Характеристика гальмування противмиканням IV будується за заданим початковим значенням гальмівного моменту

$$M_{поч1} = (2,0 \div 2,5)M_n .$$

Якщо величина пускового моменту двигуна M_n на характеристиці противмикання буде менша за M_{C1} , то рекомендується збільшити значення $M_{поч1}$.

Розрахунок пускових опорів можна зробити аналітично за виразом

$$R_{ям} = r_я \lambda^m \quad (5.11)$$

або графічно за допомогою методу відрізків, згідно якого відрізок 1–8 (рис5.2) пропорційний опору

$$R_{ям} = R_{я3} = \frac{U_H}{I_1} = \frac{U_H k \Phi}{M_1} , \quad (5.12)$$

При цьому масштаб опорів буде

$$m_R = R_{я3} / l_{1-8} , \quad (5.13)$$

де l_{1-8} – довжина відрізка 1–8, мм.

Відрізки 3–8 та 5–8 пропорційні відповідно $R_{я2}$ та $R_{я1}$

Тому

$$R_{я2} = m_R l_{3-8} , \quad (5.14)$$

$$R_{я1} = m_R l_{5-8} , \quad (5.15)$$

Графічним способом за допомогою методу відрізків знаходять також опір кола якоря для характеристики противмикання

$$R_n = m_R l_{8-21} , \quad (5.16)$$

За отриманими значенням опорів $R_{я1}$, $R_{я2}$, $R_{я3}$ знаходять додаткові опори для кожної секції:

$$R_{\partial1} = R_{я3} - R_{я2}$$

$$R_{\partial2} = R_{я2} - R_{я1} \quad (5.17)$$

$$R_{\partial3} = R_{я1} - r_я$$

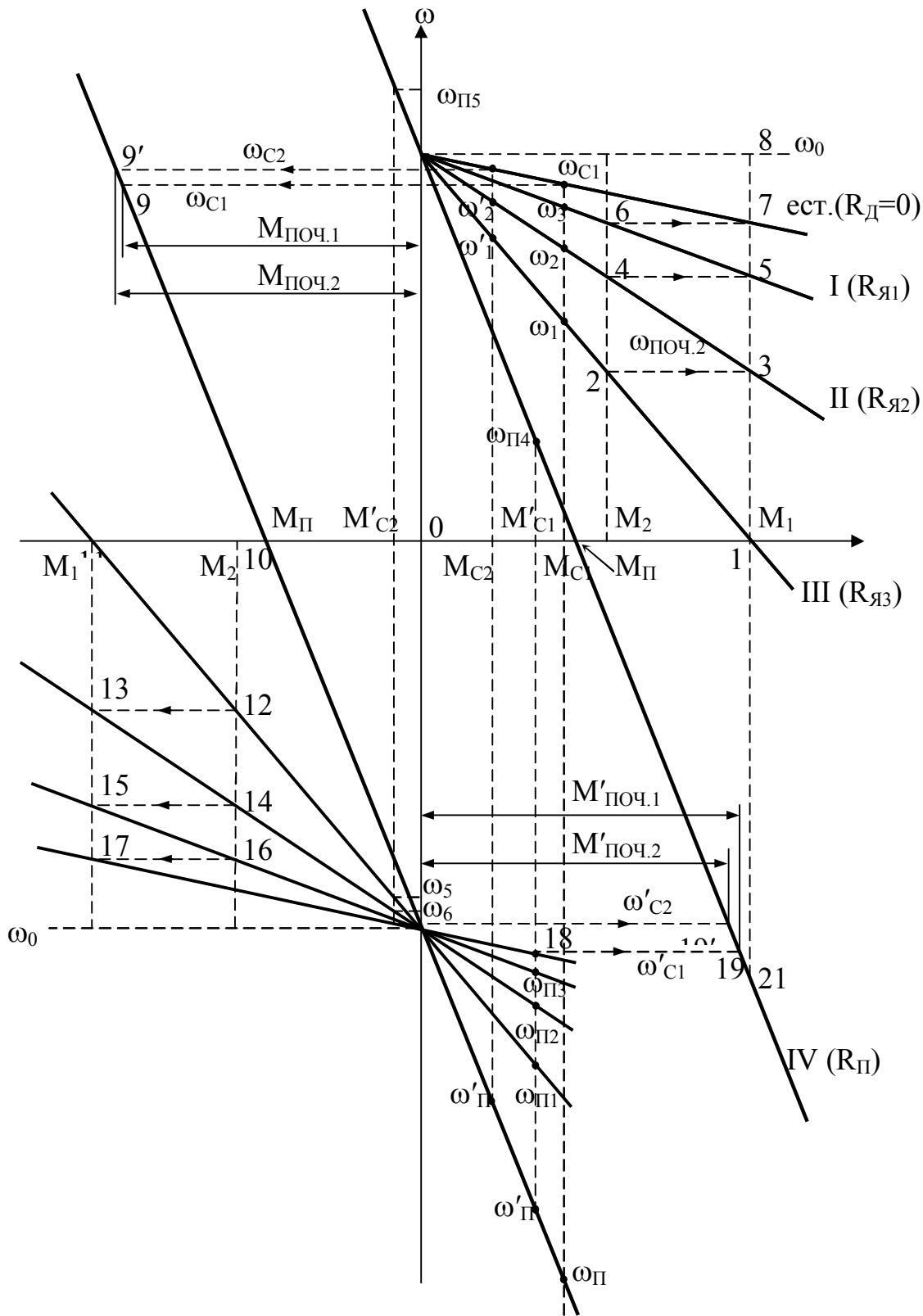


Рис.5.2. Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження

5.2. Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором

Для розрахунку природної механічної характеристики в рушійному режимі та в режимах електричного гальмування (рекуперативне та противмикання) використовується рівняння

$$M = \frac{2 M_{\kappa} (1 + \alpha S_{\kappa})}{\frac{S}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S} + 2 \alpha S_{\kappa}}, \quad (5.18)$$

де M – обертовий момент двигуна, Нм; $M_{\kappa} = \lambda_{\text{дв}} M_{\text{н}}$ – максимальний (критичний) момент двигуна, Нм; $\lambda_{\text{дв}} = M_{\kappa}/M_{\text{н}}$ – перенавантажувальна здатність двигуна; $M_{\text{н}}$ – номінальний момент двигуна, Нм; $S = (n_0 - n)/n_0 = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$ – ковзання ротора двигуна; $n_0 = 60f_c/p$ – синхронна частота обертання двигуна, об/хв; p – частота обертання двигуна, об/хв; $\omega_0 = \pi n_0/30 = 2\pi f_c/p$ – синхронна кутова швидкість двигуна, рад/с; ω – кутова швидкість двигуна, рад/с; f_c – частота мережі, Гц; p – число пар полюсів; $\alpha = r_c/r'_p$ – відношення активного опору статора r_c до опору ротора r'_p , приведенного до обмотки статора; S_{κ} – критичне ковзання.

