

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет "Запорізька політехніка"

ТЕКСТИ (конспект) лекцій з дисципліни

«ЕП і СК ПТБДМ»
для студентів спеціальності 136 “Металургія”
усіх форм навчання
частина 3

— — —

Тексти (конспект) лекцій з дисципліни “ЕП і СК ПТБДМ” для студентів спеціальності 136 “Металургія” усіх форм навчання частина 3 /Укл.: Ю.О. Крисан, Є.В. Васильєва. - Запоріжжя: НУ “Запорізька політехніка”, 2019. - 80 с.

Укладачі: Ю.О. Крисан, доцент, ктн;
Є.В. Васильєва, старший викладач.

Рецензенти: М.Л. Антонов, ктн;

Відповідальний
за випуск: Є.В. Васильєва, старший викладач.

Затверджено
на засіданні кафедри “ЕПА”
Протокол № 12
від “09” липня 2019.

Рекомендовано до видання
НМК ЕТФ
Протокол № 4
від “21” листопада 2019.

ЗМІСТ

5 Перехідні режими в ЕП	152
5.1 Загальна характеристика	152
5.2 Класифікація виконавчих механізмів у залежності від характеру дії статичного моменту опору (M_c)	153
5.3 Пуск ДПС НЗ до основної швидкості при одному ступені пускового реостата	155
5.4 Пуск ДПС НЗ до основної швидкості при багатоступінчастому пусковому резисторі	160
5.5 Пуск ДПС НЗ з урахуванням електромагнітного перехідного процесу	164
5.6 Перехідний режим динамічного гальмування ДПС НЗ	168
5.7 Перехідні режими в ЕП з трифазними асинхронними двигунами	171
6 Вибір електродвигунів	174
6.1 Нагрівання й охолодження двигунів. Класифікація режимів роботи ЕП у відповідності до характеру змінювання навантаження	177
6.1.1 Тривалий (довготривалий) номінальний режим (S1)	178
6.1.2 Короткочасний номінальний режим (S2)	179
6.1.3 Повторно – короткочасний номінальний режим (S3)	180
6.1.4 Номінальні режими S4 - S8.....	182
6.1.5 Навантажувальні діаграми електроприводів	183
6.1.6 Розрахунок потужності електродвигуна при тривалому режимі роботи (S1) й незмінному навантаженні	186
6.1.7 Розрахунок потужності двигуна при тривалому режимі роботи S1 й змінному циклічному навантаженні	187
6.1.8 Визначення допустимої частоти вмикань АД з короткозамкненим ротором	192
7 Основи автоматичного керування електроприводами	196
7.1 Вступна частина	196
7.2 Зображення й позначення елементів електричних схем. Загальні правила виконання схеми	197
7.2.1 Схема електрична структурна. Позначення документа E1 (наприклад, у кутовому підпису документа)	197
7.2.2 Функціональна електрична схема. Позначення документа E2 (наприклад, у кутовому підпису документа)	198

7.2.3 Принципова електрична схема. Позначення документа Е3 (наприклад, на кутовому підпису документа)	199
7.2.4 Схема електрична з'єднань. Позначення документа Е4 (наприклад, на кутовому підпису документа)	201
7.2.5 Схема електрична підмикання. Позначення документа Е5 (наприклад, на основному кутовому підпису документа)	202
7.2.6 Схема електрична розташування. Позначення документа Е7 (наприклад, на основному кутовому підпису документа)	202
7.2.7 Умовні літерно-цифрові позначення в електричних схемах	203
7.3 Розімкнені системи автоматичного керування	206
7.3.1 Принципи автоматичного керування в розімкнених релейно-контактних системах	206
7.3.2 Керування пуском ДПС у функції кутової швидкості	208
7.3.3 Керування пуском ДПС у функції струму	209
7.3.4 Керування пуском ДПС у функції часу	212
7.4 Замкнені системи автоматичного керування	217
7.4.1 Основи автоматичного керування електроприводів постійного струму	218
7.4.2 Основи автоматичного керування електроприводів змінного струму	221
7.4.3 Стежний електропривод	224
7.4.4 Основи програмного керування ЕП	226
Перелік Посилань	227

5 ПЕРЕХІДНІ РЕЖИМИ В ЕП

5.1 Загальна характеристика

Перехідні режими ЕП – це режими роботи при переході від одного усталеного стану ЕП до іншого, які відбуваються під час пуску, гальмування, реверсування, різкого прикладення навантаження на валу. Ці режими характерні змінюванням ЕРС, кутової або лінійної швидкостей, моменту й струму.

Перехідні режими викликані двома причинами.

По-перше, технологічні чинники.

По-друге, непередбачені чинники, такі як аварія, порушення умов нормального електропостачання й таке інше.

Конструкція й будова виробничого механізму і особливо технологічні вимоги та вимоги охорони праці накладають певні обмеження на величину навантаження, швидкості, прискорення, температури, шумів й таке інше. Збоку техніки й технології ці обмеження викликані прагненням запобігання поломки механізмів, виходу із ладу обладнання, браку продукції.

На характер протікання перехідного режиму впливають такі чинники:

- властивості виконавчого механізму;
- тип електродвигуна;
- особливості механічної передачі (кінематики);
- принцип дії та властивості апаратури керування;
- режим роботи.

До цього часу ще не вирішені досить точно такі задачі:

- змінювання індуктивності обмоток при змінюванні напруженості магнітного поля;

- величина опору перехідного контакту колектор-щітка;
- точне урахування насиченості магнітного матеріалу й інше.

У будь-якому перехідному режимі ЕП одночасно й взаємопов'язано між собою діють перехідні механічні, електромагнітні й теплові процеси.

Таким чином, у перехідному режимі ЕП у певному кількісному співвідношенні діють такі інерції:

- інерція механічна виконавчих механізмів, проміжних передач, рухомих частин двигунів та апаратів тощо;

- інерція електромагнітна, що обумовлена індуктивністю та активним опором електричних елементів привода;
- інерція теплова.

Всі ці фактори уповільнюють протікання перехідних режимів. Ступінь впливу інерційностей того чи іншого виду визначається інерційними сталими.

Механічна інерція ЕП характеризується електромеханічною сталою часу T_M , [с].

Електромагнітна інерція характеризується електромагнітною сталою часу T_E . Вона визначається співвідношенням індуктивності L , [Гн] та активного опору R , [Ом]:

$$T_e = \frac{L}{R}, [с].$$

Теплова інерція характеризується сталюю часу нагрівання Θ .

Вона характеризується співвідношенням теплоємності C_T , $\left[\frac{Дж}{^{\circ}C} \right]$ та

теплопередачі A_T , $\left[\frac{Дж}{^{\circ}C \cdot c} \right]$:

$$\Theta = \frac{C_T}{A_T}, [с].$$

Розрахунок перехідних режимів ЕП в основному зводиться до одержання, або побудови залежностей

$$i = f_1(t); M = f_2(t); \omega = f_3(t).$$

5.2 Класифікація виконавчих механізмів у залежності від характеру дії статичного моменту опору (M_c)

Рівняння руху є одним з двох основних рівнянь, від яких залежить протікання перехідного режиму, а його складовою, суттєво впливаючи на характер руху, є статичний момент опору M_c , який для різних виконавчих механізмів проявляється по різному.

Основними факторами, від яких залежить величина M_c , є швидкість, шлях, час, особливості технологічного процесу виконавчих механізмів.

В залежності від характеру M_c усі виконавчі механізми умовно можна поділити на 5 класів.

1-й клас. До цього класу належать виконавчі механізми з незмінним статичним моментом

$$M_c = Const,$$

такі, як вантажопіднімальні механізми, прокатні стани, розвантажувально-навантажувальні роботи, стругальні верстати.

2-й клас. До цього класу належать виконавчі механізми, у яких M_c залежить від швидкості v

$$M_c = f(v).$$

Ця залежність може бути незначною, або значною, лінійною, або нелінійною. Момент може залежати від швидкості у степені 0-2, а для дуже швидкохідних машин – навіть 3-4.

3-й клас. До цього класу належать механізми, у яких M_c залежить від шляху (від кута повороту у обертальних приводах) α

$$M_c = f(\alpha),$$

такі виконавчі механізми у механічній частині яких наявні такі перетворювальні ланки, як кривошипно-важільні механізми, ексцентрикний механізм інші механізми. Для багатьох таких виконавчих механізмів функцію $M_c = f(\alpha)$ важко задати аналітично, тоді вона задається графічно.

4-й клас. До цього класу належать механізми, M_c яких одночасно залежить й від швидкості v й від шляху α

$$M_c = f(v, \alpha),$$

такі як рейковий транспорт, привод розвідних мостів й таке інше.

5-й клас. До цього класу належать механізми, статичний момент опору яких є функцією часу t

$$M_c = f(t),$$

такі, які працюють під дією збурної сили, що змінюється у часі за періодичним законом, або стежний привод.

5.3 Пуск ДПС НЗ до основної швидкості при одному ступені пускового реостата

Перехідний процес пуску ДПС НЗ до основної кутової швидкості відбувається у випадку живлення двигуна від мережі постійного струму при вмиканні у коло якоря лінійного контактора КМ, дивись рисунок 5.1.

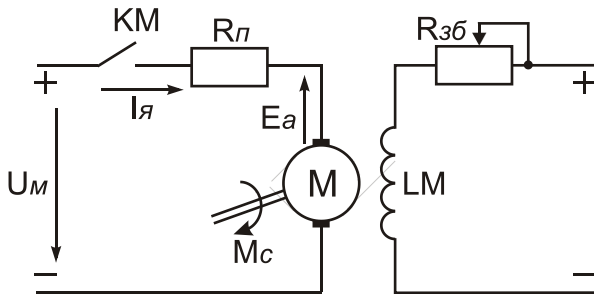


Рисунок 5.1 Схема пуску з ввімкнутим на весь час пуску пусковим реостатом.

У наведеній схемі на увесь час пуску постійно увімкнений резистор R_{Π} (пусковий реостат), отже загальний опір якорного кола буде

$$R_{\text{я}} = R_{\text{яв}} + R_{\Pi}.$$

Хай виконавчий механізм , на який працює ДПС НЗ буде 1-го класу , отже

$$M_C = \text{Const}.$$

Припустимо , що відбувається тільки електромеханічний перехідний процес, отже індуктивність якоря відсутня

$$L_{\text{я}} = 0.$$

Будемо вважати, що джерело живлення якірного кола має значну потужність, отже

$$U_M = \text{Const}.$$

Будемо також вважати, що ДПС НЗ скомпенсований (усунено реакцію якоря), тоді магнітний потік під час пуску не змінюється, тобто

$$\Phi = \text{Const}.$$

З урахуванням цих спрощуючих припущень рівняння рівноваги при пуску будуть мати вигляд:

- рівняння рівноваги напруги

$$U_M = E_{\text{я}} + i_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}; \quad (5.1)$$

- рівняння руху

$$M = M_C + M_{\text{дин}}. \quad (5.2)$$

У рівняннях (5.1) й (5.2) складові їх мають такі значення.

ЕРС якоря:

$$E_a = C_M \cdot \Phi \cdot \omega = k\omega, [B]$$

де $k = C_M \cdot \Phi [B \cdot c].$

Динамічний момент, $H \cdot \text{м}$:

$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}, [H \cdot \text{м}]$$

де J – момент інерції, $[кг \cdot \text{м}^2],$

$\frac{d\omega}{dt}$ - кутове прискорення, $[с^{-2}].$

Момент двигуна:

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot i_{\text{я}} = k \cdot i_{\text{я}}, [H \cdot \text{м}].$$

З урахуванням цих позначень, із рівняння (5.2) визначимо значення струму якоря й підставимо його в рівняння (5.1)

$$\begin{aligned} k \cdot i_{\text{я}} &= M_{\text{с}} + J \frac{d\omega}{dt}; \\ i_{\text{я}} &= \frac{J}{k} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{M_{\text{с}}}{k} \\ U_{\text{м}} &= k\omega + i_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}, \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$U_{\text{м}} = k\omega + \frac{J \cdot R_{\text{я}}}{k} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{M_{\text{с}}}{k} \cdot R_{\text{я}}.$$

Поділимо останнє рівняння на k ($k \neq 0$)

$$\frac{U_{\text{м}}}{k} = \omega + \frac{J \cdot R_{\text{я}}}{k^2} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{M_{\text{с}} \cdot R_{\text{я}}}{k^2}. \quad (5.4)$$

Уведемо такі позначення

$$\frac{U_{\text{м}}}{k} = \frac{U_{\text{м}}}{C_{\text{м}} \cdot \Phi} = \omega_0 - \text{швидкість ідеального неробочого ходу}; [$$

$$\frac{B}{B \cdot c} = c^{-1}];$$

$$\frac{J \cdot R_{\text{я}}}{k^2} = T_{\text{м}} - \text{електромеханічна стала часу, с}; [$$

$$\frac{\kappa \mathcal{Z} \cdot \mathcal{M}^2 \cdot B}{A \cdot B^2 \cdot c^2} = \frac{H \cdot \mathcal{M}}{Bm} = \frac{H \cdot \mathcal{M} \cdot c}{H \cdot \mathcal{M}} = c];$$

$$\frac{M_{\text{с}} \cdot R_{\text{я}}}{k^2} = \Delta \omega_{\text{с}} - \text{перепад швидкості при навантаженні двигуна}$$

статичним моментом навантаження $M_{\text{н}}$ (характеристика 2) (дивись

рисунок 5.2); $\left[\frac{H \cdot \mathcal{M} \cdot O_{\text{м}}}{B^2 \cdot c^2} = \frac{Bm \cdot c \cdot B}{B^2 \cdot A \cdot c^2} = \frac{Bm}{Bm \cdot c} = \frac{1}{c} \right].$

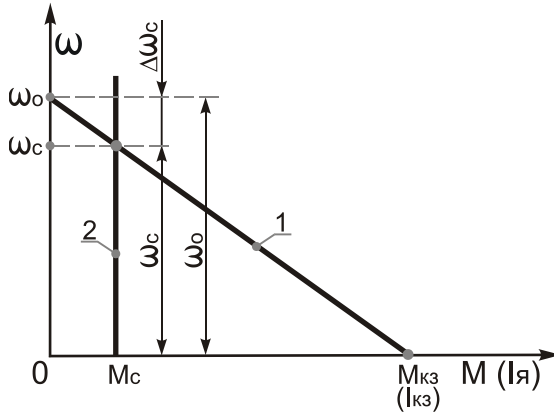


Рисунок 5.2 – Пускова статична характеристика.

У свою чергу електромеханічна стала часу T_M через момент короткого замикання $M_{кз}$ можна записати:

$$T_M = \frac{J \cdot \omega_0}{M_{кз}},$$

тобто

$$T_M = \frac{J \cdot R_{я}}{k^2} = \frac{J \cdot \omega_0}{M_{кз}} \quad (5.5)$$

Це досить легко довести:

$$M_{кз} = C_M \cdot \Phi \cdot I_{кз} = k \cdot I_{кз} = k \cdot \frac{U_M}{R_{я}},$$

оскільки $I_{кз} = \frac{U_M}{R_{я}}$

$$M_{кз} = \frac{k \cdot U_M}{R_{я}} \cdot \frac{k}{k} = \frac{k^2}{R_{я}} \cdot \frac{U_M}{k} = \frac{k^2}{R_{я}} \cdot \omega_0$$

оскільки $\frac{U_M}{k} = \frac{U_M}{C_M \cdot \Phi} = \omega_0$

$$M_{\kappa 3} = \frac{k^2}{R_{\text{Я}}} \cdot \omega_0, \text{ або } \frac{R_{\text{Я}}}{k^2} = \frac{\omega_0}{M_{\kappa 3}} \quad (5.6)$$

Отже, електромеханічною сталою часу називають час, на протязі якого ЕП, що має момент інерції J , розженеться без навантаження із нерухомого стану до швидкості ідеального неробочого ходу ω_0 (характеристика 1) при незмінному моменті двигуна, що дорівнює моментові короткого замикання $M_{\kappa 3}$ двигуна.