Кутова швидкість двигуна

$$\omega = \omega_0 (1 - S), \quad (5.19)$$

Критичне ковзання

$$S_{\kappa} = S_{\text{н}} \frac{\lambda_{\text{дв}} + \sqrt{\lambda_{\text{дв}}^2 - 1 + 2S_{\text{н}} \alpha (\lambda_{\text{дв}}^2 - 1)}}{1 - 2\alpha S_{\text{н}} (\lambda_{\text{дв}}^2 - 1)}, \quad (5.20)$$

де $S_{\text{н}} = (n_0 - n)/n_0 = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$ – номінальне ковзання.

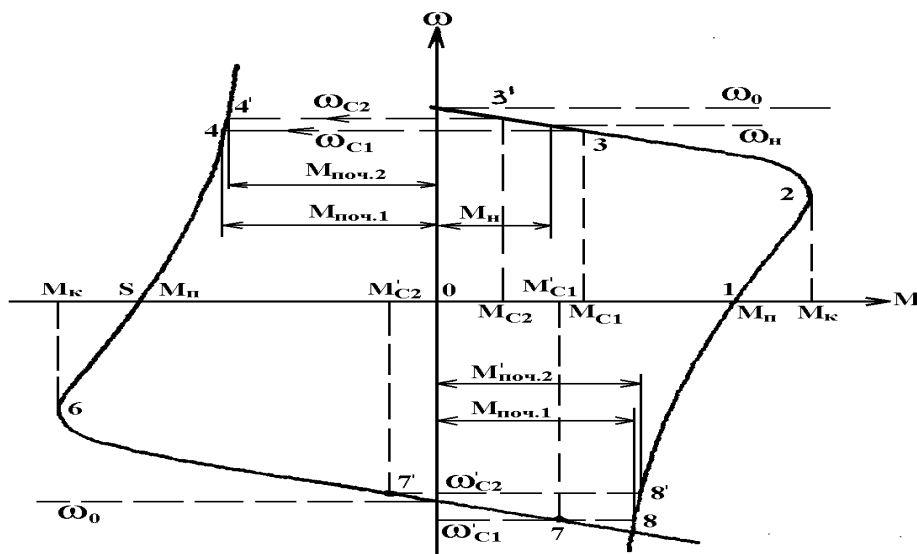


Рис. 5.3. Механічні характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Задаємось значенням ковзання S у межах від $-0,2$ до $2,2$, знаходимо з рівнянь (5.18) та (5.19) відповідні значення моменту M та кутової швидкості ω та будуємо механічну характеристику двигуна $\omega = f(M)$ для трьох режимів: рекуперативного $S = -0,2 \div 0$, рушійного $S = 0 \div 1$, противмикання $S > 1$. Щоб більш точно побудувати нелінійні ділянки характеристики, необхідно у районі критичного ковзання зменшити крок зміни S .

Розрахункові результати для кожного режиму треба звести в таблиці.

Зразковий вигляд механічної характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором наведено на рис.5.3.

6. РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ПОБУДОВА НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ДІАГРАМИ ДВИГУНА

6.1. Розрахунок перехідних процесів двигуна постійного струму.

6.1.1. Загальні відомості.

Розрахунок механічних перехідних процесів для різних режимів (пуск, реверс, гальмування) двигуна постійного струму з лінійною механічною характеристикою при $M_c = \text{const}$ здійснюється за допомогою рівнянь

$$\omega = \omega_{c_i} (1 - e^{-t/T_{M_i}}) + \omega_{\text{поч.}_i} e^{-t/T_{M_i}}, \quad (6.1)$$

$$M = M_{c_i} (1 - e^{-t/T_{M_i}}) + M_{\text{поч.}_i} e^{-t/T_{M_i}}, \quad (6.2)$$

де $\omega_{\text{поч.}_i}$, $M_{\text{поч.}_i}$, ω_{c_i} , M_{c_i} – початкові та кінцеві значення кутової швидкості та моменту на відповідній механічній характеристиці, $T_{M_i} = JR_{\text{я}_i}/(k\Phi)^2$ – електромеханічна стала часу; J – момент інерції системи, приведеної до валу двигуна; $R_{\text{я}_i}$ – опір якоря для відповідної характеристики.

Приведені вирази можуть використовуватися для розрахунку перехідних процесів у режимах (пуск, реверс, гальмування). У кожному конкретному випадку необхідно визначити електромеханічну сталу часу, а також початкові та кінцеві значення змінних.

6.1.2. Пуск двигуна при $M_c = M_{c1}$

Для розрахунку зміни у часі кутової швидкості та моменту двигуна на будь-якій пусковій характеристиці справедливі вирази (6.1) та (6.2) з урахуванням відповідних межових умов. Згідно рис.5.2 для першої пускової характеристики при M_{c1} межовими умовами будуть:

$$\omega_{\text{поч.}_i} = 0, M_{\text{поч.}_i} = M_1, \omega_{c_i} = \omega_1, M_{c_i} = M_{c1}.$$

При цьому вираз для швидкості та моменту відповідно з (6.1) та (6.2) приймає вигляд

$$\omega = \omega_1(1 - e^{-t/T_{M1}}) , \quad (6.3)$$

$$M = M_{c1}(1 - e^{-t/T_{Mi}}) + M_1 e^{-t/T_{Mi}} , \quad (6.4)$$

де $T_{Mi} = J_1 R_{я3} / (k\Phi)^2$ – електромеханічна стала часу для першого ступені (характеристика Ш, рис.5.2); $R_{я3} = U/I_1$ – опір якійного кола на першій ступені.

Час перехідного процесу на відповідному ступені при зміні моменту від M_1 до M_2 визначається за формулою :

$$t_i = T_{Mi} \ln \frac{M_1 - M_{c1}}{M_2 - M_{c1}} , \quad (6.5)$$

Задаємось декількома значеннями часу t у межах від нуля до t_1 розраховуємо залежності $\omega = f(t)$ та $M = f(t)$ на першій пусковій характеристиці .

Аналогічно розраховуються криві перехідних процесів при розгоні двигуна на інших пускових характеристиках. При цьому на будь-якій із характеристик $M_{ci} = M_{c1}$; $M_{почі} = M_1$, а кінцеве значення швидкості для попередньої ступені є початковим значенням для наступної. Так, наприклад, згідно рис.5.2 початкове значення швидкості для другого ступеня дорівнює $\omega_{поч2}$.

Відлік часу для кожної ступені розпочинається з нульового значення.

Час перехідного процесу на природній характеристиці набуває нескінченності. Для практичних розрахунків приймають:

$$t_e = (3 \div 4) T_M , \quad (6.6)$$

де $T_M = J_{1rя} / (k\Phi)^2$ – електромеханічна стала часу для природної механічної характеристики двигуна.

Розрахунки залежностей $\omega = f(t)$ та $M = f(t)$ зводяться у табл.6.1.

Таблиця 6.1

Результати розрахунку перехідних процесів

№ступеня режим роботи	T_{Mi}	M_{ci}	$M_{почі}$	$\omega_{почі}$	ω_{ci}	t	ω	M
-----------------------	----------	----------	------------	-----------------	---------------	-----	----------	-----

Зразковий вигляд кривих перехідного процесу при пуску двигуна в три ступені $m=3$ зображений на рис.6.1.

6.1.3. Гальмування противмиканням при підйомі та гальмівний спуск вантажа $M_c = M_{c1}$.

Гальмування противмиканням здійснюється зміною полярності напруги на якорі. Оскільки якір за інерцією обертається у попередньому напрямку, то ЕРС двигуна буде направлена не проти напруги мережі, як у попередньому рушійному режимі, а згідно йому. Для обмеження струму до

кола якоря вмикається максимальний додатковий опір R_p та двигун працює на характеристиці IV, ділянка 9-10 (див. рис. 5.2). Початкове значення швидкості при гальмуванні дорівнює усталеній швидкості попереднього рушійного режиму ω_{c1} .

Після зупинки двигуна (точка 10) під дією сумарного моменту двигуна та навантаження здійснюється розгон у зворотньому напрямку (спуск вантажа) за характеристиками Ш, П, I та природній.

При $\omega > \omega_0$ має місце рекуперативне гальмування на природній характеристиці до сталої швидкості $-\omega'_{c1}$, при котрій здійснюється спуск вантажа.

Розрахунок перехідних процесів при гальмуванні противмиканням здійснюється на основі таких же вихідних виразів (6.1) та (6.2), що і при запуску двигуна, але з урахуванням своїх початкових та кінцевих значень змінних.

Згідно рис.5.2 при гальмуванні противмиканням маємо:

$$\omega_{почі} = \omega_{c1}, M_{почі} = -M_{поч.1}, \omega_{кі} = -\omega_p, M_{кі} = M_{c1}$$

З урахуванням цих значень отримуємо

$$\omega = -\omega_n(1 - e^{-t/T_{M.T}}) + \omega_{c1}e^{-t/T_{M.T}}, \quad (6.7)$$

$$M = M_{c1}(1 - e^{-t/T_{M.T}}) - M_{noch1}e^{-t/T_{M.T}}, \quad (6.8)$$

де $T_{M.T.} = JR_{яп}/(k\Phi)^2$ – електромеханічна стала часу для характеристики противмикання.

Час гальмування

$$t_T = T_{M.T.} \ln \frac{M_{noch.1} + M_{c1}}{M_n + M_{c1}}, \quad (6.9)$$

Задаючись декількома значеннями t у межах від 0 до t_T розраховують залежності $\omega = f(t)$ та $M = f(t)$ при гальмуванні противмиканням. Отримані розрахунки зводяться до таблиці. 6.1.

Потрібно відмітити, що у виразах (6.7), (6.8), (6.9) необхідно підставляти абсолютні значення чисельних величин, оскільки знаки моментів та швидкостей вже враховані при виведенні рівнянь.

Аналогічним чином розраховуються перехідні процеси при розгоні двигуна в зворотньому напрямку (спуск вантажу). При цьому сталі часу T_{Mi} на відповідних характеристиках при підйомі та спуску вантажу будуть однакові. Початкові та кінцеві значення змінних визначають за відповідною характеристикою (див. рис. 5.2). Так, наприклад, при розгоні двигуна у зворотньому напрямку за характеристикою Ш маємо

$$\omega_{почі} = 0, M_{почі} = -M_1, \omega_{кі} = -\omega_{п1}, M_{кі} = M'_{c1}.$$

Час розгону (спуску вантажу) на відповідному ступені при активному моменті опору M'_{c1} знаходиться з виразу

$$t_i = T_{Mi} \ln \frac{M_1 + M'_{c1}}{M_2 + M'_{c1}}, \quad (6.10)$$

Для кожного ступеня знаходиться час розгону та, задаючись декількома t в межах від 0 до t_i , розраховують криві перехідного процесу.

Отримані розрахунки зводяться до таблиці. 6.1. Зразковий вигляд кривих перехідного процесу зображен на рис. 6.1.

За наведеною методикою необхідно розрахувати перехідні процеси для інших режимів: гальмування противмиканням при гальмівному спуску вантажу $M_c = M'_{c1}$; пуск двигуна при $M_c = M_{c2}$; гальмування противмиканням при підйомі та силовий спуск вантажу при $M_c = M'_{c2}$; гальмування противмиканням при силовому спуску вантажу.

Електромеханічна стала часу при $M = M_{c2}$ визначається як

$$T'_{Mi} = J_2 R_{яi} / (\kappa \Phi)^2, \quad (6.11)$$

Для кожного режиму роботи розрахунок перехідних процесів зводиться до табл. 6.1. За отриманими результатами будуються залежності $\omega = f(t)$ та $M = f(t)$, зразковий вигляд яких зображено на рис. 6.1.

Залежність $M = f(t)$ є навантажувальною діаграмою двигуна. Час сталого руху, наприклад t_2 та t_6 , визначаються як:

$$t_2 = t_6 = \frac{t_{p1} - t_1 - t_3 - t_4 - t_5 - t_7}{2}, \quad (6.12)$$

де t_1, t_3, t_4, t_5, t_7 – час перехідного процесу при спуску та гальмуванні (див. рис. 2.3 та рис. 6.1).

6.2. Розрахунок перехідних процесів асинхронного двигуна без урахування пружних механічних зв'язків ($c_1 = c_2 = \infty$).

Оскільки механічна характеристика асинхронного двигуна є нелінійною функцією швидкості, то розрахунок перехідних процесів здійснюється графо-аналітичним способом, і зводиться до приблизного інтегрування рівняння руху

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (6.13)$$

у якому диференціали змінних, замінюються їх приростаннями. При цьому рівняння руху, розв'язане відносно часу, має вигляд

$$\Delta t_i = \frac{J \Delta \omega_i}{M_i - M_{ci}} = \frac{J \Delta \omega_i}{M_{дин.i}}, \quad (6.14)$$

Для використання рівняння (6.14) механічна характеристика двигуна поділяється на ряд проміжків, на яких момент двигуна приймається постійним (рис. 6.2). Для кожного i -го проміжка швидкості $\Delta \omega_i$

визначається середнє значення динамічного моменту, а потім за (6.14) розраховують Δt_i . Для зручності розрахунків складають табл. 6.2.