З урахуванням (5.3), (5.4) та прийнятих позначень, рівняння (5.1) та (5.2) можна подати у такому вигляді

$$\omega_0 = \omega + T_M \cdot \frac{d\omega}{dt} + M_C \cdot \frac{R_{\text{Я}}}{k^2}, \quad (5.7)$$

$$i_{\text{Я}} = \frac{J}{k} \cdot \frac{d\omega}{dt} + I_C, \quad (5.8)$$

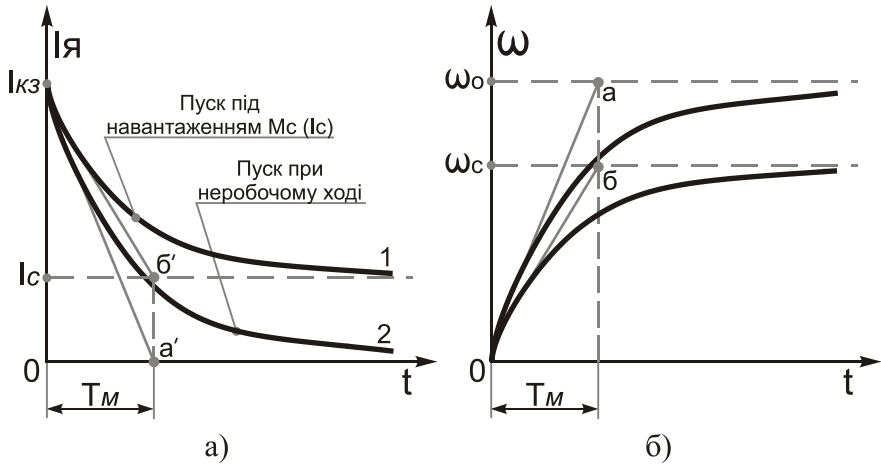
де $I_C = \frac{M_C}{k}.$

Теоретично процес пуску закінчується за нескінченно довгий час, проте практично можна вважати, що процес пуску завершується при

$$t_n = (3 \div 4) T_M,$$

оскільки кутова швидкість у цьому випадку відрізняється від свого усталеного значення не більш, ніж на $(5 - 2)\%$.

Таким чином, через час $t = 3 \cdot T_M$ після пуску швидкість установлюється практично усталеною, процес пуску можна вважати завершеним.



а – експоненти затухання струму якоря;
 б - експоненти затухання кутової швидкості.

Рисунок 5.3 – Графіки змінювання струму і швидкості при пуску.

Якби пуск здійснювався весь час під дією моменту $M_{\text{кз}}$, то кутова швидкість змінювалась би в часу по прямій $0a$ (при пуску двигуна без навантаження) й по прямій $0б$ – при пуску під навантаженням, рисунок 5.3 б.

У першому випадку був неробочий хід, а у другому – робота під навантаженням – T_M залишилась без змін.

5.4 Пуск ДПС НЗ до основної швидкості при багатоступінчастому пусковому резисторі

Перехідний процес пуску ДПС НЗ до основної кутової швидкості при багатоступінчастому пусковому реостаті здійснюється за схемою (для триступінчастого пускового реостата):

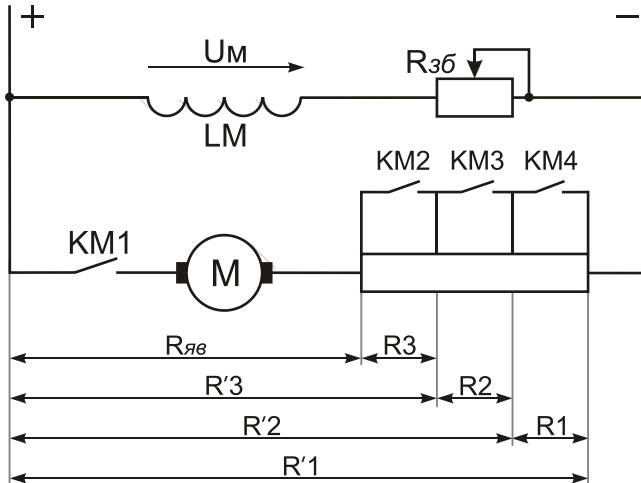


Рисунок 5.4 – Схема пуску ДПС НЗ для триступінчатого пускового реостата.

Аналіз електромагнітної сталої (рівняння 5.5):

$$T_M = \frac{J \cdot R_{я}}{k^2}$$

показує, що для прискорення перехідного режиму (при заданих J та k) слід зменшувати опір якорного кола, але це призведе до зростання струму при пуску.

При запуску ДПС НЗ у декілька ступенів задаються певними межами коливань пускового струму - від I_1 та I_2

$I_1 = I_{\min} = (1,1 \div 1,2) I_{ном}$ - мінімальний струм перемикання.

Цей струм повинен перевищувати номінальний на (10 – 20)% для впевненого здійснення запуску при найбільшому (номінальному) навантаженні.

$I_2 = I_{\max} = (2,2 \div 2,6) I_{ном}$ - максимальний струм перемикання (він же й початковий струм запуску).

Цей струм бажано збільшувати для прискорення часу перехідного режиму, але більш ніж у $\sim 2,5$ рази порівняно з

номінальним він не може бути збільшеним, оскільки зростає нагрівання обмоток й суттєво погіршується комутація.

На рисунку R'_1 ; R'_2 ; R'_3 і $R_{яв}$ позначені у масштабі, збільшеному у I_2/I_C разів.

У міру виведення пускового реостату опір якорного кола зменшується, отже зменшується T_m , що призводить до зменшення часу розгону якоря (зменшення сталої часу)

$$R'_1 > R'_2 > R'_3, \text{ отже}$$

$$t_1 > t_2 > t_3.$$

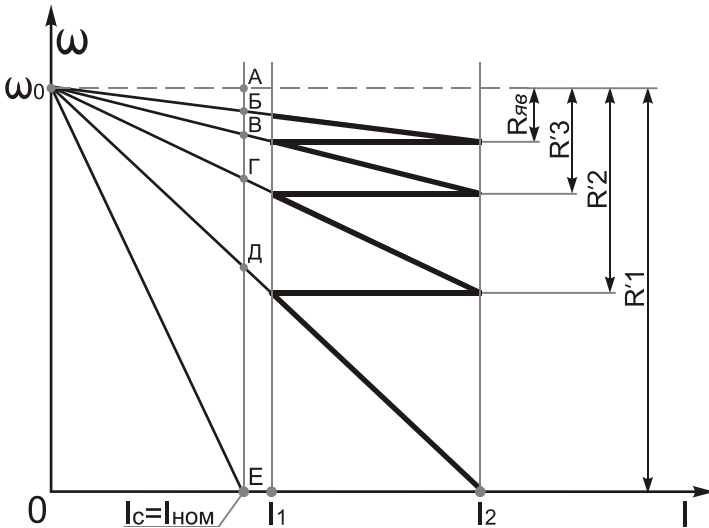


Рисунок 5.5 – Пускова діаграма ДПС НЗ з триступінчастим пусковим реостатом.

Величину опорів ступенів пускового реостата R_n ($R_n = R_1 + R_2 + R_3$) можна визначити графічно.

$$R'_1 = R_n + R_{яв} = R_1 + R_2 + R_3 + R_{яв};$$

$$R'_2 = R_2 + R_3 + R_{яв};$$

$$R'_3 = R_3 + R_{яв}.$$

$$R_n = \frac{\overline{B\overline{D}}}{\overline{A\overline{E}}} \cdot R_{ном};$$

$$R_{ном} = \frac{U_{ном}}{I_{ном}} - \text{номінальний опір двигуна}$$

$$R_1 = \frac{\overline{\Gamma\overline{D}}}{\overline{A\overline{E}}} \cdot R_{ном}; R_2 = \frac{\overline{B\overline{\Gamma}}}{\overline{A\overline{E}}} \cdot R_{ном}; R_3 = \frac{\overline{B\overline{B}}}{\overline{A\overline{E}}} \cdot R_{ном},$$

або:

$$R_n = \overline{B\overline{D}} \cdot m_R; R_1 = \overline{\Gamma\overline{D}} \cdot m_R; R_2 = \overline{B\overline{\Gamma}} \cdot m_R; R_3 = \overline{B\overline{B}} \cdot m_R,$$

де $m_R = R_{яв} / \overline{A\overline{A}}$ - масштаб опору.

Зауваження. Умовні позначення усіх опорів (та їх складових), прийнятих на рисунках 5.4 та 5.5, збігаються й відповідають таким текстової частини підрозділу 5.4.

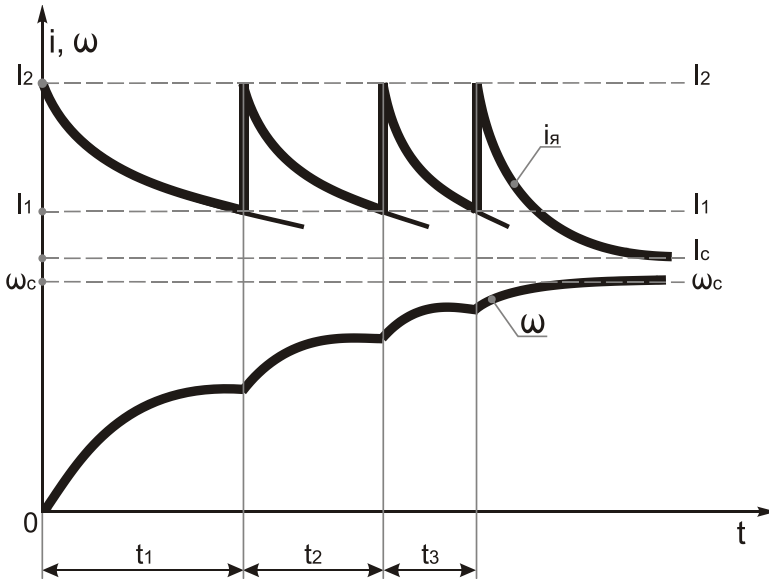


Рисунок 5.6 – Графік змінювання струму якоря і швидкості ДПС НЗ при його пуску в три ступеня пускового реостата.

Він характерний тим, що струм двигуна при пуску коливається у межах від I_1 до I_2 на початку пуску $I_{поч} = I_2$, у міру прискорення якоря, зростає ЕРС двигуна. Коли струм досягне значення I_1 слід вимкнути перший ступінь R_1 резистора R_n , щоб струм якоря знову досяг значення I_2 , й так далі. Аналогічним чином змінюється й крива кутової швидкості.

5.5 Пуск ДПС НЗ з урахуванням електромагнітного перехідного процесу

Коли час протікання електромагнітних перехідних процесів сумірний з часом протіканням електромеханічних перехідних процесів, слід ураховувати і вплив електромагнітної інерції якоря ($L_{я} \neq 0$).

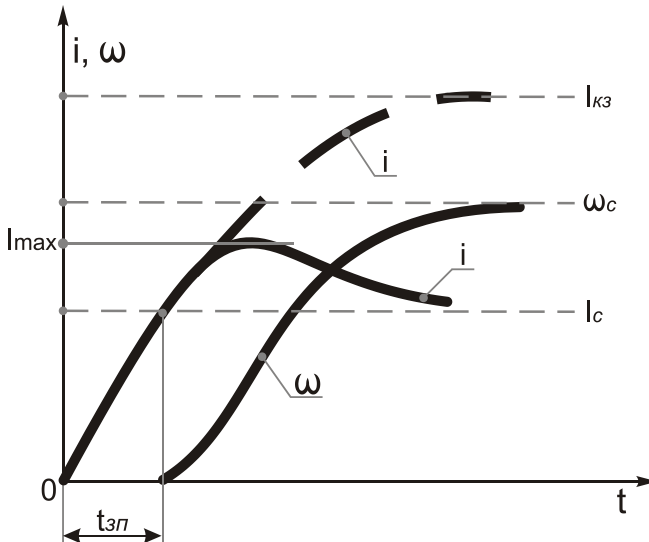


Рисунок 5.7 – Пуск ДПС НЗ з урахуванням індуктивності якоря.

Як видно, запуск складається з двох етапів.

1-й етап. Двигун нерухомий, поки струм якоря не досягне значення, необхідного для створення моменту зрушування. На цьому етапі збільшення струму якоря залежить від швидкості протікання електромагнітного процесу, яка визначається рівнянням рівноваги напруги для якірного кола

$$U_M = i_{\text{я}} R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} \quad (5.9),$$

Розв'язання рівняння (5.9) при індуктивності якоря $L_{\text{я}} = \text{Const}$ дає закон змінювання струму в якорі при нерухомому якорі:

$$i_{\text{я}} = \frac{U_M}{R_{\text{я}}} (1 - e^{-t/T_e}) = I_{K3} (1 - e^{-t/T_e}), \quad (5.10),$$

де: $I_{K3} = U_M / R_{\text{я}}$ - струм короткого замикання двигуна, [A];

$T_e = L_{\text{я}} / R_{\text{я}}$ - електромагнітна стала часу якірного кола, [с].

Крива струму якоря, що побудована за рівнянням (5.10), на графіку знаходиться у межах часу від нуля до $t_{\text{зн}}$.

$t_{\text{зн}}$ - час запізнення, визначається із (5.10) при підстановці у (5.10) значення

$$i_a = I_c.$$

Тоді (5.10) прийме такий вигляд:

$$t_{\text{зн}} = T_e \cdot \ln \frac{I_{K3}}{I_{K3} - I_c} \quad (5.11),$$

2 етап. Після закінчення часу $t_{\text{зн}}$ якір починає обертатися. Кутова швидкість збільшується, з'являється ЕРС якоря, яка впливає на струм якоря. Тепер уже обидва процеси (електромагнітний та

електромеханічний) протікають спільно, складаючи єдиний перехідний процес пуску ДПС НЗ.

Розрахунок струму якоря й кутової швидкості двигуна (за умов $\Phi = \text{Const}$) слід проводити на підставі рівняння рівноваги напруги якірного кола та рівняння руху

$$U_M = i_{\text{я}} R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + e_{\text{я}},$$

або

$$U_M = i_{\text{я}} R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + k\omega, \quad (k = C \cdot \Phi) \quad (5.12),$$

$$M = M_C + J \frac{d\omega}{dt} \quad (5.13),$$

Поділивши (5.13) на k (оскільки $k \neq 0$), маємо:

$$\begin{aligned} \frac{M}{k} &= \frac{M_C}{k} + \frac{J}{k} \frac{d\omega}{dt}, \\ i_{\text{я}} &= I_C + \frac{J}{k} \frac{d\omega}{dt}. \end{aligned} \quad (5.14).$$

Це призводить до одержання двох лінійних диференціальних рівнянь другого порядку (одне відносно струму $i_{\text{я}}$, друге відносно швидкості ω).

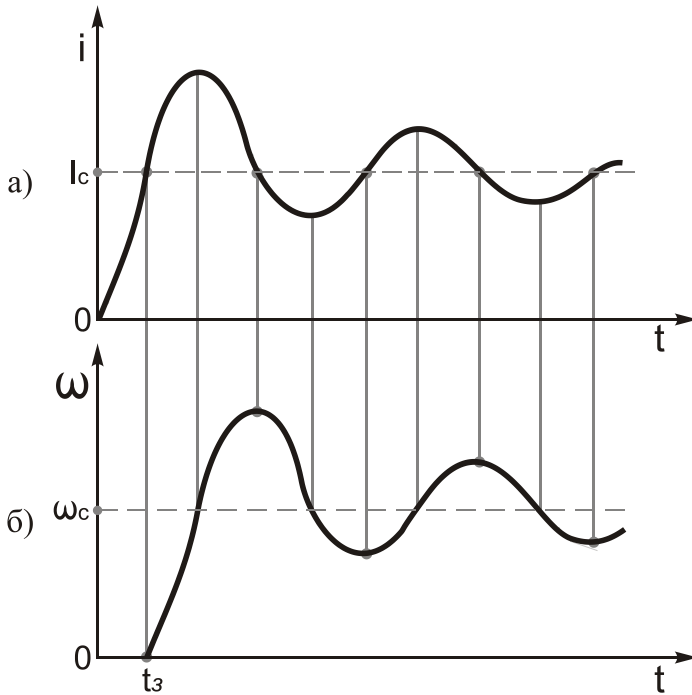
Інтегрування цих рівнянь і дає залежності

$$\begin{aligned} i_a &= f(t), \\ \omega &= f(t). \end{aligned}$$

Реальні співвідношення T_e та T_m такі, що при прямому пуску ($R_{\text{я}}$ – мале, оскільки $R_{\text{я}} = R_{\text{яв}} + R_{\text{яд}}$, а $R_{\text{я}} = 0$), I_{max} може перевищувати допустимі за умов якості комутації значення. Тому прямий запуск можливий для ДПС НЗ потужністю до (0,5÷1,0) кВт. При більшій потужності запуск треба здійснювати тільки через додатковий

резистор $R_{яд}$ у якірному колі. При цьому T_e зменшується, а T_m збільшується і виявляється, що

$$T_e \ll T_m.$$



а – крива струму якоря;

б – крива швидкості.

Рисунок 5.8 – Змінювання при пуску струму якоря і кутової швидкості при наявності додаткової індуктивності у колі якоря.

Пік пускового струму $I_{\max}$ можна зменшити введенням до кола якоря реактора, але при цьому процес розгону двигуна може набрати небажаний коливальний характер.

Наявність індуктивності у якірному колі у перехідних режимах порушує зв'язок між ω та M (цей зв'язок установлюється статичною механічною характеристикою). Отже індуктивність у якірному колі у

певній мірі спотворює статичні характеристики ДПС НЗ у перехідних режимах.

5.6 Перехідний режим динамічного гальмування ДПС НЗ

Якщо у працюючому двигуні лінійним контактором $KM1$ відімкнути обмотку якоря, а гальмівним контактором $KM2$ замкнути її на резистор динамічного гальмування $R_{\partial z}$, то двигун перейде у генераторний режим динамічного гальмування, якщо обмотка збудження LM залишиться на живленні постійним струмом.