Табл. 6.2

Розрахунок перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна

$\Delta\omega_1$	$\omega_i = \omega_{i-1} + \Delta\omega_i$	M_i	$M_{\text{дин } i}$	Δt_i	$t_i = t_{i-1} + \Delta t_i$
1	2	3	4	5	6
$\Delta\omega_1$	$\omega_1 = \Delta\omega_1$	M_1	$M_{\text{дин } 1}$	Δt_1	$t_1 = \Delta t_1$
$\Delta\omega_2$	$\omega_2 = \omega_1 + \Delta\omega_2$	M_2	$M_{\text{дин } 2}$	Δt_2	$t_2 = t_1 + \Delta t_2$
.....
$\Delta\omega_5$	$\omega_5 = \omega_4 + \Delta\omega_5$	M_5	$M_{\text{дин } 5}$	Δt_5	$t_5 = t_4 + \Delta t_5$

Поточне значення швидкості (стовпець 2) та часу (стовпець 6) визначають як суму приростання та значення змінної на попередньому проміжку. За даними стовпців 2, 3, 6 будують залежності $\omega = f(t)$ та $M = f(t)$. Приклад побудування кривих перехідного процесу при пуску зображено на рис. 6.3.

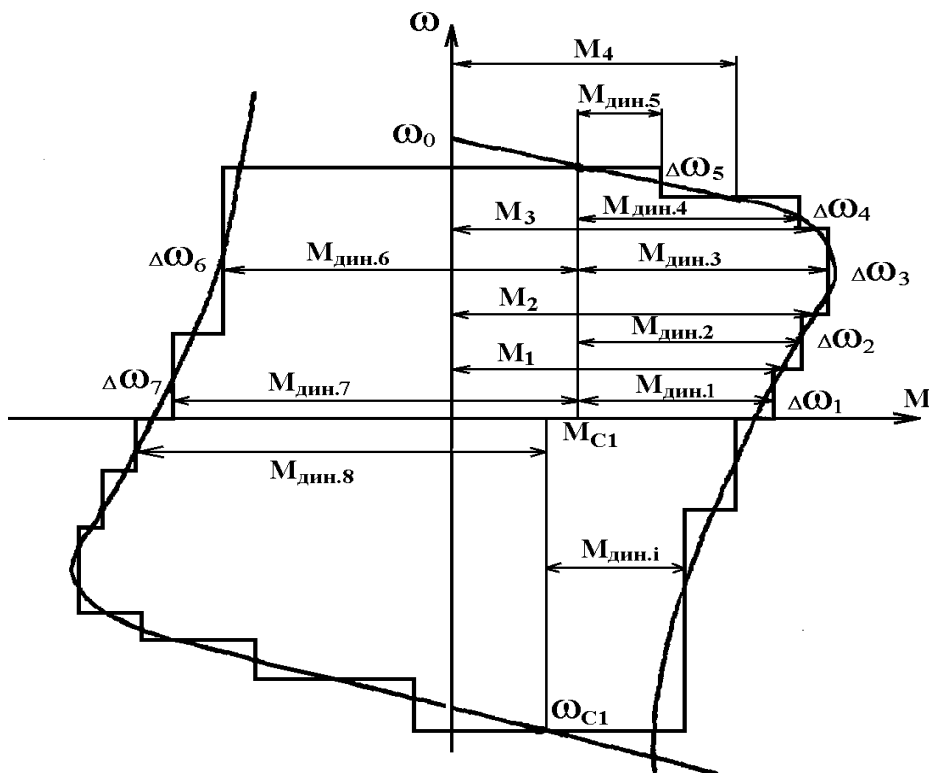


Рис.6.2. До розрахунку перехідних процесів в приводі з асинхронним двигуном.

Розрахунок перехідних процесів для інших режимів здійснюється аналогічно. При цьому необхідно враховувати, що момент динамічний є алгебраїчна сума моментів двигуна та опору з урахуванням їх знаків.

Визначення $M_{дин}$ для розрахунка перехідних процесів при $M_c = M_{c1}$ зображено на рис. 6.2.

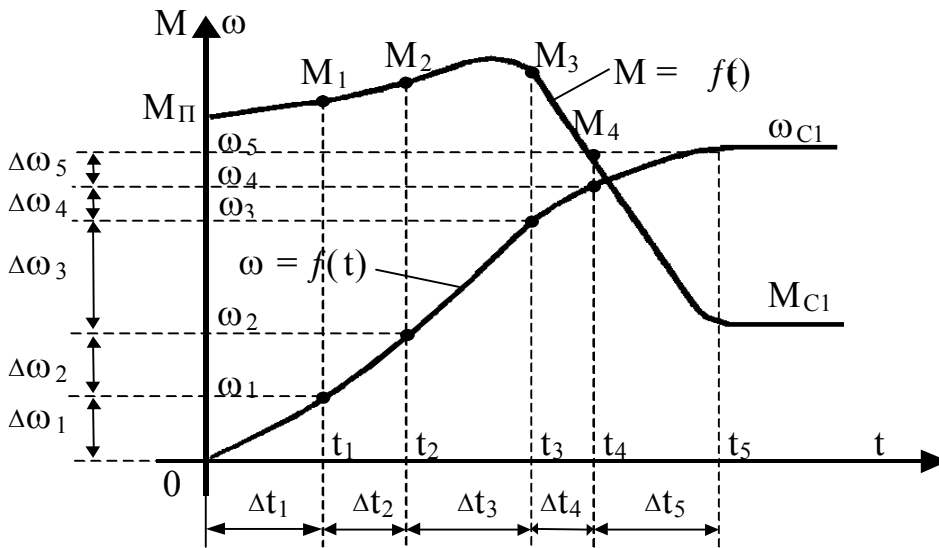


Рис.6.3. Побудова кривих перехідного процесу при запуску асинхронного двигуна

7. ПЕРЕВІРКА ДВИГУНА ЗА НАГРІВАННЯМ

7.1. Двигун постійного струму

Побудована на рис. 6.1 залежність $M = f(t)$ є навантажувальною діаграмою двигуна. Використовуючи цю діаграму, можна визначити еквівалентний момент двигуна та зробити перевірку обраного двигуна за нагріванням.

Для розрахунку еквівалентного значення моменту дійсну криву моменту замінюють ламаною лінією, котра проходить достатньо близько до дійсної кривої. Для кожної трапецієподібної ділянки розраховують еквівалентне значення моменту за формулою

$$M_{ei} = \sqrt{(M_{i1}^2 + M_{i1} + M_{i2} + M_{i2}^2)/3} \quad , \quad (7.1)$$

де M_{i1} – момент на початку i -тої ділянки; M_{i2} – момент на прикінці i -тої ділянки.

На горизонтальних ділянках $M_{ei} = M_i$, де M_i – значення моменту на цій ділянці.

З метою спрощення розрахунків навантажувальна діаграма двигуна замінюється спрощеною (рис. 7.1), для якої еквівалентний момент визначається таким чином:

$$M_{ei} = \sqrt{(M_1^2 + M_1 M_2 + M_2^2)/3}, \quad (7.2)$$

$$M_{e2} = \sqrt{(M_{noc.1}^2 + M_{noc.1} M_n + M_n^2)/3}, \quad (7.3)$$

Еквівалентний момент двигуна

$$M_e = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 t_i}{t_{p1} + t_{p2}}} = \sqrt{\frac{M_{e1}^2 (t_1 + t_4 + t_5 + t_9 + t_{12}) + M_{e2}^2 (t_3 + t_7 + t_{11} + t_{14}) + \frac{M_{c1}^2 t_2 + M_{c1}'^2 t_6 + M_{c2}^2 t_{10} + M_{c2}'^2 t_{13}}{t_{p1} + t_{p2}}}{t_{p1} + t_{p2}}}, \quad (7.4)$$

При правильно обраному двигуні його номінальний момент при стандартному TB_n повинен бути більшим або рівним розрахунковому еквівалентному моменту, тобто

$$M_n \geq M_{екв} \sqrt{\frac{TB_M}{TB_n}}, \quad (7.5)$$

Якщо ці умови не виконуються, то обирається двигун ближньої більшої потужності.

7.2. Асинхронний двигун.

Для асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором при великій частоті вмикання та наявності електричного гальмування, що має місце у нашому випадку (режим S5), перевірка двигуна за нагріванням зводиться до визначення так званого допущення кількості вмикань за годину. Під останнім розуміють таку кількість вмикань за годину, при якій середнє перевищення температури після великої кількості робочих циклів буде дорівнювати допущеному, та двигун буде повністю використаним за нагріванням.

Допущена кількість вмикань за годину може бути знайдена з виразу [3]

$$h_{дон} = 3600 \frac{(\Delta P_H - \Delta P) \xi + \Delta P_H \beta_0 (1 - \xi)}{\Delta A_n + \Delta A_r}, \quad (7.6)$$

де ΔP_H – номінальні втрати в двигуні при тривалому режимі роботи, кВт; ΔP – втрати в усталеному режимі, кВт; ξ – відносна тривалість вмикання; β_0 – коефіцієнт, котрий ураховує погіршення умов вентиляції двигунів у період пуску та гальмування; ΔA_n та ΔA_r – втрати енергії у двигуні відповідно за час пуску та гальмування, кДж.

Окремі складові рівняння (7.6) визначаються таким чином.

Номінальні втрати у двигуні

$$\Delta P_n = P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}, \quad (7.7)$$

де P_n – номінальна потужність двигуна при тривалому режимі роботи, кВт;
 η_n – номінальний ККД при тривалому режимі роботи.

Оскільки у довідниках для кранових електродвигунів з короткозамкненим ротором значення P_n та η_n для тривалого режиму роботи звичайно не приводиться, можна прийняти

$$P_n = P_{0,25} \sqrt{\frac{TB_n}{100}} = 0,5 P_{0,25}, \quad \eta_n \cong \eta_{0,25},$$

де $P_{0,25}, \eta_{0,25}$ – відповідно номінальна потужність та ККД двигуна при $TB_n = 25\%$.

Втрати в усталеному режимі

$$\Delta P = \frac{\Delta P_2 t_2 + \Delta P_6 t_6 + \Delta P_{10} t_{10} + \Delta P_{13} t_{13}}{t_2 + t_6 + t_{10} + t_{13}}, \quad (7.8)$$

де $\Delta P_2, \Delta P_6, \Delta P_{10}, \Delta P_{13}$ – втрати в усталеному режимі відповідно при моментах навантаження (ділянка t_2 на рис. 2.3), M'_{c1} (ділянка t_6), M_{c2} (ділянка t_{10}), та M'_{c2} (ділянка t_{13}).

Дійсне значення t_2, t_6, t_{10}, t_{13} можуть бути знайдені за результатами графо-аналітичного розрахунку перехідних процесів асинхронного привода.

Для спрощення розрахунків можна прийняти $t_2 = t_6 = t_{10} = t_{13}$. Тоді рівняння (7.8) приймає вигляд

$$\Delta P = \frac{\Delta P_2 + \Delta P_6 + \Delta P_{10} + \Delta P_{13}}{4}, \quad (7.9)$$

Витрати на окремих ділянках:

$$\Delta P_2 = \frac{M_{c1} \omega_0}{\eta_1} (1 - \eta_1), \quad (7.10)$$

$$\Delta P_6 = M'_{c1} \omega_0 (1 - \eta'_1), \quad (7.11)$$

$$\Delta P_{10} = \frac{M_{c2} \omega_0}{\eta_2} (1 - \eta_2), \quad (7.12)$$

$$\Delta P_{13} = \frac{M'_{c2} \omega_0}{\eta'_2} (1 - \eta'_2), \quad (7.13)$$

де $\eta_1, \eta'_1, \eta_2, \eta'_2$ – ККД двигуна відповідно при моментах навантаження $M_{c1}, M'_{c1}, M_{c2}, M'_{c2}$.

Оскільки у довідниках залежність ККД від навантаження звичайно не приводять, орієнтовно приймаємо

$$\eta_1 = \eta_{0,25}, \eta'_1 = \eta_{0,25}, \eta_2 = 0,95\eta_{0,25}, \eta'_2 = 0,95\eta_{0,25},$$

де $\eta_{0,25}$ – ККД двигуна при $T_B = 25\%$

Відносна тривалість вмикання

$$\xi = \frac{t_{p1} + t_{p2}}{T_u}, \quad (7.14)$$

Для двигуна з самовентіляцією рекомендується приймати $\beta_0 = 0,5$.

Втрати при спуску (ділянки t_1, t_4, t_9, t_{12} на рис. 2.3)

$$\Delta A_n = J'_1 \omega_0^2 (1 + r_1 / r'_2) + J'_2 \omega_0^2 (1 + r_1 / r'_2), \quad (7.15)$$

де J'_1 та J'_2 – моменти інерції привода з асинхронним двигуном відповідно при моментах M_{c1} та M_{c2} ; r_1 – опір фази статора; r'_2 – приведений опір фази ротора.