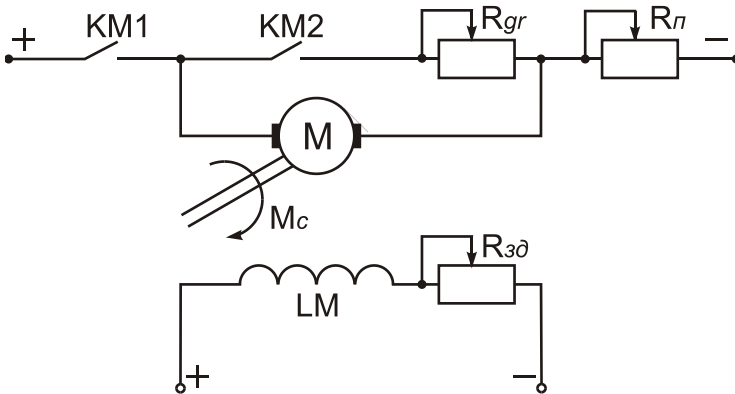


Рисунок 5.9 – Схема динамічного гальмування.

Точка A – робота у двигуновому режимі з навантаженням M_c (рисунок 5.10). При вимиканні $KM1$ й вмиканні $KM2$ двигун переходить в режим динамічного гальмування (генераторний режим) у точку B з початковим гальмівним моментом $M_{ноч}$. Якщо замість зупинки вантажу у точці 0 вантаж слід опускати, то після реверсу система прискориться до точки D , у якій вантаж буде опускатися з усталеною швидкістю $-\Delta\omega_c$ (гальмівне опускання вантажу).

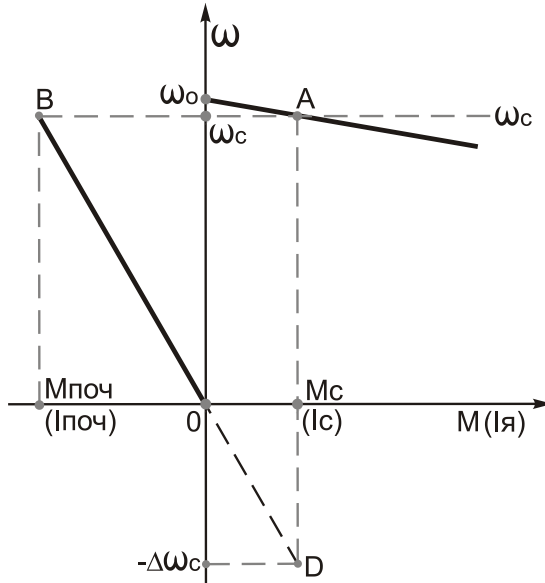


Рисунок 5.10 – Статичні характеристики динамічного гальмування.

Рівняння рівноваги напруги та рівняння руху для динамічного гальмування мають вигляд:

$$k\omega + {}^2_{\dot{y}}R = 0 \quad (5.15)$$

$$k \cdot {}^2_{\dot{y}} = J \frac{d\omega}{dt} + M_C, \quad (5.16)$$

де $E_{\dot{y}} = C \cdot \Phi \cdot \omega = k\omega$ - ЕРС якоря;

$U_M = 0$ (права частина рівняння 5.15), двигун відімкнений від мережі;

$R = R_{\dot{y}} + R_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}}$ - опір якірного кола;

$M = C \cdot \Phi \cdot I_{\dot{y}} = kI_{\dot{y}}$ - момент двигуна;

$J \frac{d\omega}{dt}$ - динамічний момент.

Спільне розв'язання рівнянь (5.15) та (5.16) відносно ω дає:

$$\omega = -\Delta\omega_c + B \cdot e^{-t/T_M}, \quad (5.17),$$

де B – стала інтегрування, яка визначається з початкових умов ($t = 0$).

1-а умова: $\omega = \omega_{noch} = \omega_c$ за верхнім рівнем AB (рисунок 5.10), тобто $\omega_{noch} = \omega_c$ - початкова швидкість у момент перемикання з двигунного режиму на режим динамічного гальмування.

2-а умова: $B = \omega_{noch} + \Delta\omega_c$ за нижнім рівнем D , тобто $\Delta\omega_c = \frac{M_c R}{k^2}$ - абсолютне значення перепаду швидкості, що визначається з характеристики динамічного гальмування при моменті опору M_c (точка D).

Після підстановки значення сталої B у рівняння (5.17) одержимо:

$$\omega = -\Delta\omega_c + (\omega_{noch} + \Delta\omega_c) \cdot e^{-t/T_M} \quad (5.18)$$

При динамічному гальмуванні без навантаження ($M_c = 0$) буде

$$\Delta\omega_c = 0$$

$$\omega_{noch} = \omega_0$$

а рівняння (5.18) переписеться

$$\omega = \omega_0 \cdot e^{-t/T_M}. \quad (5.19),$$

Динамічні характеристики $\omega = f(t)$, побудовані за рівнянням (5.18) (під навантаженням) й за рівнянням (5.19) (без навантаження) подані на рисунку 5.11.

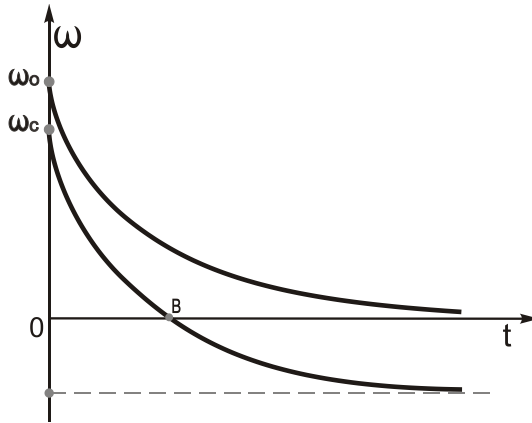


Рисунок 5.11 – Динамічні характеристики.

При гальмуванні під навантаженням крива наближається до кутової швидкості $-\Delta\omega_c$, а якщо момент статичного опору реактивний, то гальмування електропривода завершиться при кутовій швидкості $\omega = 0$ (точка B).

При гальмуванні без навантаження (характеристика 2) крива асимптотично наближається до нуля ($\omega = 0$), а початкова швидкість у цьому випадку буде

$$\omega_{\text{поч}} = \omega_0.$$

5.7 Перехідні режими в ЕП з трифазними асинхронними двигунами

Пуск АД з короткозамкненим ротором малої та середньої потужностей здійснюють при повній напрузі живлення (прямий пуск).

Пуск АД з фазним ротором здійснюється за допомогою пускового резистора, увімкненого у коло ротора.

Момент двигуна визначається за спрощеною формулою Клосса (для $R_{2\phi}$, що відповідає $M_{\text{пуск}} = M_{\text{max}}$)

$$M = M_c + M_{\text{дин}}, \quad (5.20),$$

де $M_c = 0$;

$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}; \quad (5.21)$$

$$M = \frac{2M_{\text{ниск}}}{s_{\text{кр}}/s + s/s_{\text{кр}}}$$

тоді (5.20) запишеться

$$\frac{2M_{\text{ниск}}}{\frac{s_{\text{кр}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{кр}}}} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (5.22)$$

Похідна від (5.2) буде

$$\frac{d\omega}{dt} = -\omega_0 \frac{ds}{dt} \quad (5.23)$$

Значення похідної (5.23) підставимо у (5.22), і отримаємо:

$$\frac{2M_{\text{ниск}}}{\frac{s_{\text{кр}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{кр}}}} = -J\omega_0 \frac{ds}{dt}. \quad (5.24)$$

У рівнянні (5.24) роз'єднаємо змінні, одержимо

$$dt = -\frac{J\omega_0}{2M_{\text{ниск}}} \cdot \left(\frac{s_{\text{кр}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{кр}}} \right) ds, \quad (5.25)$$

оскільки $T_M = \frac{J\omega_0}{M_{\text{ниск}}}$ - електромеханічна стала часу, то:

$$dt = -\frac{T_M}{2} \left(\frac{s_{\text{кр}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{кр}}} \right) ds \quad (5.26)$$

Інтегруючи рівняння (5.26) одержимо час пуску АД без навантаження:

$$t_{\text{но}} = \frac{T_M}{2} \int_{s_{\text{кн}}}^{s_{\text{поч}}} \left(\frac{s_{\text{кр}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{кр}}} \right) ds.$$

При пуску з нерухомого стану час пуску визначається як

$$t_{no} = \frac{T_M}{2} \left(\frac{1-s^2}{2s_{кр}} + s_{кр} \cdot \ln \frac{1}{s} \right).$$

З другого боку, ротор АД досягне швидкості ω_0 при нескінченно довгому часі пуску.

Запуск можна вважати завершеним, коли поточне значення ковзання буде відрізнятися не більш, ніж на 0,05 свого усталеного значення, тоді час пуску без навантаження буде

$$t_{no} = \frac{T_M}{2} \left(\frac{1-0,05^2}{2s_{кр}} + s_{кр} \ln \frac{1}{0,05} \right). \quad (5.28)$$

У чисельнику першого дробу в дужках числом $0,05^2$ можна знехтувати порівняно з 1, тоді (5.28) буде мати вигляд

$$t_{no} = \frac{T_M}{2} \left(\frac{1}{2s_{кр}} + 3s_{кр} \right).$$

Останній вираз розділимо на T_M , тобто час переведемо у відносні одиниці, тоді

$$\frac{t_{no}}{T_M} = \frac{1}{4 \cdot s_{кр}} + 1,5 \cdot s_{кр}. \quad (5.29)$$

Із (5.29) видно, що відносний час пуску залежить від величини критичного ковзання $s_{кр}$. Користуючись (5.29), можна установити, що

$\frac{t_{no}}{T_M}$ буде найменшим, якщо $s_{кр} = 0,407$.

Таким чином

$$\frac{t_{no}}{T_M} = 1,22 \text{ при } s_{кр} = 0,407.$$

6 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

На рисунку 6.1 показані основні варіанти ЕП, що одержують живлення від джерел змінного та постійного струмів.

Тут: КВ - керований випрямляч, ПЧ – перетворювач частоти, ІП – імпульсний перетворювач.

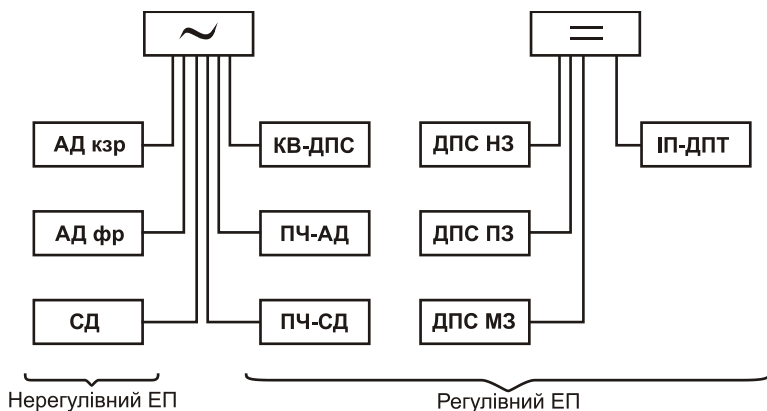


Рисунок 6.1 – До ілюстрації процедури вибору електроприводів.

Перебирання варіантів слід починати з найпростішого. Якщо це нерегулівний ЕП, то з АД кзр, якщо кидки струму, то АД фр, якщо тривало робота без вимикання – СД.

Якщо привод регулівний, то слід починати з основних показників регулювання швидкості.

Потужність двигуна повинна вибиратися у суворій відповідності до режиму роботи та очікуваного навантаження.

Установлення ЕД надмірної потужності недоцільне із-за невіправного зростання габаритів ЕД, маси його та початкової вартості.

При експлуатації, завжди можуть виникнути короточасні сплески навантаження. Вони помітно не підвищують нагрівання ЕД, однак у випадку, якщо буде перевершена певна межа, нормальний режим буде порушений.

Таким чином при виборі ЕД у першу чергу слід виходити із наступних двох факторів:

- величина миттєвого перевантаження;
- нагрівання.

Вибір ЕД за перевантаженням полягає у визначенні необхідного номінального моменту із величини перевантажувальної здатності двигуна

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$$

λ - перевантажувальна здатність ЕД за моментом.

Використовують також перевантажувальну здатність за струмом

$$\lambda_I = \frac{I_{\max}}{I_{\text{ном}}}.$$

Перевантажувальна здатність ДПС суттєво залежить від комутації. Відомо, що іскріння на колекторі є результат відсутності балансу:

$$e_{\kappa} = e_p + e'_{\kappa} \pm e_m,$$

де e_{κ} - е.р.с. секції, що комутується;

e_p - реактив е.р.с.;

e'_{κ} - е.р.с комутації, що створюється потоком додаткових полюсів;

e_m - трансформаторна е.р.с яка індукується магнітним потоком головних полюсів, що міняється.

Величина λ ДПС тривалого режиму роботи не повинна бути меншою 2,5

$$\lambda \geq 2,5.$$

Перевантажувальна здатність АД обмежується величиною моменту при критичному ковзанні $M_{\max}$

$$\lambda = 1,6 - 2,3.$$

З другого боку, момент АД залежить від U_m^2 , а стандартом допускається зниження мережної напруги до 90%, тому λ для АД слід вважати 0,7 – 0,8 від λ заданої при номінальній напрузі.

Перевантажувальна здатність СД найвища і складає $\lambda=3 - 3,5$.

Номінальна потужність ЕД обмежується їх нагріванням, тобто, нагрівостійкістю ізоляційних матеріалів, що застосовуються. Іншими словами, класом ізоляції.

Крім основних факторів перевантаження та нагрівання, слід звернути увагу ще й на такі фактори.

Способи вентиляції й захисту від дії навколишнього середовища.

За способом вентиляції двигуна розрізняють двигуни з природною вентиляцією, з самовентилляцією та незалежною (примусовою) вентиляціями.

За захистом від дії на двигун навколишнього середовища двигуни розрізняють на:

- відкритого виконання;
- захищеного виконання;
- закрите виконання;
- герметичне виконання.

Захищене виконання у свою чергу поділяється на:

- краплезахищене;
- брызкозахищене.

Конструктивне виконання у відповідності до умов його компоновки з виробничим механізмом:

- один чи два вихідних кінця вала;
- форма вихідного кінця вала (циліндрична, конічна);
- спосіб з'єднання вала (шпонка, шліц й таке інше);
- спосіб монтажу (двигун на лапах, фланцевий тощо).

При виборі електродвигуна слід мати на увазі не тільки усталені режими його роботи, але й перехідні, тобто пуск, реверс, регулювання швидкості й гальмування. З цією метою будуються так звані навантажувальні діаграми

$$\{M, P, I\} = f(t).$$

Отже у кожному конкретному випадку, двигун, вибраний у відповідності до заданої навантажувальної діаграми, повинен бути повністю завантажений і при цьому працювати не перегріваючись поверх допустимих меж.

6.1 Нагрівання й охолодження двигунів. Класифікація режимів роботи ЕД у відповідності до характеру змінювання навантаження

У переважній більшості випадків потужність ЕД вибирається за нагріванням, а потім йде перевірка за перевантажувальною здатністю.

При цьому тепловий режим ЕД не обов'язково повинен відповідати усталеній температурі нагрівання, яка не перевищує допустиму для даного класу ізоляції. Навпаки у багатьох випадках усталена температура вища допустимої для класу ізоляції двигуна, але робота двигуна завершується раніш, ніж температура його досягла усталеного значення (дивись рисунок 6.2).

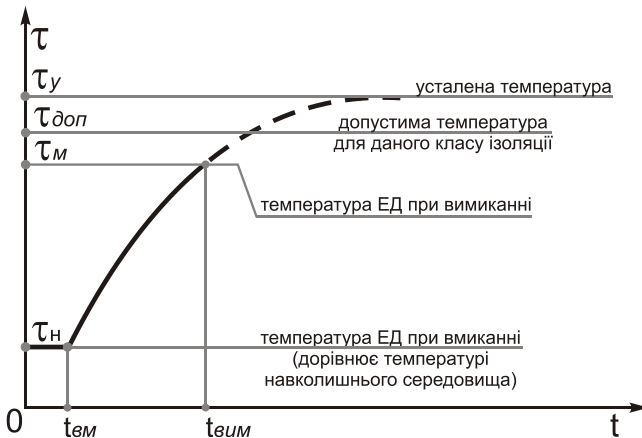


Рисунок 6.2 – До пояснення теплового режиму ЕД.

У будь-якому випадку вибір або перевірка ЕД за умовами нагрівання полягає у порівнюванні певним чином параметрів режиму роботи, для якого двигун проектується й виготовляється (цей режим

називається номінальним) з параметрами режиму, в якому ЕД буде працювати у конкретній системі ЕП.