Втрати при гальмуванні

$$\Delta A_T = 3J'_1 \omega_0^2 (1 + r_1 / r'_2) + 3J'_2 \omega_0^2 (1 + r_1 / r'_2), \quad (7.16)$$

Фактичне число вмикань двигуна за годину

$$h_{фак} = 3600 / T_u, \quad (7.17)$$

При правильному виборі двигуна за нагріванням повинна додержуватися умова

$$h_{фак} \leq h_{доп}, \quad (7.18)$$

Більш детально питання визначення втрат в електроприводах та допустимого числа вмикань асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором викладані в літературі [1, 2, 3].

8. ВИБІР ДОДАТКОВОГО ОПОРУ ТА СКЛАДАННЯ СХЕМИ ЇХ З'ЄДНАННЯ

В якості додаткових опорів у колі якоря двигуна широко застосовуються ящики опорів із чавунними елементами, технічні характеристики котрих наведено в [5]. Ящики опорів загально-промислового призначення типів ЯС-100 та ЯС-101 і кранові типа Н складаються з окремих елементів, з'єднаних між собою послідовно та мають затискачі для зовнішніх з'єднань.

Схеми розташування затискачів із зазначенням кількості елементів, замкнених між сусідніми затискачами приведені у [5]. Конструкція затискачів така, що дозволяє їх легко перез'єднувати у процесі монтажу резисторів та змінювати кількість елементів поміж сусідніми виводами.

Резистори вибираються за нагріванням шляхом визначення еквівалентного за перегрівом тривалого струму I_e . Якщо час роботи резистора значно менше сталої часу нагрівання опорів, то

$$I_e = I_p \sqrt{TB_p} \quad , \quad (8.1)$$

де $I_p = \sqrt{(I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2)/3}$ – еквівалентне значення струму резистора; $TB_p = t_{p.p}/T_{ц}$ – тривалість включення резисторів; $t_{p.p} = t'_1 + t_3 + t'_4 + t_7 + t'_9 + t_{11} + t'_{12} + t_{14}$ – час роботи (включеного стану) резисторів (див. рис.6.1).

Резистори вибираються з умови

$$I_{доп} \geq I_e \quad , \quad (8.2)$$

де $I_{доп}$ – тривалий допущений струм для обраного типу резисторів.

Необхідна величина опору на кожній пусковій характеристиці двигуна набирається шляхом електричного з'єднання кількох елементів або ящиків поміж собою. Необхідна кількість секцій, наприклад, для характеристики противмикання, визначається як

$$Z_{ел} = \frac{R_n - r_я}{r_{ел}} \quad , \quad (8.3)$$

де R_n – опір якірного кола для характеристики противмикання; $r_{ел}$ – опір одного елемента.

Аналогічним чином визначається кількість секцій опорів для інших характеристик. За отриманим значенням секцій складається схема з'єднання опорів. Приклади схем з'єднання приведені в [5].

9. РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ПУСКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З УРАХУВАННЯМ ПРУЖНИХ МЕХАНІЧНИХ ЗВ'ЯЗКІВ

9.1. Розрахункова схема механічної частини електропривода

Для ряду виробничих механізмів, коли двигун і робоча машина з'єднана за допомогою довгого валу, підйомних установок з довгими канатами, а також механізмів зі складним кінематичним ланцюгом коефіцієнт жорсткості зв'язків є невеликим і деформація ланок стає суттєвою. При цьому механічна частина привода є пружною системою, прикладання до якої момента двигуна викликає коливання мас, зв'язаних поміж собою пружним елементом. Ці коливання збільшують динамічні навантаження механічних ланок робочого обладнання та прискорюють їх спрацювання.

За рахунок коливань фактичні швидкості та прискорення у пружній системі суттєво відрізняються від середніх значень, що перешкоджає керуванню електроприводом.

Конкретні кінематичні схеми виробничих механізмів є досить складними та відрізняються різноманітністю. Однак, як правило, для дослідження динаміки електропривода з урахуванням пружних зв'язків реально складна кінематична схема замінюється двомасовою пружною системою, розрахункова схема яка зображена на рис. 9.1. У двомасовій системі всі маси реальної системи зводяться до двох. Одна з мас жорстко зв'язана з двигуном та має момент інерції J_1 , а друга маса з моментом інерції J_2 жорстко зв'язана з механізмом та відокремлена від двигуна пружним елементом з жорсткістю C .

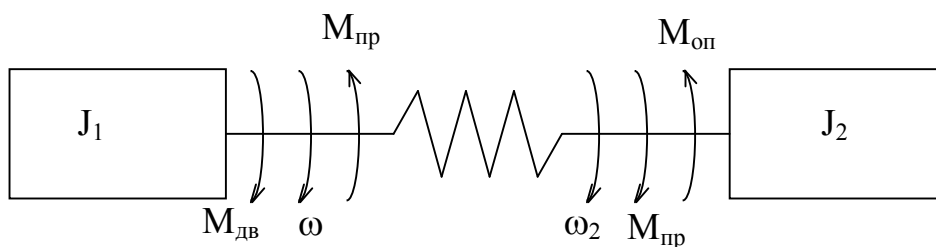


Рис.9.1. Розрахункова схема двомасової пружної системи.

При складанні розрахункових схем коефіцієнти жорсткості приводяться до валу двигуна за формулою

$$C_{np} = C / i^2, \quad (9.1)$$

Якщо, наприклад, у завданні $C_1 = \infty$, $C_2 \neq 0$, то моменти інерції J_1 та J_2 , котрі входять до розрахункової схеми, знаходяться як

$$J_1 = \delta(J_D + J_{M1}), \quad (9.2)$$

$$J_2 = \frac{(J_{M2} + J_{p1})}{i^2}, \quad (9.3)$$

9.2. Рівняння руху двомасової пружної системи

Для математичного опису руху двомасової системи пружний елемент уявно розрізають, а до махових мас прикладають рівні та протилежно направлені моменти пружної деформації $M_{пр}$.

З урахуванням цього положення, для розрахункової схеми рис. 9.1 можна записати рівняння руху двомасової системи:

$$M_{дв} - M_{пр} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} \quad , \quad (9.4)$$

$$M_{пр} - M_c = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} \quad , \quad (9.5)$$

$$M_{пр} = C(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{C}{p}(\omega_1 - \omega_2) \quad , \quad (9.6)$$

де p – оператор диференціювання.

На базі отриманих рівнянь можна скласти структурну схему двомасової системи, як зображено на рис. 9.2.

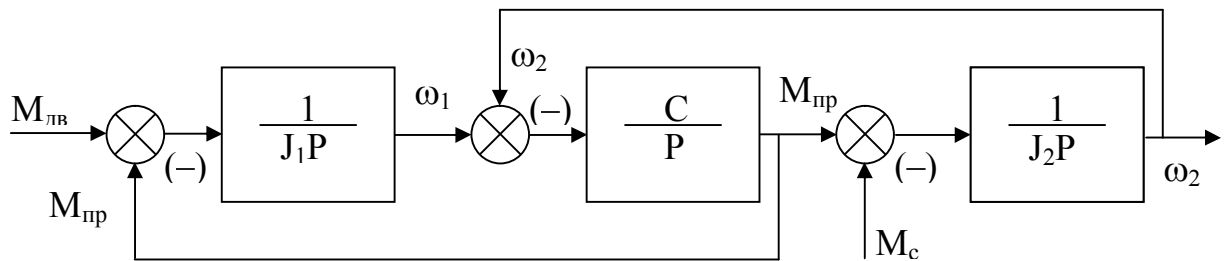


Рис.9.2. Структурна схема двомасової пружної системи.

9.3. Механічні перехідні процеси у двомасовій пружній системі

Припустимо, що при пуску асинхронного двигуна момент залишається постійним та рівним середньому значенню

$$M_{дв.сер} = (M_n + M_{кр}) / 2 \quad , \quad (9.7)$$

При такому припущенні в абсолютно жорсткій системі швидкість двигуна пропорційна швидкості виробничого механізму й змінюється за лінійним законом

$$\omega = \frac{(M_{дв.сер} - M_c)}{J} t = \varepsilon t \quad , \quad (9.8)$$

Час перехідного процесу при зміні швидкості від нуля до ω_c визначається рівнянням

$$t_{пер} = \frac{\omega_c J}{M_{дв.сер} - M_c} \quad , \quad (9.9)$$

Для двомасової пружної системи швидкість двигуна ω_1 та виробничого механізму ω_2 не співпадає та визначається як

$$\omega_1 = \varepsilon_{сер} t + \frac{\varepsilon_{сер} J_2}{J_1 \psi_0} \sin \psi_0 t, \quad (9.10)$$

$$\omega_2 = \varepsilon_{сер} t - \frac{\varepsilon_{сер}}{\psi_0} \sin \psi_0 t, \quad (9.11)$$

де $\varepsilon_{сер} = (M_{дв.сер.} - M_c) / (J_1 + J_2)$ – середнє значення прискорення привода;

де $\psi_0 = \sqrt{\frac{C(J_1 + J_2)}{J_1 J_2}} = \frac{2\pi}{T_0}$ – частота вільних коливань двомасової системи;

T_0 – період вільних коливань.

Момент пружної деформації знаходиться з виразу

$$M_{пр} = M_{пр.сер} (1 - \cos \psi_0 t), \quad (9.12)$$

де $M_{пр.сер.} = (M_{дв.сер.} - M_c) J_2 / (J_1 + J_2)$ – середнє значення пружного моменту.

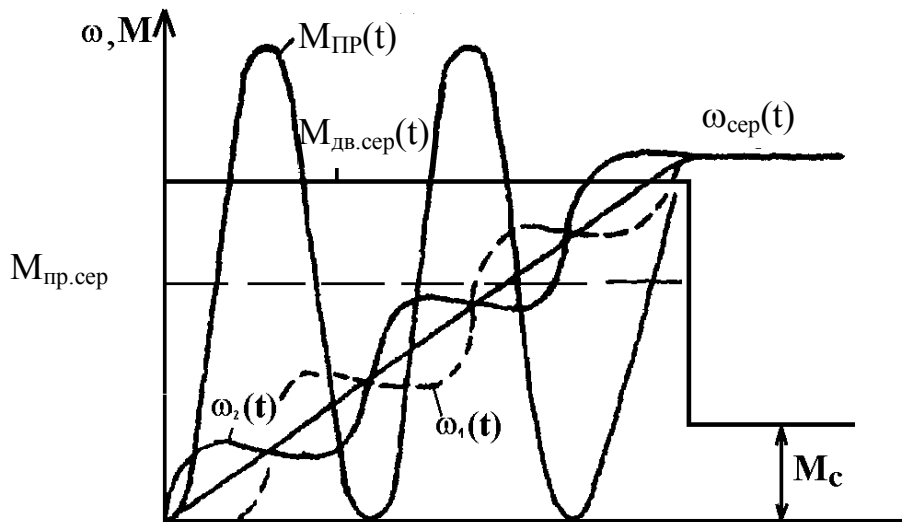


Рис.9.3. Криві перехідного процесу в двомасовій пружній системі.

На рис.9.3 зображено характер залежностей $\omega_1(t)$, $\omega_2(t)$ та $M_{пр}(t)$, з яких видно, що при $M_{дв} = \text{const}$ середнє значення швидкості $\omega_{сер}$ двомасової системи дорівнює швидкості ω абсолютно жорсткої системи. Однак миттєві значення швидкості ω_1 та ω_2 містять гармонічні складові, і суттєво відрізняються від середніх значень.

При інших рівних вимогах коливання швидкості ω_1 тим більші, чим більший момент інерції J_2 . Збільшення частоти вільних коливань при тих же прискореннях $\varepsilon_{сер}$ знижує амплітуду коливань ω_1 та ω_2 . За рахунок

пружних коливань збільшуються динамічні навантаження передач, котрі значно перебільшують середні значення. Якщо $J_2 \gg J_1$, то $M_{пр.маx} = 2M_{дв.сер}$.

У реальній системі завжди є втрати, тому коливання швидкості з часом затухають. Звичайно, природне затухання невелике та за час затухання здійснюється 10÷30 коливань.

10. ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ПРОЕКТУ

Курсовий проект оформлюється у вигляді пояснювальної записки та графічної частини.

Пояснювальна записка це сброшурована папка обсягом 25-30 сторінок рукописного тексту з форматом листів 297*210 мм. Допускається друк записки на машинці з виписуванням формул від руки.

Записка повинна мати : титульний аркуш, форма якого показана в додатку 1, заповнений бланк завдання на курсове проектування підписаний керівником проекту (додаток 3); анотацію розміщена на окремій сторінці. В якій коротко викладається суть роботи, основні принципи вирішення питань та отримані результати; зміст, в якому приводяться повні назви розділів проекту з указанням початкових сторінок розділів; основний текст з ілюстраційним матеріалом та список використаної літератури.

Список літератури розміщується на прикінці записки. Посилання на літературу в тексті тільки у квадратних дужках, наприклад [3].

Записка пишеться на одній стороні аркуша з полями з усіх чотирьох сторін. Розміри лівого поля 35 мм, правого 10 мм, нижнього та верхнього 20 мм.

Записка виконується з наскрізним переліком аркушів, починаючи з титульного аркуша. На титульному аркуші номер не ставиться. Номер аркуша ставиться на відстані 1 см від першого рядка тексту у верхній правій частині аркуша арабськими цифрами.

Пояснювальна записка повинна бути написана грамотно й чітко.

Розрахунки та дані до них повинні супроводжуватися короткими поясненнями та з посиланнями на літературу.