Дані, що мають у паспорті ЕД відносяться до певного номінальному режиму й зветься номінальним даним двигуна.

Для ЕД, що виготовляються, передбачені вісім номінальних режимів, які у відповідності до міжнародної класифікації мають умовні позначення S1-S8.

6.1.1 Тривалий (довготривалий) номінальний режим (S1)

Це режим роботи електричної машини при незмінному навантаженні настільки тривалий, що перевищення температури усіх частин електричної машини досягає усталеного значення.

На рисунку прийняті такі позначення: P - потужність на валу, ΔP - потужність втрат, τ - температура, τ_y - усталення температура, τ_n - температура навколишнього середовища, t_{em} - час вмикання двигуна.

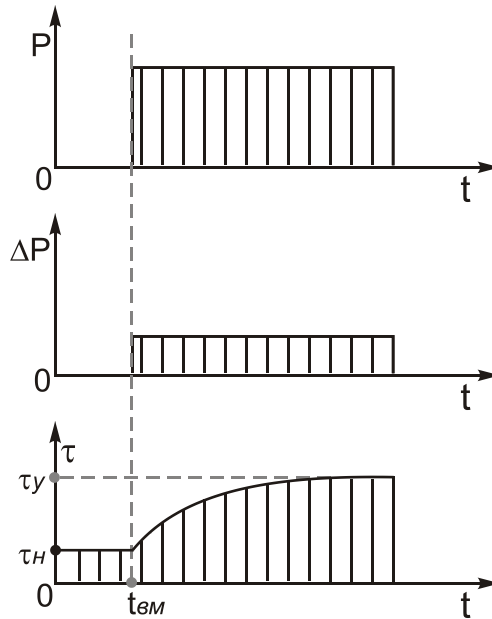


Рисунок 6.3 – Графіки тривалого режиму роботи.

Дотримання установлених норм нагрівання забезпечує нормативний термін служби ЕД (≈ 20 років) й навпаки. Незалежно від технологічного процесу ЕД завжди нагрітий до температури навколишнього середовища τ_n . При розрахунках, враховується максимальне значення її для відповідної кліматичної зони. Для України ця кліматична зона є зоною з помірно холодним кліматом, для якої

$$\tau_n = +35^\circ \text{C}.$$

6.1.2 Короткочасний номінальний режим (S2)

Це режим роботи електричної машини при якому за робочий період при незмінному навантаженні машина не встигає нагрітися до усталеної температури τ_y нагрівання, а пауза настільки тривала, що за цю паузу машина встигне охолонути до температури навколишнього середовища τ_n .

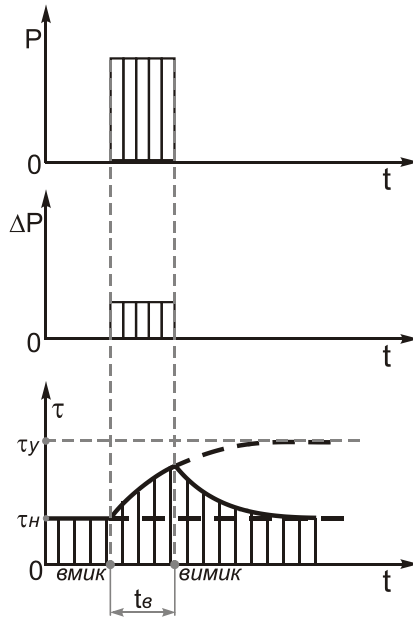


Рисунок 6.4 – Графіки короткочасного режиму роботи.

Для цього режиму роботи рекомендуються такі тривалості робочого періоду t_ϵ (тривалості вмикання)

$$t_\epsilon = 15; 30; 60; 90 \text{ (хвилини)}.$$

6.1.3 Повторно-короткочасний номінальний режим (S3)

Тут короткочасні робочі періоди чергуються з паузами, причому ні на одному з робочих періодів t_ϵ температура нагрівання ЕД не досягає усталеної температури нагрівання τ_y , а при будь-якій паузі t_0 двигун не встигає охолонути до температури навколишнього середовища τ_n .

Повторно-короткочасний номінальний режим роботи характеризується відносною тривалістю вмикання

$$TB = \frac{t_{\epsilon}}{t_{\epsilon} + t_0} \cdot 100\% = \frac{t_{\epsilon}}{t_y} \cdot 100\%,$$

де TB - тривалість вмикання;

$t_y = t_{\epsilon} + t_0$ - час циклу;

t_{ϵ} - час увімкненого стану (роботи);

t_0 - час паузи.

Значення TB нормується

$TB = 15; 25; 40; 60$ (%), або

$$E = \frac{t_{\epsilon}}{t_y} = 0,15; 0,25; 0,40 \text{ і } 0,60.$$

Для режиму S3 номінальні дані відповідають тільки певному значенню TB й відносяться до робочого періоду. При цьому вводиться обмеження на допустиму тривалість циклу

$$t_y \leq 10 \text{ хвилин}.$$

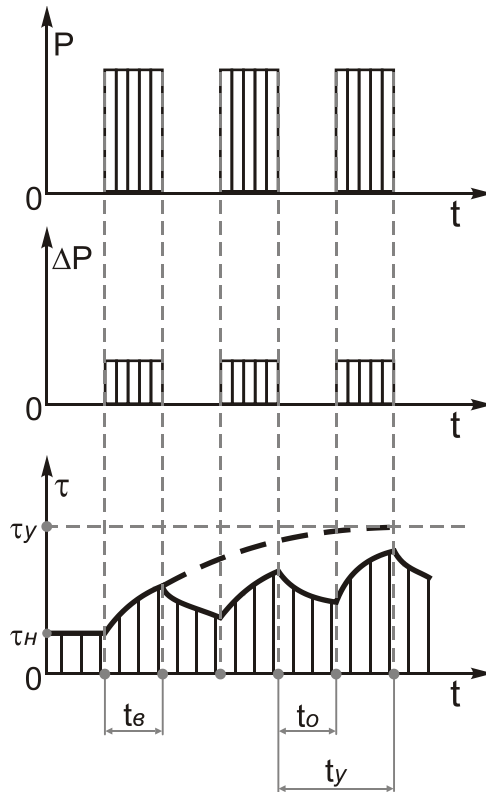


Рисунок 6.5 – Графіки повторно-кратковчасного режиму роботи.

Режими S1-S3 є зараз основним. Номінальні дані на ЕМ для цих режимів вносяться у паспорт електричної машини.

6.1.4 Номінальні режими S4 - S8

Крім вищеназваних трьох основних номінальних режимів класифікацією передбачені ще п'ять додаткових номінальних режимів S4 - S8. Їх коротка характеристика така:

- повторно-кратковчасний номінальний режим роботи електричної машини з частими пусками S4;
- повторно-кратковчасний номінальний режим з частими пусками й електричним гальмуванням S5;

- повторно-короткочасний номінальний режим S6, він аналогічний режиму S3, але відрізняється від нього тим, що після робочого періоду двигун не відмикається, а працює без навантаження при неробочому ході;
- перемежований номінальний режим роботи електричної машини з частими реверсами S7;
- перемежований номінальний режим роботи машини з двома, або більше швидкостями S8.

6.1.5 Навантажувальні діаграми електроприводів

Навантажувальна діаграма ЕП характеризує залежність у часі обертального моменту, струму, що розвиває двигун.

Навантажувальні діаграми використовуються для оцінювання перевантажувальної здатності ЕП, а також для перевірки попереднього вибраного двигуна за нагріванням.

Навантажувальна діаграма ураховує статичні й динамічні навантаження, які долає ЕП протягом циклу роботи механізму.

Статичні навантаження визначаються на підставі технологічних даних, а динамічні навантаження оцінюються інерційними моментами, які розвиваються ЕП для забезпечення відповідних кутових прискорень.

Розглянемо навантажувальну діаграму на прикладі електропривода шахтного підіймача зі зрівноваженим канатом.

Побудова навантажувальної діаграми (рисунки 6.6) полягає в наступному.

У відповідності до технологічного процесу та параметрів механічного обладнання, а також відповідно з продуктивністю підіймача задається наближена діаграма швидкості (тахограма) одного циклу роботи підіймача й наближена діаграма прискорення

$$V = f(t),$$

$$V - \text{лінійна швидкість кліті, } \frac{m}{c};$$

$$\varepsilon = f(t),$$

$$\varepsilon - \text{кутове прискорення, } \frac{1}{c^{-2}}.$$

Тахограма передбачає час кутового прискорення t_1 , тривалість усталеного режиму t_2 з усталеною швидкістю V_y , час кутового сповільнення t_3 й час паузи між сусідніми підніманнями t_4 усі t [с].

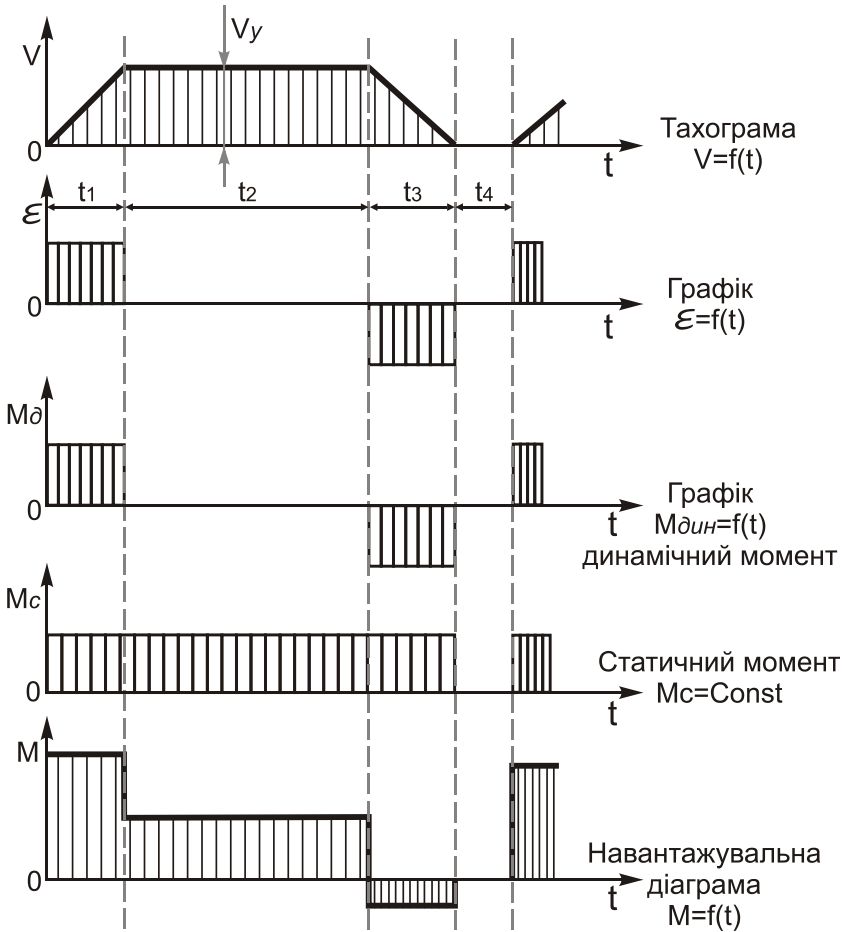


Рисунок 6.6 - Побудова навантажувальної діаграми.

На ділянках пуску й гальмування складові динамічного моменту дорівнюють

$$M_{\text{дин}} = I_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt} \left[\kappa_2 \cdot M^2 \cdot c^{-2} = \frac{\kappa_2 \cdot M}{c^2} \cdot M = H \cdot M \right],$$

де $J_{\Sigma} [\kappa_2 \cdot M^2]$ - зведений до вала момент інерції рухомої частини ЕП.

Далі визначається статичний момент навантаження зведений до вала двигуна

$$M_c = F_c R \cdot \frac{1}{\eta} [H \cdot M],$$

де F_c - статичне зусилля на колі шківів, H ;

R - радіус шківів тертя, M ;

η - к.к.д. передач.

Зусилля тяжіння клітей та канату не враховується, бо вони зрівноважені.

Тоді орієнтовно потужність двигуна буде розрахована

$$P = \frac{\kappa_3 \cdot F_c \cdot V_y}{\eta} \cdot 10^{-3} [кВт],$$

де $\kappa_3 = 1, 2, 3$ – коефіцієнт запасу, що враховує вплив динамічних моментів;

$V_y [M/c]$ - усталена швидкість підіймача за значенням якої у відповідності до рівняння

$$V_y = \omega \cdot R$$

визначається кутова швидкість двигуна (оскільки підіймач відноситься до 1-го класу виконавчих механізмів, для яких $M_c = Const$).

Нарешті останній графік

$$M = f(t)$$

є навантажувальною діаграмою ЕП, яка одержана складанням статичного з динамічним моментів у відповідності до рівняння руху

$$M = M_c + M_o.$$

Таким чином, навантажувальна діаграма

$$M(t) = M_c + M_o(t).$$

6.1.6 Розрахунок потужності електродвигуна при тривалому режимі роботи (S1) й незмінному навантаженні

Розрахунок потужності вельми простий у цьому випадку, якщо відома потужність споживана механізмом, якщо у каталозі немає двигуна на розраховану потужність, то слід вибрати найближчий більшої потужності.

Оскільки при тривалому режимі двигун запускається рідко, то нагріванням від пускових втрат можна знехтувати.

Наприклад, потужність двигуна для насоса визначається за формулою

$$P = \frac{Q_n \cdot H \cdot \gamma}{\eta_n \cdot \eta_n} \cdot 10^{-3} \text{ [кВт]},$$

де Q_n - продуктивність насоса, $[м^3/с]$;

H - розрахункова висота піднімання води, $[м]$;

γ - густина води, $[Н/м^3]$;

η_n - к.к.д. насоса (якщо відцентрований насос, то $\eta_n = 0,5 \div 0,8$ високого тиску, $\eta_n = 0,3 - 0,6$ низького тиску);

η_n - к.к.д. передачі від двигуна до насоса.

Розрахункова висота піднімання води:

$$H = H_1 + H_2 + H_3 + H_4,$$

де H_1 - висота всмоктування, $[м]$;

H_2 - висота нагнітання, $[м]$;

H_3 - втрати напору в усмоктувальному водоводах, вентилях, засувках колінах й таке інше, $[м]$;

H_4 - вільний напір (забезпечуючий певну швидкість витікання рідини із труби).

Перевірка фізичних одиниць:

$$[кВт] = \left[\frac{м^3}{с} \cdot м \cdot \frac{Н}{м^3} \cdot 10^{-3} \right] = \left[\frac{Н \cdot м}{с} \cdot 10^{-3} \right] = [кВт].$$

6.1.7 Розрахунок потужності двигуна при тривалому режимі роботи S1 й змінному циклічному навантаженні

При тривалому змінному навантаженні, розрахунок попередньо вибраного двигуна тривалого режиму роботи слід виконувати за нагріванням шляхом визначення найбільшої реальної температури нагрівання за цикл τ_{yp} , а потім для заданого класу ізоляції ЕД порівняти її з допустимим перевищенням τ_{θ} .

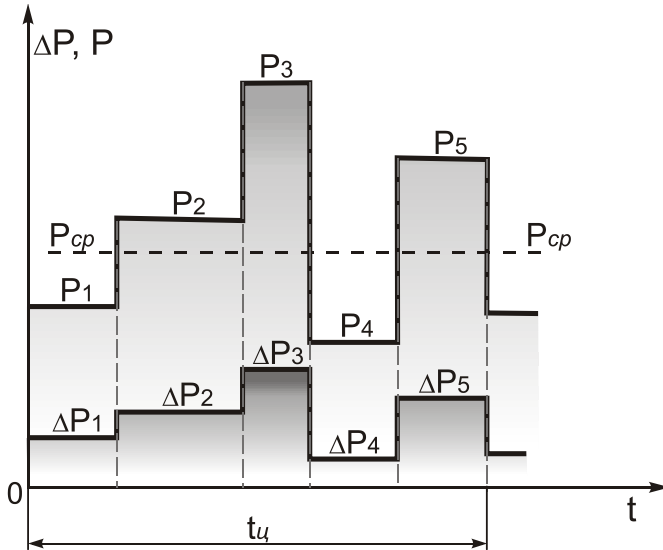


Рисунок 6.7 – Графік тривалого змінного циклічного навантаження.

При цьому новина бути виконаною умова

$$\tau'_{yp} \leq \tau_{\partial}$$

де τ'_{yp} - установлена реальна найбільша температура нагрівання двигуна за цикл.

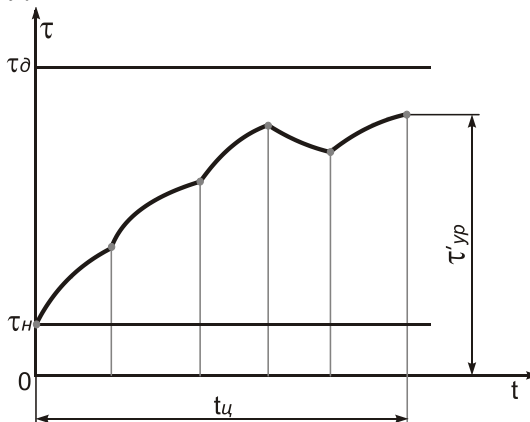


Рисунок 6.8 – Графік нагрівання двигуна за циклом навантаження.

У реальних умовах вибір двигуна за найбільшим (P_3) або найменшим (P_4), рисунок 6.7, навантаженнями неприйнятливий, бо у першому випадку потужність двигуна була б завищеною, а у другому – заниженою.

На практиці розрахунок потужності двигуна при тривалому режимі роботи й змінному циклічному навантаженні здійснюють менш точними, ніж побудова кривих нагрівання, методами, але більш простими. Їх у основному два, це:

- метод середніх втрат;
- метод еквівалентного струму.

Метод середніх втрат

Суть методу полягає у тому, що перевищення температури двигуна при незмінній теплопередачі визначається середніми втратами за цикл

$$\Delta P_{cp} = \sum_{i=1}^m \Delta P_i \cdot t_i \cdot \frac{1}{t_\delta}, \quad (6.1)$$

де ΔP_1 - потужність втрат на i -му – інтервалі;

t_i - тривалість i -го – інтервалу;

m - число інтервалів у циклі (для графіка навантаження даного на рисунках 6.7 і 6.8 число інтервалів у циклі $m = 5$);

t_δ - час циклу.

Для цього графіка середні втрати за цикл у відповідності до (6.1) будуть

$$\Delta P_{cp} = \sum_{i=1}^5 \Delta P_i \cdot \frac{t_i}{t_\delta} = \frac{\Delta P_1 \cdot t_1 + \Delta P_2 \cdot t_2 + \Delta P_3 \cdot t_3 + \Delta P_4 \cdot t_4 + \Delta P_5 \cdot t_5}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}. \quad (6.2)$$

Знайдені середні втрати за цикл (6.2) ΔP_{cp} зіставляються з номінальними $\Delta P_{ном}$.

Якщо $\Delta P_{cp} \leq \Delta P_{ном}$, то перевищення температури τ_{cp} буде не більше допустимого значення τ_δ , тобто $\tau_{cp} \leq \tau_\delta = \tau_{ном}$.

Метод еквівалентного струму

При умовах коли відомий графік споживання струму за цикл, потужність двигуна для цього можна вибрати використавши метод еквівалентного струму.

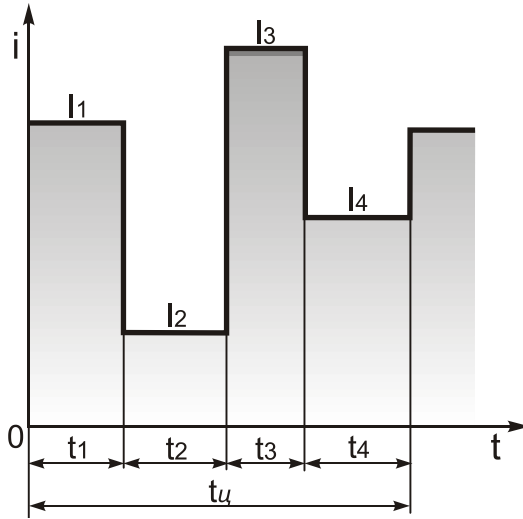


Рисунок 6.9 – Графік споживання двигуном струму за цикл навантаження.

Цей метод заснований на замінюванні реального струму двигуна, що змінюється при змінюванні навантаження на так званий еквівалентний струм (фіктивний) струм певної величини, який у двигуні викликав би ті ж самі втрати, що й реальний струм $i = f(t)$.

Середня потужність втрат (6.1), наприклад, для ДПС, які виділяються у цьому двигуні при завантаженні його еквівалентним струмом I_E буде дорівнювати:

$$\Delta P_{cp} = \Delta P_0 + I_E^2 \cdot R, \quad (6.3)$$

де ΔP_0 - потужність постійних незалежних від навантаження втрат, це в основному втрати у сталі;

$I_E^2 \cdot R$ - потужність змінних втрат, які залежать від навантаження, це в основному втрати у міді.

Середня потужність втрат за цикл (6.1) для графіка навантаження, рисунок 6.8, буде така:

$$\Delta P_{cp} = \frac{\Delta P_1 \cdot t_1 + \Delta P_2 \cdot t_2 + \Delta P_3 \cdot t_3 + \Delta P_4 \cdot t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}. \quad (6.4)$$

Порівнюючи (6.4) та (6.3), тобто замінюючи тут втрати потужності на кожному інтервалі через відповідну їй постійну та змінну складові втрат і ввівши позначення

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{cp} &= \Delta P_0 + I_E^2 \cdot R \\ \Delta P_1 &= \Delta P_0 + I_1^2 \cdot R \\ \Delta P_2 &= \Delta P_0 + I_2^2 \cdot R \\ \Delta P_3 &= \Delta P_0 + I_3^2 \cdot R \\ \Delta P_4 &= \Delta P_0 + I_4^2 \cdot R \end{aligned} \right\} \quad (6.5)$$

одержимо (підставивши (6.5) у (6.4)):

$$\begin{aligned} &\Delta P_0 + I_E^2 \cdot R = \\ &= \frac{(\Delta P_0 + I_1^2 \cdot R) \cdot t_1 + (\Delta P_0 + I_2^2 \cdot R) \cdot t_2 + (\Delta P_0 + I_3^2 \cdot R) \cdot t_3 + (\Delta P_0 + I_4^2 \cdot R) \cdot t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}. \end{aligned} \quad (6.6)$$

У (6.6) виконаємо такі перетворення

$$(\Delta P_0 + I_E^2 \cdot R) \cdot (t_1 + t_2 + t_3 + t_4) = \Delta P_0 \cdot t_1 + I_1^2 \cdot R \cdot t_1 + \Delta P_0 \cdot t_2 + I_2^2 \cdot R \cdot t_2 +$$

$$+ \Delta P_0 \cdot t_3 + I_3^2 \cdot R \cdot t_3 + \Delta P_0 \cdot t_4 + I_4^2 \cdot R \cdot t_4;$$

$$\Delta P_0 \cdot (t_1 + t_2 + t_3 + t_4) + I_E^2 \cdot R \cdot (t_1 + t_2 + t_3 + t_4) =$$

$$= \Delta P_0 \cdot (t_1 + t_2 + t_3 + t_4) + R(I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + I_3^2 \cdot t_3 + I_4^2 \cdot t_4);$$

$$I_E = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + I_3^2 \cdot t_3 + I_4^2 \cdot t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}}. \quad (6.7)$$

В узагальненому вигляді формулу (6.7) можна записати

$$I_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m I_i^2 \cdot t_i}{t_\delta}}, \quad (6.8)$$

де позначення m, i, t_δ такі ж як і у (6.1).

Таким чином, якщо відома крива змінювання струму навантаження при заданому графіку роботи виконавчого механізму, то можна вибрати попередньо потужність двигуна способом середніх втрат, а потім визначити величину I_E за формулою (6.8) й порівняти з $I_{ном}$ вибраного двигуна.

Якщо $I_E \leq I_{ном}$, то двигун придатний для механізму з заданим графіком навантаження.

6.1.8 Визначення допустимої частоти вмикань АД з короткозамкненим ротором

При значній частоті вмикань АД суттєвими стають втрати у перехідних режимах, які викликають інтенсивне нагрівання АД.

У зв'язку з цим виникає задача визначення мінімально допустимої тривалості робочого циклу $t_{\delta.дн}$, при якій перевищення температури не досягає допустимого рівня, або допустимої частоти робочих циклів, які характеризуються допустимим числом вмикань у годину h_δ .

Розглянемо АД з короткозамкненим ротором.

Допустимо, що робочий період t_e складається із періоду пуску t_n , часу роботи в усталеному режимі t_δ при незмінному навантаженні й часу на гальмування t_z . А тривалість робочого циклу t_y складається з тривалості робочого періоду t_e й паузи t_0 , за час якої АД

відімкнений від мережі (відповідна тахограма показана на рисунку 6.10).

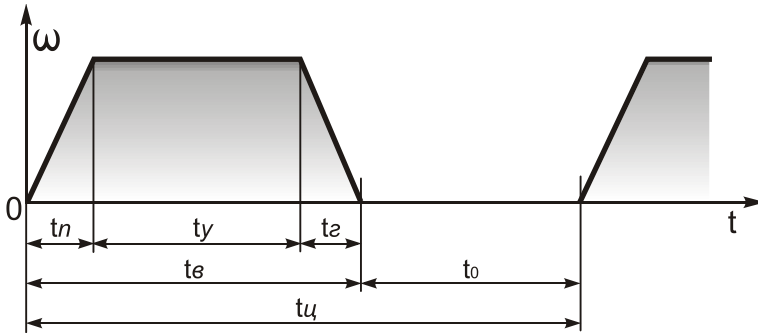


Рисунок 6.10 – До пояснення частоти вмикання.

Втрати енергії, що виділяється за цикл складається із витрат енергії за час пуску ΔA_n , гальмування ΔA_z й роботи в усталеному режимі з незмінним навантаженням $\Delta A_y = \Delta P \cdot t_y$.

Втрати енергії, які виділені в навколишнє середовище за час роботи з усталеною швидкістю дорівнюють

$$\Delta P_{ном} \cdot t_y,$$

за час паузи

$$\beta_0 \cdot \Delta P_{ном} \cdot t_0,$$

а за час пуску й гальмування

$$\Delta P_{ном} \cdot (t_n + t_z) \cdot \beta_{cp},$$

де β_0 - коефіцієнт погіршення тепловіддачі при вимкненому двигуні;

β_{cp} - коефіцієнт погіршення тепловіддачі за час пуску й гальмування (він вибирається середнім між початковим й кінцевим значеннями цього коефіцієнта).

Для більш віддаленого циклу роботи, кількість виділених втрат енергії дорівнює кількості втрат енергії, що віддані у навколишнє середовище

$$\Delta A_n + \Delta P_0 \cdot t_y + \Delta A_z = \Delta P_{ном} \cdot (t_n + t_z) \cdot \beta_{cp} + \Delta P_{ном} \cdot t_y + \Delta P_{ном} \cdot t_0 \cdot \beta_0. \quad (6.9)$$

Якщо час циклу t_{ϕ} , час усталеної роботи t_y та час паузи t_0 (усе в секундах) виразити через кількість вмикань у годину h_{ϕ} , то будемо мати

$$\left. \begin{aligned} t_y &= \frac{3600}{h_{\phi}} \\ t_y &= 3600 \cdot \frac{ПВ}{h_{\phi}} - (t_n + t_z) \\ t_0 &= 3600 \frac{1 - ПВ}{h_{\phi}} \end{aligned} \right\} \quad (6.10)$$

де період вмикання ПВ заданий не у %, а у відносних одиницях.

Підставивши у (6.9) значення t_y та t_0 із (6.10), одержимо, якщо вирішимо рівняння відносно h_{ϕ} :

$$h_{\phi} = \frac{3600 \cdot [(\Delta P_{ном} - \Delta P) \cdot ПВ + \Delta P_{ном} \cdot \beta_0 \cdot (1 - ПВ)]}{\Delta A_n + \Delta A_z - (t_n + t_z) \cdot [\Delta P + \Delta P_{ном} \cdot \beta_{cp} - \Delta P_{ном}]} \quad (6.11)$$

Для АД у знаменнику (6.11) третім членом порівняно з сумою двох перших можна знехтувати оскільки

$$(t_n + t_z) \cdot [\Delta P + \Delta P_{ном} \cdot \beta_{cp} - \Delta P_{ном}] = (2 - 3)\% \text{ від } (\Delta A_n + \Delta A_z).$$

Тоді (6.11) можна переписати:

$$h_{\phi} \cong 3600 \cdot \frac{(\Delta P_{ном} - \Delta P) \cdot ПВ + \Delta P_{ном} \cdot \beta_0 \cdot (1 - ПВ)}{\Delta A_n + \Delta A_z} \quad (6.12)$$

Якщо в усталеному режимі АД працює з номінальною потужністю, тоді

$$\Delta P = \Delta P_{ном},$$

а формула (6.12) ще більше спроститься:

$$h_{\phi} \approx 3600 \cdot \frac{\Delta P_{ном} \cdot \beta_0 \cdot (1 - ПВ)}{\Delta A_n + \Delta A_z} \quad (6.13)$$

Із (6.13) видно, що число вмикань за годину залежить від навантаження двигуна, від його ПВ, від коефіцієнту погіршення тепловіддачі β_0 та втрат енергії у перехідних процесах $(\Delta A_n + \Delta A_z)$.

Зі зменшенням ΔP , ΔA_n , ΔA_z допустима частість вмикань за годину АД зростає.

Збільшення допустимої частоти вмикань можна досягти незалежною вентиляцією АД, яка діє однаково інтенсивно протягом усього циклу.

Суттєве збільшення частоти вмикань можна досягти шляхом зменшення втрат енергії у передніх процесах, наприклад, використовуючи частотного керування АД порівняно з іншими видами його керування.

7 ОСНОВИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

7.1 Вступна частина

У найпростіших випадках керування виконуються за допомогою апаратури з ручним керуванням (, вимикачі, перемикачі, пускові резистори й таке інше).

Але це не найкращий спосіб керування, оскільки пов'язаний з додатковими витратами часу на керування, витрата енергії, стомлюваність й можливість припущення людиною помилок при керуванні, неможливість дистанційного керування, проблеми з автоматизацією.

Передавання функцій керування від людини до автомата існує у трьох сферах:

- людина може, але не повинна здійснювати функції керування;
- умови роботи небезпечні або шкідливі для здоров'я людини (підвищена радіація, отрутне середовище й таке інше);
- широкий клас об'єктів керування, де доцільність використання автоматичних пристроїв обумовлене тим, що тут вирішення задач керування не під силу людині.

Функції, пристроїв автоматичного керування:

- автоматичне здійснення звичайних операцій керування;
- автоматичне завдання або підтримання будь-якої координати ЕП (швидкості, моменту й таке інше);
- слідування за сигналами, що вводяться в систему;
- автоматичне керування окремими механізмами, або комплексом механізмів за заданою програмою;
- автоматичне керування окремими механізмам з автоматичним вибором найбільш раціональних режимів;
- комплексна автоматизація.

Основні елементами систем автоматичного керування:

- Силові й виконавчі мікродвигуни.
- Контактні й безконтактні апарати керування.
- Аналогові й дискретні здавачі та реле.

- Електричні мікромашини автоматики, які виконують функції давачів, перетворювачів, підсилювачів тощо.

- Коректувальні ланки (пропорціональні, інтегруючі й інші) що у прямих каналах та каналах зворотних зв'язків для надання системі бажаних динамічних властивостей.

Блочні елементи керування (цифрові, аналогові, аналого-цифрові); вони побудовані на інтегральних мікросхемах, використовуються для виконання самих різних функцій.

- Мікропроцесори та ЕОМ.

- Нестабілізовані й стабілізовані джерела живлення.

Автоматичне керування може здійснюватись за розімкненим та замкненим циклами.

У системах з замкненим циклом можна, незалежно від стану збурних дій, підтримувати заданий режим роботи ЕП.

7.2. Зображення й позначення елементів електричних схем. Загальні правила виконання схем

Схема – це конструкторський документ, на якому показані у вигляді умовних зображень або позначень складові виробу та зв'язки між цими складовими.

Правила виконання й оформлення схем регламентуються держстандартами (ЄСКД).

Відповідно неї, схеми електричні мають таку класифікацію.

7.2.1 Схема електрична структурна. Позначення документа Е1 (наприклад, у кутовому підпису документа)

На схемі зображають основні функціональні частини виробу, а також основні взаємозв'язки між ними.

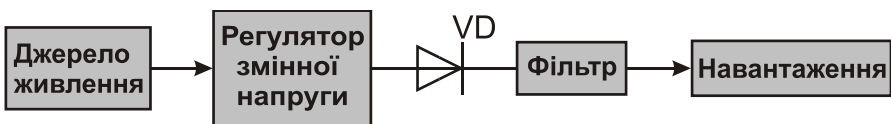


Рисунок 7.1 – Схема електрична структурна.

Функціональні частини на схемі можна зображати у вигляді прямокутників з відповідним підписом кожного функціонального елемента. Допускаються деякі елементи, при цьому подавати у вигляді умовних графічних позначень, а надписи функціональних частин (елементів) виконуються у середині прямокутників.

7.2.2 Функціональна електрична схема. Позначення документа Е2 (наприклад, у кутовому підпису документа)

Така схема призначена для роз'яснення процесів, що протікають в окремих функціональних колах виробу, або у виробі в цілому, тому на один виріб може бути одна, або декілька функціональних електричних схем.