Усі розрахунки у проекті виконуються у системі одиниць СІ. Спочатку пишеться формула в загальному вигляді, потім підставляються чисельні значення та вказується кінцевий результат з відповідною розмірністю. При необхідності дається розшифровка буквених позначень у формулі.

Результати розрахунку для зручності можуть зводитись до таблиці, котрі розташовуються за текстом записки. На кожну таблицю в тексті необхідно давати посилання. Слово "таблиця" в тексті перед номером пишеться скорочено (табл.). Таблиці необхідно давати із заголовком. Над таблицею у правому боці аркуша розташовується її номер (арабськими цифрами). Нумерація таблиць – з прив'язкою до розділів.

Текст записки повинен супроводжуватися ілюстративним матеріалом у вигляді графіків, схем, котрі виконуються на міліметровому або білому нелінованому аркуші. Рисунки можна давати з подрисуночним підписом або без нього, але по всій записки треба дотримуватися одноманітності. Рисунки, схеми, графіки повинні мати нумерацію з прив'язкою до розділів (арабськими цифрами). На кожний рисунок повинно бути посилання у тексті. Наприклад: "на рис. 2.2 зображена навантажувальна діаграма механізму".

Графічна частина проекту повинна відповідати завданню та включати в собі один аркуш кресленика формату А1 (594*841мм). На кресленику приводяться : механічні характеристики двигуна, діаграма швидкості, графіки перехідних процесів. Схеми та графіки на аркуші повинні мати назву, а аркуш – основний напис (штамп). Основний напис виконується у правому нижньому куту аркуша. Форма основного напису (штампу) приведена у додатку 4.

На координатній осі показуються тільки прийняті у тексті позначення величин; при наявності цифр обов'язково вказуються одиниці виміру у відповідності з прийнятими скороченнями.

ВАРІАНТИ ЗАВДАННЯ

№ зав-дання	M_{p1} , Нм	M_{p2} , Нм	$T_{ц}$, с	$TВ_M$, %	ω_p , рад/с	J_{p1} , кгм ²	J_{p2} , кгм ²	η_{n1}	c_1 , Нм/рад *10 ³	c_2 , Нм/рад *10 ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	12000	1800	110	17	2,0	520	300	0,65	0,75	∞
2	10500	1600	45	22	2,5	440	260	0,70	0,70	∞
3	2500	250	70	44	3,0	120	60	0,75	0,20	∞
4	4000	400	50	41	3,5	210	120	0,80	0,25	∞
5	1000	80	40	34	4,0	55	30	0,85	0,10	∞
6	8000	1200	100	21	2,0	830	480	0,65	∞	300
7	4000	600	60	48	2,5	650	360	0,70	∞	215
8	7000	700	55	43	3,0	770	420	0,75	∞	350
9	6000	600	50	34	3,5	350	210	0,80	∞	390
10	2500	200	90	51	4,0	65	35	0,85	∞	230
11	10000	1500	105	27	2,0	920	530	0,65	0,76	∞
12	9000	1300	90	18	2,5	670	380	0,70	0,70	∞
13	4500	450	50	47	3,0	330	180	0,75	0,60	∞
14	2000	200	80	42	3,5	120	70	0,80	0,25	∞
15	7000	550	65	26	4,0	400	20	0,85	0,75	∞
16	9000	1300	80	31	2,0	1730	1000	0,65	∞	450
17	5000	800	75	45	2,5	210	120	0,70	∞	250
18	7000	100	95	30	3,0	450	260	0,75	∞	400
19	3000	300	65	33	3,5	100	70	0,80	∞	150
20	5500	450	55	27	4,0	260	140	0,85	∞	420
21	10000	2000	65	35	2,0	1750	1050	0,65	0,70	∞
22	7500	1100	115	23	2,5	550	320	0,70	0,65	∞
23	6500	650	80	33	3,0	660	370	0,75	0,55	∞
24	3500	350	75	36	3,5	360	200	0,80	0,50	∞
25	2000	150	105	43	4,0	40	20	0,85	0,40	∞
26	8500	1300	80	20	2,0	430	250	0,65	∞	300
27	9000	1700	90	28	2,5	830	490	0,70	∞	400
28	5000	500	40	45	3,0	460	250	0,75	∞	520
29	8000	800	95	30	3,5	570	310	0,80	∞	460
30	4000	300	120	43	4,0	210	110	0,85	∞	320
31	12000	1900	60	26	2,0	2310	1340	0,65	0,45	∞
32	9500	1400	90	32	2,5	1620	930	0,70	0,40	∞
33	8500	850	60	24	3,0	230	130	0,75	0,55	∞
34	4500	450	85	31	3,5	150	85	0,80	0,42	∞

Продовження дод.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
35	6500	500	60	35	4,0	200	110	0,85	0,50	∞
36	9000	1700	40	38	2,0	1470	870	0,65	∞	500
37	6000	900	95	38	2,5	81	470	0,70	∞	400
38	7500	750	80	28	3,0	610	340	0,75	∞	450
39	7000	700	40	23	3,5	530	300	0,80	∞	475
40	3000	250	90	49	4,0	280	150	0,85	∞	150
41	6000	1000	70	46	2,0	280	160	0,65	0,51	∞
42	8500	1300	95	29	2,5	440	260	0,70	0,65	∞
43	3500	350	55	39	3,0	70	40	0,75	0,35	∞
44	5000	500	100	32	3,5	210	120	0,80	0,46	∞
45	5000	400	70	29	4,0	180	100	0,85	0,40	∞
46	4000	600	45	50	2,0	830	480	0,65	∞	310
47	5500	800	65	34	2,5	650	370	0,70	∞	360
48	7000	700	75	22	3,0	770	420	0,75	∞	560
49	2500	250	85	50	3,5	45	35	0,80	∞	170
50	1500	120	95	52	4,0	50	30	0,85	∞	115

_____ (найменування вишого навчального закладу)

Кафедра _____

Дисципліна _____

Спеціальність _____

Курс _____ Група _____ Семестр _____

ЗАВДАННЯ
на курсовий проект студента

_____ (прізвище , ім'я та по батькові)

1. Тема проекту _____

2. Термін здавання студентом закінченного проекту _____

3. Вихідні дані до проекту _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік підлежних розробки питань) _____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслеників) _____

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№№ зп	Найменування етапів курсowego проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
----------	--	-----------------------------------	----------

Студент _____
(підпис)

Керівник _____
(підпис)

_____ (прізвище , ім'я та по батькові)

” ” _____ 20__ р.

Навчально-методичне видання

А.А. Колб
Г.Г. Дяченко

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до курсового проєкту з дисципліни «Теорія електропривода»
для студентів спеціальності
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Підготовлено до виходу в світ
у Національному технічному університеті
«Дніпровська політехніка».
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19