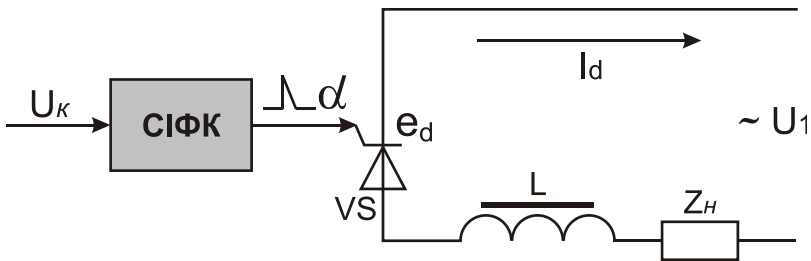


Рисунок 7.2 – Схема електрична функціональна (спрощена функціональна схема керованого тиристорного випрямляча)

U_y – вхідний сигнал (напруга керування);

СІФК – система імпульсно-фазового керування;

α – кут керування тиристора VS;

e_d – ЕРС випрямляча;

L – згладжувальний дросель;

I_d – випрямлений струм (струм навантаження);

Z_n – навантаження;

U_1 – напруга живлення випрямляча;

U_e - сигнал керування.

На схемі зображують функціональні частини виробу (елементи, пристрої, функціональні групи) та зв'язки між ними.

Функціональні частини та зв'язки між ними зображують у вигляді умовних графічних позначень. Окремі функціональні частини, що можна не розписувати поелементно, зображаються у вигляді прямокутників.

При цьому, функціональні частини з поелементною деталізацією зображують за правилами виконання електричних принципівих схем, а при укрупненому зображенні функціональних частин – за правилами електричних структурних схем.

Дійсне розташування у виробі елементів і пристроїв його може не врівнюватися.

Якщо до складу виробу входять електричні елементи й неелектричні елементи, то функціональні схеми можна складати двома способами.

1^й спосіб. Складаються декілька функціональних схем.

2^й спосіб. Складається одна комбінована функціональна схема.

На ній позначені електричні й неелектричні елементи та зв'язки.

7.2.3 Принципова електрична схема. Позначення документа ЕЗ (наприклад, на кутовому підпису документа)

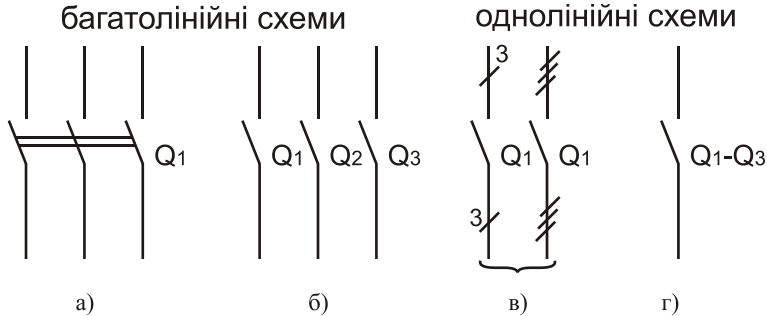
Схема електрична принципова є найбільш повною електричною схемою виробу. На такій схемі зображуються усі електричні елементи й пристрої, усі зв'язки між ними, а також елементи підмикання, якими закінчуються вхідні та вихідні кола.

Електричні елементи на схемі зображуються умовними графічними позначеннями, розміри та літерно-цифрові позначення яких регламентуються відповідними держстандартами.

Елементи, що у схемі використовуються частково, допускається зображати не повністю, а тільки ті частини, що використовуються у схемі.

Позначення пристрою або елемента вказується зверху або праворуч його зображення.

Схема електрична принципова повинна обов'язково мати текстовий документ, так званий перелік елементів. Цей документ має усі данні про елементи чи пристрої, які є у схемі. (Якщо є вільне поле на схемі, то допускається поряд з елементом на схемі розміщати данні про цей елемент).



а – трифазна багатолінійна з одним трифазним вимикачем Q1;
 б – трифазна багатолінійна з трьома однофазними вимикачами Q1, Q2, Q3;
 в – трифазна однолінійна з одним трифазним вимикачем Q1;
 г – трифазна однолінійна з трьома однофазними вимикачами Q1, Q2, Q3;
 Рисунок 7.3 – Схема електрична принципова.

Перелік елементів розміщують або на першому аркуші схеми над кутовим надписом, або у вигляді самостійного документа на аркуші формату А4 разом з основним кутовим надписом для текстових документів.

Зв'язок проміж умовними графічними позначеннями й переліком елементів здійснюється через позиційні позначення. Перелік елементів оформлюється у вигляді таблиці (рисунок 7.4), де позиційні позначення розташовані у першій графі (якщо поле схеми не розбите на зони, тоді перша графа "зона" відсутня).

Записують елементи групами у алфавітному порядку літерних позиційних позначень за зростанням порядкового номеру в межах групи (виду) елементів. Кілька нижніх рядків переліку елементів повинні бути вільними.

Позиційне позначення	Найменування	Кількість	Примітка
	Резистори		
R1	МЛТ – 0,5 – 300 кОм $\pm 10\%$	1	
R2, R3	ПЕВ – 10 – 3 кОм $\pm 5\%$	2	

Dimensions: 15, 8, 20, 110, 10, 185

Рисунок 7.4 – Перелік елементів.

Принциповими електричними схемами користуються для вивчення принципу роботи виробу, а також при його налагоджуванні, контролю й ремонті.

Вона також є основою для розробки інших документів.

7.2.4 Схема електрична з'єднань. Позначення документа Е4 (наприклад, на кутовому підпису документа)

Схема електрична з'єднань визначає конструктивне виконання електричних з'єднань елементів у виробі. На схемі зображуються усі пристрої і елементи, що входять до складу виробу, їх вхідні та вихідні елементи (з'єднувачі, плати, затискачі й таке інше) та з'єднання між ними.

Пристрої зображують прямокутником або спрощеним зовнішнім контуром, а елементи – у вигляді умовних графічних позначень, прямокутників або спрощеним зовнішнім контуром.

Усередині прямокутників або спрощених зовнішніх контурів можна розміщати умовні графічні або літерні позначення елементів. Розташування графічних позначень пристроїв та елементів на схемі повинно приблизно відповідати реальному розташуванню їх на виробі.

Провода, джгути, кабелі мають порядкові номери. Нумерують їх у межах виробу окремо для проводів і окремо для кабелів.

На схемі вказується марка й перетин проводів, кількість й перетин жил кабелів.

Характеристики вхідних й вихідних кіл на схемі рекомендується подавати у вигляді таблиць, що розміщені поруч з графічним позначенням роз'ємну або затискача.

Якщо у схемі не показані місця приєднання проводів та жил кабелю, а також у будь-якому випадку, коли таких приєднань багато, складають таблицю з'єднань.

Таблиці розміщують на першому аркуші схеми над основним кутовим надписом.

7.2.5 Схема електрична підмикання. Позначення документа Е5 (наприклад, на основному кутовому підпису документа)

Схема електрична підмикання показує зовнішні підмикання виробу. На схемі повинні бути зображені:

- вироб;
- вхідні й вихідні елементи виробу;
- кінці проводів або кабелів (що підводяться до вхідних і вихідних елементів), які відносяться до зовнішнього монтажу.

На схемі вироби та їх основні частини зображуються у вигляді прямокутників, а вхідні та вихідні елементи (з'єднувачі) – у вигляді умовних графічних позначень.

Вхідні й вихідні елементи усередині графічного позначення виробу розміщують у відповідності до їх дійсного розташування на виробі.

7.2.6 Схема електрична розташування. Позначення документа Е7 (наприклад, на основному кутовому підпису документа)

Схема електрична розташування визначає відносне розташування складових частин виробу, а при необхідності також джгутів, кабелів, проводів. При необхідності – у спрощеному вигляді конструкцію, приміщення або місцевість, де ці частини розташовані.

При великій кількості складових частин виробу можна складати на таку схему й перелік елементів.

Схема електрична розташування може виконуватись на розрізах конструкцій, на розрізах або планах приміщень, або в аксонометрії, у внутрішньому інтер'єрі службового приміщення.

7.2.7 Умовні літерно-цифрові позначення в електричних схемах

Елементи (пристрої, функціональні групи), які входять до складу виробу, на схемах повинні мати літерно-цифрові позначення. Такі позначення регламентуються держстандартом. У схемах електричні кола поділяються на дві категорії: кола головного струму; допоміжні кола.

До кіл головного струму відносяться силові кола двигунів й генераторів.

Допоміжні кола складаються в основному з кіл керування, а також кола захисту, індикації, сигналізації, вимірювання та інші.

Комутаційні пристрої на схемах повинні зображуватися у положенні, яке прийняте за початкове (положення, що вони займають у знеструмленому стані).

Таблиця 7.1 – Умовні літерні позначення елементів електричних схем.

Перша літера коду	Група елементів	Приклади видів елементів	Дво-літній код
А	Пристрої (загальне позначення)	Підсилювачі, лазери	-
В	Перетворювачі неелектричних величин	Сельсин – приймач Сельсин – давач Тепловий давач Давач тиску Давач частоти обертання (Тахогенератор) Давач швидкості Фотоелемент	BE BC BK BP - BR BV BL

Продовження таблиці 7.1.

Перша літера коду	Група елементів	Приклади видів елементів	Дво-терний код
C	Конденсатори		-
D	Схеми інтегральні	Аналогові Цифрові	DA DD
E	Освітлювальні пристрої	Освітлювальна лампа	EL
F	Запобіжники, захисні пристрої	Струмова відсічка Запобіжник тонкий	FA FU
H	Пристрої сигнальні та індикаційні	Звукової сигналізації Індикатор Світлової індикації	HA HG HL
K	Контактори Пускачі Реле	Контактор Магнітний пускач Реле струмове Реле вказівне Реле поляризоване Реле електротеплове Реле часу Реле напруги	KM KM KA KH KP KK KT KV
P	Прилади вимірювальне обладнання	Амперметр Частотометр Вольтметр Ватметр	PA PF PV PW
Q	Вимикачі Роз'єднувачі (силові)	Вимикач автоматичний Короткозамикач Роз'єднувач	QF QK QS
R	Резистори	Терморезистор Потенціометр Шунт вимірювальний	- RK RP

Продовження таблиці 7.1.

Перша літера коду	Група елементів	Приклади видів елементів	Дволітєрний код
S	Пристрої комутаційні (не силові)	Вимикач (перемикач) Вимикач кнопковий Вимикач автоматичний Вимикач, що спрацьовує - від рівня - від тиску - кінцевий (шляховий) - від частоти обертання - температури	SA SB SF SL SP SQ SR SK
T	Трансформатори Автотрансформатори	Силовий трансформатор Тр-р струму Тр-р напруги Електромагнітний стабілізатор	TH TA TV TS
V	Прилади напівпровідникові	Діод Стабілітрон Тиристор Транзистор	VD VD VS VT
X	З'єднання контактні	Струмознімач Контакт ковзання Штир Гніздо З'єднання розбірне	XA XA XP XS XT
Y	Пристрої механічні з електричним приводом	Електромагніт Гальмо електромагнітним приводом	YA YB

7.3 Розімкнені системи автоматичного керування

7.3.1 Принципи автоматичного керування в розімкнених релейно-контактних системах

Як відомо, у системах з розімкненим колом дій відсутні зворотні зв'язки.

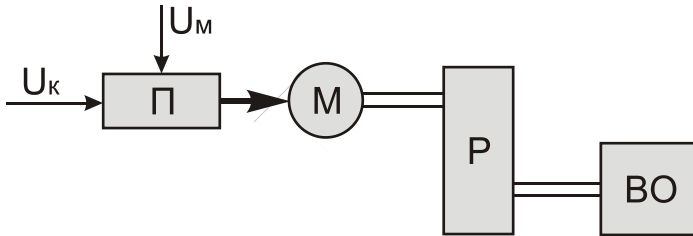


Рисунок 7.6 – Схема розімкненої системи керування.

На перетворювач, двигун та механізм діють збурення у вигляді змінювання напруги живлення U_m , змінювання моменту навантаження й таке інше. Ці збурення призводять до відхилень вихідної величини від заданої. При цьому не виключена можливість впливати на вихідну величину контролем різних координат ЕП, таких, як струм якоря (статора) двигуна, напруги й таке інше.

Найпростіше здійснити автоматизацію пуску асинхронного двигуна малої чи середньої потужності, оскільки керування пуском тут є керування прямим вмиканням АД у мережу. У інших випадках найбільш часто вживається резисторний пуск електродвигунів з поступовим зменшенням опору пускового резистора, з регулюванням при цьому пускового струму й швидкості розгону двигуна.

На рисунку 7.7 наведена пускова діаграма двигуна з трьома ступенями пускового резистора, побудована із умов змінювання струму в певних заданих межах від I_1 до I_2 .

Усталені значення відповідно швидкості й струму будуть

$$\omega_y = \omega_c,$$

$$I_y = I_c.$$

Якщо пуск здійснюють вручну, то оператор у момент $t = 0$ рукоятку пускового резистора установлює весь пусковий опір і стежачи за показанням амперметра у момент t_1 , коли струм знижується до I_2 , виводить перший ступінь пускового резистора, другий ступінь оператори виводить у момент t_2 , коли пусковий струм за показанням амперметра знизиться знову до значення I_2 й так далі.

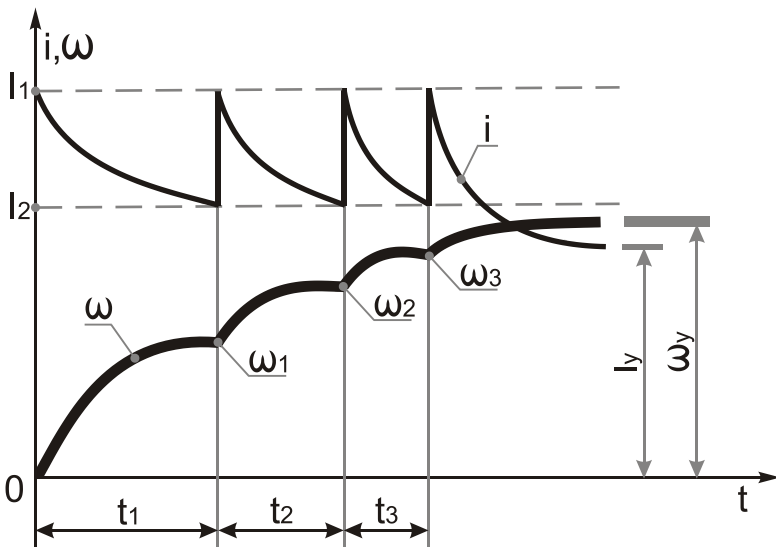


Рисунок 7.7 – Пускова діаграма.

Із розгляду пускової діаграми видно, що критеріїв, за якими можна здійснювати автоматичне керування, декілька. Вимикати ступені пускового резистора можна:

- контролюючи кутову швидкість, виконувати вимикання при значеннях кутової швидкості $\omega_1, \omega_2, \omega_3$;
- перемикання ступенів пускового резистора можна здійснювати, контролюючи межові значення струму I_2 та I_1 ;
- це ж саме можна здійснювати через певні проміжки часу t_1, t_2, t_3 .

Можлива ще й непряма функція, яка впливає з вищеназваних трьох – це керування пуском у функції шляху.

7.3.2 Керування пуском ДПС у функції кутової швидкості

При керуванні у функції кутової швидкості слід якимсь чином контролювати цю швидкість й при певному значенні швидкості подавати необхідний сигнал на відповідний комутаційний апарат.

Реле, яке безпосередньо спрацьовує на зміну кутової швидкості, є, наприклад, відцентрове реле. Такі реле тут вживаються нечасто.

Тому простіше фіксувати цю швидкість непрямым шляхом – вимірюванням других параметрів, однозначно пов'язаних з кутовою швидкістю. Для ДПС найкраще може правити такий параметр, як ЕРС двигуна, а для СД та АД з фазним ротором - частота струму ротора й ЕРС ротора.

У найпростішому випадку схема має вигляд

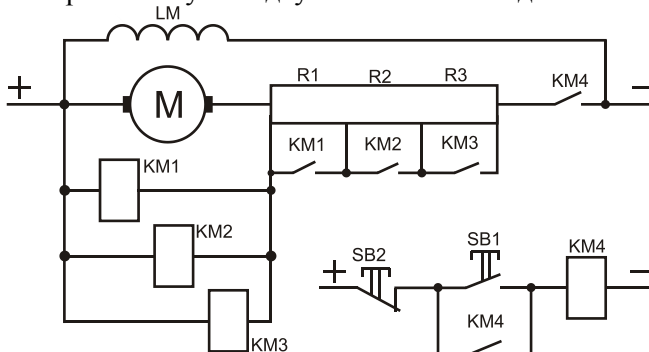


Рисунок 7.8 – Керування пуском ДПС НЗ у функції ЕРС з контакторами прискорення різної напруги спрацювання.

Напруга, що залежить від ЕРС якоря, прикладається до котушок контакторів *КМ1–КМ3*, які спрацьовують при певних значеннях напруги, контакти цих контакторів здійснюють перемикання ступенів резистора у певній послідовності.

Кожний із увімкнених контакторів прискорення *КМ1*, *КМ2*, *КМ3* настроєні на певне значення напруги втягнення.

При певній кутовій швидкості ω_1 (діаграма рисунок 7.7), напруга на котушці контактора прискорення *КМ1* досягає такого значення, при якому *КМ1* спрацьовує й замикає свій контакт на ступені *R1* пускового резистора, тобто перший ступінь *R1* виявляється зашунтованим. Котушки контакторів прискорення *КМ2* і *КМ3* настроєні на більші значення напруг втягування, тому їх контакти не спрацьовують.

Як тільки кутова швидкість двигуна досягне значення ω_2 , спрацьовує другий контактор прискорення *КМ2* – шунтується другий ступінь резистора *R2* й так далі.

Після того, як спрацює останній (третій у данному випадку) ступінь пускового резистора, пуск двигуна завершиться й він буде працювати на природній характеристиці.

Недоліком такого схемотехнічного рішення є різна напруга спрацювання контакторів, на яку повинні бути вибрані контактори.

Вадами способу керування пуском є:

- перегорання ступенів пускового резистора;
- неточне спрацювання контакторів при холодному та гарячому станах їх котушок;
- неточне спрацювання контакторів при коливання напруги мережі живлення під час пуску.

Ці вади не уможлиблюють застосування способу, що розглядається, для приводів значної потужності.

Застосовується цей спосіб у приводах металорізальних верстатів.

7.3.3 Керування пуском ДПС у функції струму

Із пускової діаграми (рисунок 7.7) видно, що струм під час пуску коливається у певних межах (I_1 - I_2). Початковий поштовх

струму визначається значенням необхідного пускового моменту й допустимого струму для даного двигуна I_1 .

Струм перемиканням I_2 вибирається таким чином, щоб його значення забезпечило необхідне мінімальне прискорення при пуску двигуна з заданим навантаженням.

Схема автоматичного пуску, що побудована за принципом керування у функції струму, повинна передбачити одно або кілька реле струму, які вмикаються безпосередньо у коло якоря двигуна. Кількість реле залежить від числа пускових ступенів реостата.

Схемотехнічне рішення способу керування пуску у функції струму буде зрозумілим із розгляду спрощеної схеми рисунок 7.9.

Тут застосоване струмове реле кутового прискорення KI й для спрощення пусковий резистор в один ступінь. При вмиканні лінійного контактора $KM1$ за допомогою командоапарата SA одночасно з колом якоря вмикається на живлення котушки блокувального реле KH (у колі якоря одержує живлення й котушка струмового реле KI).

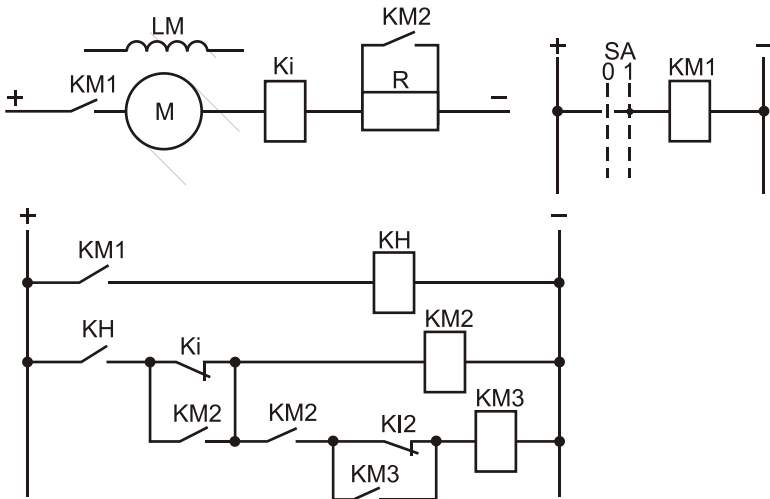


Рисунок 7.9 – Спрощена схема пуску ДПС НЗ у функції струму якоря.

Контакт KI розмикається перед вмиканням контакту KH блокувального реле, тому котушка пускового контактора $KM2$ знеструмлена. Контакт KH блокувального реле не дозволяє, таким чином, пусковому контактору $KM2$ увімкнутися відразу ж після вмикання лінійного контактора $KM1$. Струм відпускання струмового реле прискорення KI дорівнює струму I_2 , що призводить до спрацювання пускового контактора $KM2$. При наступному (другому) кидку струму від I_2 до I_1 пусковий контактор $KM2$ не відмикається внаслідок того, що контакт струмового реле KI зашунтований тепер контактом $KM2$ пускового контактора.

Достоїнством способу є те, що перемикання пускового резистора відбувається при заданому значенні струму I_2 й не залежить від коливань напруги живлення при пуску.

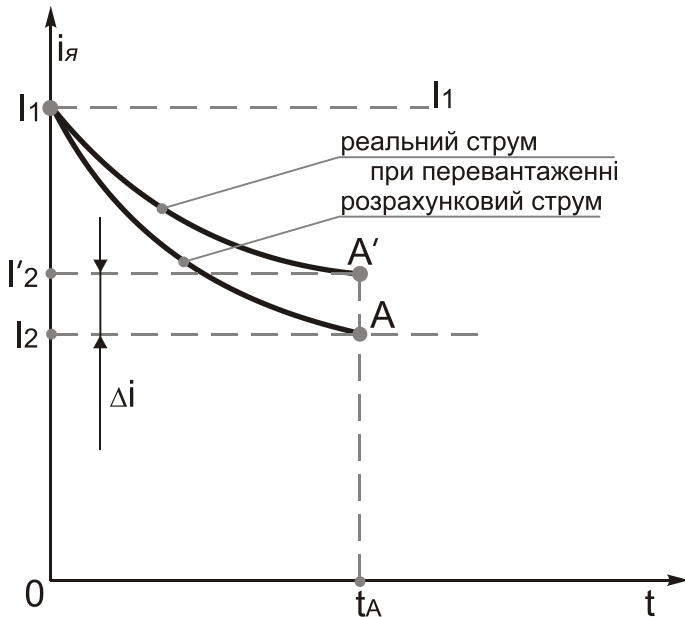


Рисунок 7.10 – Графік змінювання струму при збільшенні навантаження під час пуску.

Однаке, цей спосіб має й вади (дивись рисунок 7.10). Так, якщо при пуску двигуна момент навантаження на його валу за будь-яких причин виявиться вище розрахункового, то струм I'_2 може тривалий час перевищувати значення I_2 на величину Δi при якому відбувається відпускання реле струму KI , отже воно не спрацює, а пусковий резистор виявиться незахищеним (увімкненим), подальшого розгону двигуна не станеться (як кажуть, двигун застряв на якомусь пусковому ступені), крім того така ситуація призводить до перегорання резистора, оскільки він розрахований на короткочасну роботу.

7.3.4 Керування пуском ДПС у функції часу

Із пускової діаграми $\omega = f(t)$ та $i = f(t)$, (рисунок 7.7) видно, що шунтування ступенів пускового резистора повинно здійснюватись через певні проміжки часу: t_1 , t_2 й t_3 , тобто через t_1 треба зашунтувати перший ступінь резистора, t_2 – другий, t_3 – третій. Цим й визначається можливість створення схеми керування пуском у функції часу.

Необхідна витримка часу кожного реле визначається на основі пускової діаграми

$t_{в1} = 0,1 - 0,4 \text{ с}$ – контактори постійного струму;

$t_{в2} = 0,05 - 0,07 \text{ с}$ – контактори змінного струму.

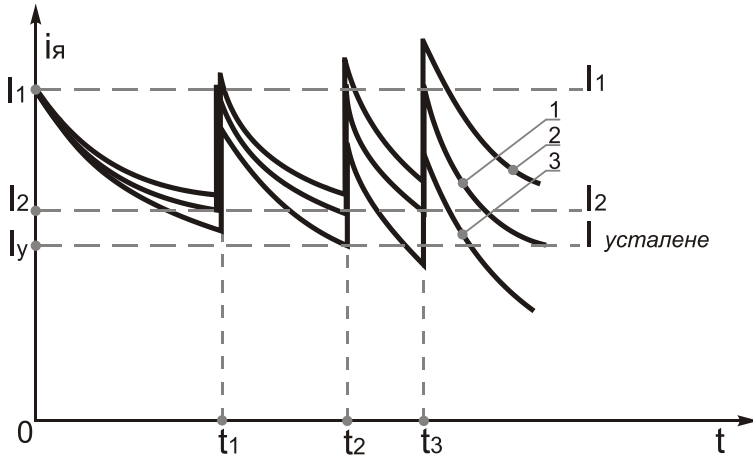


Рисунок 7.11 – Триступінчаста пускова діаграма для струму якоря при змінюванні навантаження під час пуску.

Реле часу керують контакторами прискорення, після закінчення витримки часу, незалежно від того, який струм протікає через двигун й до якої швидкості розігнався якор, відповідний ступень пускового резистора шунтується.

Порівняно з кривою 1 буде:

- середній пусковий момент підвищиться, а час пуску залишиться незмінним (крива 2);
- середній пусковий момент зменшиться при незмінному часу пуску (крива 3).

Так якщо пуск здійснюється у відповідності до кривої 2 (перевантаження) витримка часу реально буде

$$t_{1\text{реальне}} > t'_{1\text{розрахунок}};$$

$$t_2 > t'_2;$$

$$t_3 > t'_3.$$

Якщо пуск здійснюється у відповідності до кривої 3 (недовантаження), то

$$t_{1\text{реальне}} < t'_{1\text{розрахункове}};$$

$$t_2 < t'_2;$$

$$t_3 < t'_3.$$

Достоїнством таких схем є відсутність небезпеки скільки-небудь тривалої роботи двигуна на неповній кутовій швидкості (не „застряє” на будь якому ступені пускового резистора), чого не вдається уникнути в схемах керування у функції швидкості й у функції струму.

Небезпека, що може виникнути при раптовому різкому зростанні навантаження при пуску за будь-яких зовнішніх чи внутрішніх причин, усувається наявністю максимального захисту, за допомогою якої двигун відмикається від мережі.

Простота й надійність у роботі, а також можливість застосування одноступінних реле часу при багатоступеневому пуску, призвели до широкого застосування способу керування пуском у функції часу.

В електроприводах постійного струму застосовуються електромагнітні реле часу, доволі простих й надійних у роботі.

Для таких реле часу при двоступеневому пуску ДПТ схема

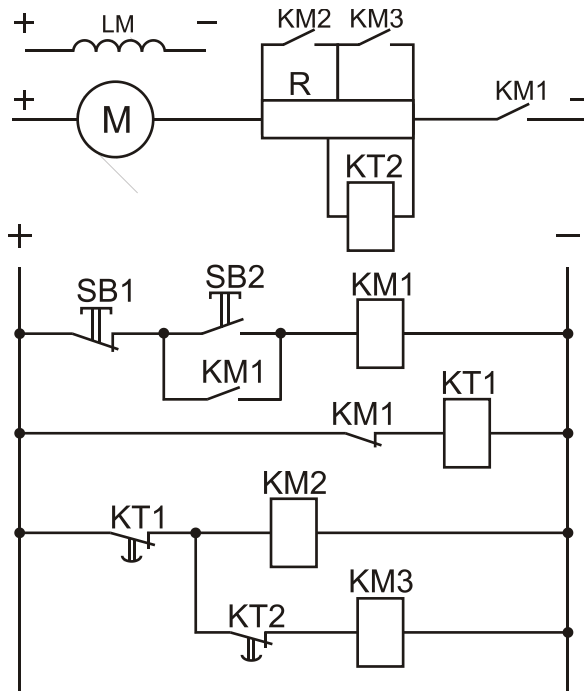


Рисунок 7.12 – Керування пуском ДПС НЗ у функції часу.

Схема має два реле часу *KT1* й *KT2*, кожне з яких відрховує час змінювання кутової швидкості при пуску на відповідному ступені резистора й вмикає відповідні контактори прискорення *KM2* й *KM3*. Команда на відлік часу кожному реле часу подається попереднім контактором при його вмиканні

- реле *KT1* контактором *KM1*;
- реле *KT2* контактором *KM2*;
- реле *KT3* контактором *KM3* (якщо було б три ступеня пускового резистора) й так далі.

Схема працює наступним чином. Після вмикання лінійного контактора *KM1* (кнопкою *SB2* вмикаємо котушку контактора *KM1*, спрацьовує контактор *KM1*, здійснюючи самопідхват контактами *KM1*, що шунтують кнопку *SB2*) вмикається його головний контакт

$KM1$, у колі якоря й розмикається замикаючий контакт $KM1$ у колі котушки реле часу $KT1$.

Реле $KT1$, втративши живлення при початку пуску, починає відрахунок часу (який приблизно дорівнює часу роботи двигуна на першому ступені $R1$). Після закінчення цього часу реле $KT1$ спрацьовує й контактом $KT1$ (у колі котушок контакторів $KM2$ й $KM3$) вимикає котушку контактора $KM2$, який своїми силовими контактами $KM2$ у колі якоря двигуна M відмикає перший ступінь резистора $R1$ й замикає накоротко котушку реле часу $KT2$. Це реле починає відрахунок часу витримки, що дорівнює часу роботи двигуна M на другому ступені пускового резистора $R2$. Після закінчення цього часу замикається його контакт $KT2$ (у колі котушки контактора $KM3$) й вимикаються силові контакти $KM3$ які відмикають (шунтують) другий ступінь $R2$ резистора.

Достоїнством керування моментом двигуна при пуску у функції часу є незмінність часу пуску при змінюванні збурних дій (моменту опору, моменту інерції напруги мережі, температури навколишнього середовища $\tau_{ia\hat{a}\hat{e}}^{\circ}$ й таке інше).

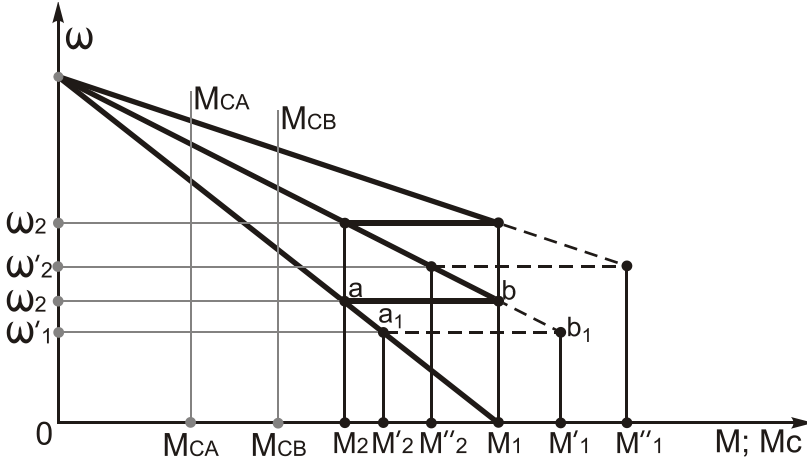


Рисунок 7.13 – Механічні характеристики при змінюванні статичного моменту опору.

Якщо M_c підвищиться від M_{ca} до M_{cb} , то момент перемикання теж збільшиться відповідно з M_2 до M'_2 з M_1 до M'_1 (якщо вимкнути опір першого ступеня), тобто точка a переміститься у a' , а точка b у b' . Це відбулося тому, що при збільшенні моменту опору з M_{ca} до M_{cb} , швидкість двигуна за час (незмінний), що відраховувало реле $KT1$ зросло не до значення ω_1 , а до значення ω'_1 причому $\omega'_1 < \omega_1$. На наступних ступенях моменти перемикання ще більше зростуть. Так на другому ступені:

$$M''_2 > M'_2, \text{ а } M''_1 > M'_1,$$

а загальний час пуску практично не зміниться (не зміниться витримка часу реле $KT2$ і так далі).

Недоліком керування пуском у функції часу є можливість значного підвищення струмів та моментів двигуна при збільшенні M_c , I , і зниженні $\tau_{наек}^\circ$, порівняно з їх розрахунковими значеннями.

Оскільки зі зростанням M_c процес розгону на першому ступені уповільнюється, до то моменту закінчення часу витримки реле часу $KT1$ швидкість двигуна не досягає значення розрахункової швидкості (ω_1), а після спрацювання першого контактора прискорення ($KM2$) відбудеться небажаний кидок струму й моменту, які можуть перевищити допустимі значення. Передчасне спрацювання контактора $KM2$ вимусить друге реле часу $KT2$ почати також передчасний відрахунок часу, що призведе до передчасного спрацювання другого контактора прискорення $KM3$ й ще більшому кидку струму та моменту й так далі.

7.4 Замкнені системи автоматичного керування

У розімкнених системах керування при недостатньо високій жорсткості статичних характеристик неможливо одержати високої точності регулювання, у них вихідна величина визначається параметрами двигуна й навантаженням на валу, а його змінювання не компенсується при різних збуреннях й таке інше.

У замкнених системах керування здійснюється автоматична компенсація існуючих збурних дій, вони можуть бути призначеними для забезпечення автоматичних режимів пуску, гальмування, реверсування, однаке ці системи дозволяють сформувати названі режими керування бажаним чином й пов'язати їх більш точно з вимогами технології [1, 2].

У замкнених системах керування, керування змінюється при відхиленні істинних значень вихідних параметрів від приписаних, що досягається шляхом уведення зворотних зв'язків з виходу на входи. Якщо зворотний зв'язок з'єднує вхід й вихід не системи в цілому, а її окремих елементів, то такий зворотній зв'язок зветься внутрішнім.

Зворотні зв'язки поділяються на жорсткі й гнучкі.

Жорсткі – діють у перехідних й усталених режимах.

Гнучкі – діють тільки у перехідних режимах.

Бувають зворотні зв'язки позитивні й негативні.

При збільшенні регульовної величини позитивний зворотній зв'язок її ще збільшує, а негативний – навпаки, її зменшує.

Зворотні зв'язки можуть передавати сигнали пропорційні самому значенню напруги, струму, моменту, й таке інше.

При цьому для здійснення автоматичного керування слід:

- виміряти сигнал зворотного зв'язку;
- цей результат виміру у вигляді напруги порівняти з заданим сигналом;
- направити результат порівняння об'єкту, що регулюється;
- підсилити сигнал, оскільки енергії вимірювального органу недостатньо для дії на орган, що регулюється.

7.4.1 Основи автоматичного керування електроприводів постійного струму

Розглянемо систему автоматичного регулювання кутової швидкості ДПС НЗ з двома різними зворотними зв'язками:

а) з жорстким негативним зворотним зв'язком за напругою (рисунк 7.14 а);

б) з жорстким позитивним зворотним зв'язком за струмом якоря ДПС (рисунк 7.14 б).

Система рівнянь в усталеному режимі для обох функціональних схем буде:

напруга на вході підсилювача $U_{\text{вх}} = U_3 - \alpha \cdot U_\partial$, (для схеми фрагмента **а**);

напруга на вході підсилювача $U_{\text{вх}} = U_3 + \beta \cdot I \cdot (R_n + R_\partial)$, (для схеми фрагмента **б**);

$E_n = k_\varepsilon \cdot k_i \cdot U_{\partial\partial}$ - е.р.с. перетворювача UZ ;

$E_\partial = k_M \cdot \omega$ - е.р.с. двигуна M ;

$U_\partial = E_n - I \cdot R_n$ - напруга двигуна;

$U_\partial = E_\partial + I \cdot R_\partial$ - напруга двигуна;

$M = k_M \cdot I$ - момент двигуна;

$\alpha = U_{33} / U_\partial$ - коефіцієнт підсилення зворотного зв'язку за напругою;

$\beta = R_{ш} / (R_n + R_\partial)$ - коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом;

$k_\varepsilon = U_\varepsilon / U_{\partial\partial}$ - коефіцієнт підсилення підсилювача A ;

$k_i = E_i / U_\varepsilon$ - коефіцієнт підсилення перетворювача;

U_3 - задаюча напруга;

U_{33} - напруга зворотного зв'язку;

$k_M = c_M \cdot \Phi$ - електромашинна стала двигуна;

ω - кутова швидкість двигуна;

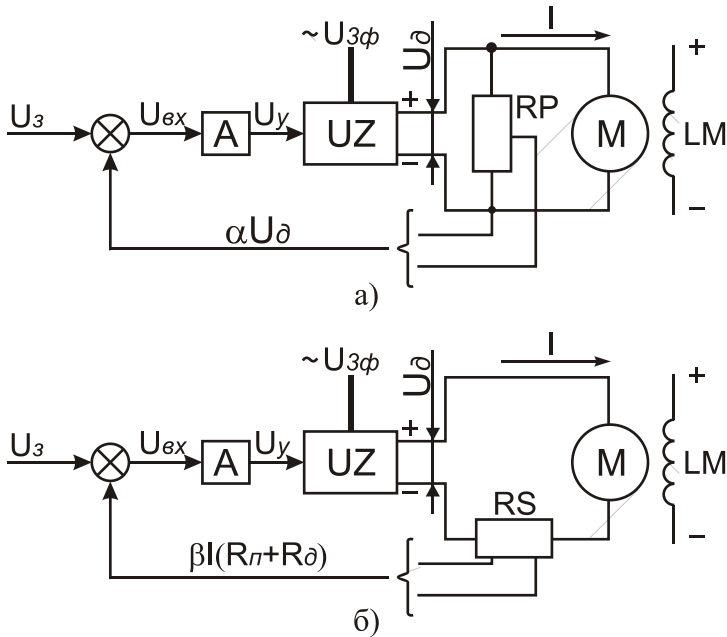
R_n - опір перетворювача;

R_∂ - опір двигуна;

I - струм якірного кола двигуна;

U_ε - напруга керування (на вході перетворювача UZ);

$R_{ш}$ - опір штучного резистора (шунта RS).



а – зворотний зв'язок за напругою;

б – зворотний зв'язок за струмом.

Рисунок 7.14 – Система автоматичного регулювання кутової швидкості ДПС

НЗ.

У фрагменті **а** за допомогою жорсткого негативного зв'язку за напругою компенсується падіння напруги на внутрішньому опорі R_n перетворювача UZ й коливання напруги мережі $\sim U_{3\phi}$ (тобто стабілізується вихідна напруга перетворювача U_o – напруга живлення двигуна).

У фрагменті **б** за допомогою жорсткого позитивного зв'язку за струмом здійснюється компенсація падіння кутової швидкості двигуна при збільшенні навантаження шляхом автоматичного збільшення е.р.с. перетворювача E_n .

7.4.2 Основи автоматичного керування електроприводів змінного струму

У замкнених системах керування асинхронний двигун може стійко працювати забезпечуючи плавне регулювання швидкості у доволі широкому діапазоні регулювання.

Функціональна схема ЕП з регулюванням кутової швидкості за допомогою тиристорного регулятора напруги на базі АД з фазним ротором має вигляд поданий на рисунку 7.15.

На схемі прийняті позначення:

$\sim U_{3\phi}$ - напруга живлення ТРН;

- тиристорний регулятор напруги (ТРН);

СК - система керування ТРН;

VS1–VS - силові тиристори;

α - кут керування тиристорами;

α_0 - кут відкривання тиристорів при відсутності сигналу керування $U_{\epsilon 1} = 0$;

$U_{\epsilon 1}$ - сигнал керування на вході СК УЗ (системи керування перетворювача);

$U_{\epsilon 2}$ - сигнал керування на виході СК УЗ;

A - підсилювач;

U_{ex} - напруга на вході підсилювача A;

U_3 - задаюча напруга;

BR - тахогенератор (давач швидкості);

$U_{m2} = \gamma \cdot \omega = U_{33}$ - сигнал (напруга) зворотного зв'язку;

γ - коефіцієнт передачі тахогенератора $[B \cdot c]$;

R_{20} - додатковий опір у колі ротора АД.

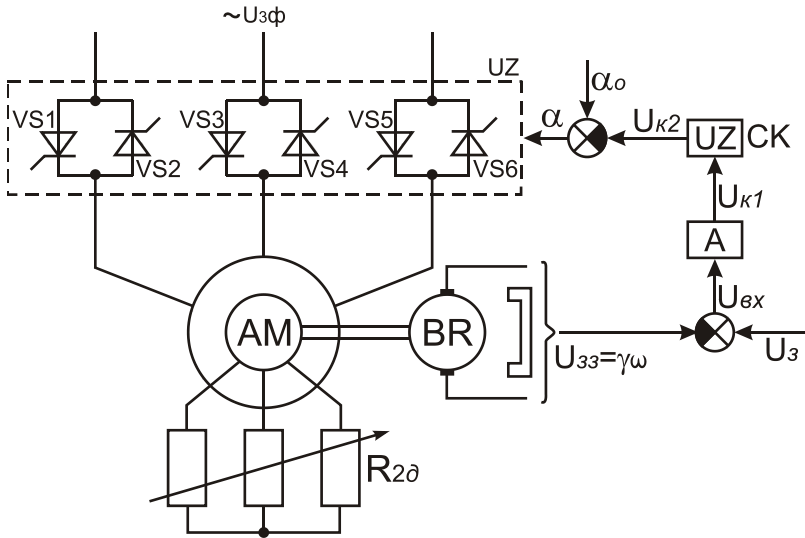


Рисунок 7.15 – Функціональна схема ЕП з регулюванням кутової швидкості за допомогою ТРН.

Регулювання напруги на статорі АД здійснюється ТРН, кут керування тиристорів VS1–VS6 якого змінюється системою керування СК перетворювача.

На вхід СК подається сигнал керування $U_{\varepsilon 1}$ від підсилювача А. Цей сигнал залежить від різниці задаючої напруги U_3 й напруги негативного зворотного зв'язку за швидкістю U_{33} яка знімається з затисків тахогенератора BR

$$U_{33} = U_{m\gamma} = \gamma \cdot \omega.$$

Механічні характеристики АД можна одержати у межах мінімального та максимального кута $\alpha_{\max}$ значень кута керування тиристорів.

Мінімальний кут керування тиристорами $\alpha_{\min}$ дорівнює фазному куту навантаження (який визначається величиною ковзання, активного та індуктивного опорів АД й характером навантаження).

Максимальний кут керування тиристорами $\alpha_{\max}$ для схем, що розглядається, приблизно дорівнює 135° . При такому куті момент, що розвиває АД як правило менше статичного моменту неробочого ходу двигуна M_0 .

Таким чином при роботі АД у замкненій системі в міру збільшення його навантаження кут керування α повинен зменшуватись від деякого максимального до мінімального. Тому система керування тиристорами повинна виробляти при відсутності сигналу керування імпульси з кутом керування

$$\alpha_0 > \alpha_{\max},$$

а зі зростанням сигналу керування в міру зростання навантаження АД й зменшенням його кутової швидкості кут α повинен зменшуватись. (При цьому, максимальному куту керування $\alpha_{\max}$ відповідає мінімальне значення напруги живлення двигуна, мінімальному значенню кута керування $\alpha_{\min}$ відповідає номінальне значення напруги живлення статора)

$$\begin{aligned}\alpha_{\max} &= 135^\circ \text{ (при } U_1 = U_{1\min} \text{)}, \\ \alpha_{\min} &= f(s) \text{ (при } U_1 = U_{1\text{ном}} \text{)}, \\ \text{оскільки } U_1 &= f(\alpha, \varphi), \varphi = f(s).\end{aligned}$$

Такий процес у системі керування перетворювачем віддзеркалено на рисунку 7.15 вузлом порівняння на виході $СК$. У відповідності до нього можна записати

$$\begin{aligned}\alpha &= \alpha_0 - K_c \cdot K_\kappa \cdot (U_3 - U_{33}), \\ \alpha &= \alpha_0 - K_c \cdot K_\kappa \cdot (U_3 - \gamma \cdot \omega),\end{aligned}$$

де K_c - коефіцієнт підсилення (передатний коефіцієнт) системи керування CK ;

K_k - коефіцієнт підсилення (передатний коефіцієнт) підсилювача A .

Використовуючи останнє рівняння можна розрахувати необхідні значення K_k та U_s , що будуть забезпечувати необхідні значення кутової швидкості й жорсткості механічної характеристики. (Діапазон регулювання до 20:1, керування не економічне й використовується у випадках короткочасних режимів роботи).

7.4.3 Стежний електропривод

Стежний ЕП являє собою замкнену автоматичну систему, за допомогою якої виконавчий орган з певною точністю відпрацьовує рух робочого механізму у відповідності задаючого сигналу, як такого, що може змінюватись довільним чином.

Застосовується стежний електропривод (СЕП) при автоматичному контролі змінювання різних фізичних величин в металургійних, металорізальних, екскаваторних ЕП, в маніпуляторах й таке інше. Потужність СЕП від декілька ват до десятків кіловат.

У загальному випадку СЕП (рисунок 7.16) складається з давача D , стежного (приймального) пристрою $СП$ підсилювача A й виконавчого двигуна $ВД$. Давач разом з приймальним пристроєм (приймачем) утворюють пристрій який називають вимірювачем розузгодження $ВР$. Названі елементи СЕП пов'язані між собою так, що змінювання у положенні давача Δ діє через приймач $СП$ та підсилювач A на двигун $ВД$, який відпрацьовує задане на давачі переміщення. СЕП працює тільки за рахунок розузгодження, яке виникає між здавачем D й виконавчим двигуном $ВД$ (механізмом). Процес роботи СЕП зводиться до безперервного автоматичного усунення розузгодження, що виникає.

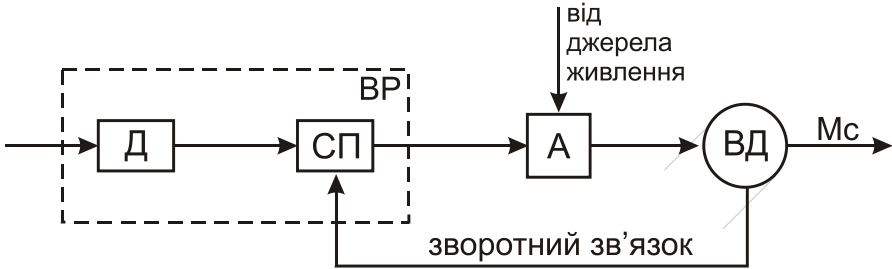


Рисунок 7.16 – Структурна схема СЕС.

За способом дії системи керування СЕС поділяються на дві групи:

- СЕС з релейним (переривистим) керуванням;
- СЕС з безперервним керуванням.

СЕС з релейним керуванням характерні тим, що напруга на виконавчий двигун подається тільки у тому випадку, коли кут розузгодження досягає певного значення. У процесі зростання кута розузгодження до цього значення двигун нерухомий. Кутова швидкість й кутове прискорення двигуна після його вмикання не залежать від кута розузгодження, а визначаються параметрами самого ЕП (M, J, M_c). У СЕС з переривистим керуванням використовуються релейно-контакторна апаратура, або безконтактні пристрої з релейною характеристикою.

Відмітною рисою СЕС безперервного керування є безперервне керування виконавчим двигуном, яке залежить від поточного кута розузгодження.

У відповідності вимог до СЕС відносно високої точності відпрацьовування розузгодження у статичному та динамічному режимах, стійкості роботи, швидкодії й таке інше, СЕС виконуються з різними зворотними зв'язками, які забезпечують керування у функції кута розузгодження та його похідної, у функції кута розузгодження та інтегралу цього кута й таке інше.

7.4.4 Основи програмного керування ЕП

Якщо система автоматичного керування ЕП діє за заздалегідь заданій програмі, то таке керування називається програмним.

Програма може задаватись різними способами, які суттєво удосконалюються у процесі розвитку ЕП:

- у вигляді заздалегідь виготовлених шаблонів й моделей (у копіювальних верстатах);
- у вигляді стежних ЕП подач у процесі обробки складних деталей;
- у вигляді числових програм за допомогою яких числові дані креслення безпосередньо вводяться в комп'ютер при забезпеченні автоматичної обробки деталі (системи числового програмного керування - ЧПК).

Обладнання з ЧПК має високі техніко-економічні показники, особливо при обробці складних за конфігурацією виробів у дрібносерійному й одиночному виробництвах.

Існують дві групи систем ЧПК в залежності від технологічних умов роботи:

- системи позиціонування (керування положенням), тут необхідно забезпечити положення виробу відносно інструмента у певні дискретні моменти часу, при цьому характер траєкторії переміщення із одного положення в друге не має значення (свердлильні верстати, діркопробивні преси й таке інше);
- системи контурного (безперервного) керування, тут необхідне безперервне керування рухом оброблюваної деталі відносно інструмента (фрезерні верстати для обробки штампів й прес-форм, газорізальні машини й таке інше).

Системи ЧПК не завжди можуть програмно забезпечувати необхідний режим обробки, особливо із-за впливу різних випадкових факторів. Але у верстатах з ЧПК головного привода й привода подач можна використовувати принцип адаптивного керування, тобто автоматично здійснюється вибір оптимального режиму обробки, підтримки його з забезпеченням при необхідності відповідної корекції.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
2. Бондаренко В.І. Основы электропривода: Навчальний посібник / В.І.Бондаренко, Ю.О.Крисан. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2013. – 402 с.
3. Чиликин М.Г. Сандлер А.С. Общий курс электропривода. М.: Энергоиздат, 1981. 576с.
4. Афонин А.А., Бондаренко В.И. и др. Литейный электромагнитный двигатель в режиме автокоммутации. – Техническая электродинамика, 1987, №2 с. 65-72.
5. Бондаренко В.І. Основы электричного привода: Навчальний посібник / В.І.Бондаренко. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2003. – 312 с.
6. А.С. 1580518 (СССР). Способ управления разгоном многофазного шагового двигателя / Писанко В.В., Бондаренко В.И. и др. Опубл. в Б.И., 1990, №27.