

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-енергетичний факультет

Кафедра тракторів та сільськогосподарських машин,
експлуатації і технічного сервісу

Електропривод і автоматизація

методичні рекомендації до вивчення курсу лекцій для здобувачів
вищої освіти освітнього ступеня «Бакалавр» спеціальності 208 «Агроінженерія»
денної та заочної форм навчання

Друкується за рішенням науково-методичної комісії інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від «21» жовтня 2021 р., протокол №2.

Укладач:

Д. Д. Марченко – канд. тех. наук, доцент кафедри тракторів та сільськогосподарських машин, експлуатації і технічного сервісу, Миколаївський національний аграрний університет.

Рецензенти:

А. А. Ставинський – докт. тех. наук, професор, завідувач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

І. М. Сидорика – канд. тех. наук, доцент кафедри теоретичної електротехніки та електронних систем, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова.

Зміст

Вступ.	3
Лекція 1. Механіка електропривода.	4
Лекція 2. Електромеханічні та механічні характеристики електродвигунів.	6
Лекція 3. Перехідні процеси в електроприводах.	10
Лекція 4. Енергетика електропривода.	14
Лекція 5. Апарати керування та захисту електроприводів.	21
Лекція 6. Основні поняття автоматики і принципи автоматичного керування.	26
Лекція 7. Схеми систем автоматизації.	34
Лекція 8. Принцип дії типової схеми керування електроприводом.	43
Лекція 9. Типові вузли схем автоматичного управління гальмуванням ДПС.	47
Лекція 10. Вузли електричного захисту двигунів і систем управління.	51
Список рекомендованої літератури	56

Вступ

Метою вивчення дисципліни є одержання знань фізичних властивостей електропривода, як об'єкта автоматичного керування, його енергетичних характеристик та одержання ґрунтовних теоретичних знань з урахуванням сучасного стану і основних напрямів розвитку електропривода. Теоретичною базою курсу є теоретична механіка і електротехніка. Для розширення теоретичних знань значне місце в програмі займають питання динаміки електромеханічних систем. На перший план висуваються задачі вивчення властивостей розімкнених електромеханічних систем з жорсткими і пружними механічними зв'язками. Програмою передбачається виконання лабораторних робіт, що обумовлює удосконалення методів розрахунку характеристик, обґрунтування шляхів раціонального вибору елементів і оптимального проектування системи електропривода в цілому. Курс є базою для інших спеціальних дисципліні, які пов'язані з теорією і практикою промислового електропривода.

Завданням курсу навчитись проектувати, досліджувати, налагоджувати та експлуатувати електроприводи в різних галузях народного господарства.

Вивчення предмета ґрунтується на знанні студентами вищої математики, фізики, теоретичної механіки, нарисної геометрії, опору матеріалів.

В процесі вивчення дисципліни використовуються такі види навчання: лекції, лабораторні заняття, самостійні.

Вивчення навчальної дисципліни передбачає формування та розвиток у студентів компетентностей: здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми у галузі агропромислового виробництва та у процесі навчання, що передбачає застосування визначених теорій та методів відповідної науки і характеризується певною невизначеністю умов і вимог.

Кредитно-трансферна схема вивчення дисципліни «Електропривод і автоматизація» для здобувачів вищої освіти ступеня «Бакалавр» спеціальності 208 «Агроінженерія» денної та заочної форм навчання

№ п/п	Найменування розподілу	К-ть годин/кредитів		
		Лекції	ЛЗ (ПЗ)	Всього
8-й семестр				
1	Модуль 1. Основи електроприводу.	8	8	16/0,53
2	Модуль 2. Засоби автоматизації мобільних сільськогосподарських агрегатів.	12	10	22/0,73
Всього		20	18	38 (1,26)

Лекція 1. Механіка електропривода

План:

1.1. Стан та основні напрями розвитку електропривода, його роль у сільськогосподарському виробництві.

1.2. Механіка електропривода.

1. Стан та основні напрями розвитку електропривода, його роль у сільськогосподарському виробництві

Автоматизований електропривод (ЕП) - головний споживач електроенергії. У промислово - розвинених країнах більше 65 % вироблюваної електроенергії перетворюється електроприводом в механічну енергію. Тому розвиток і вдосконалення електроприводу, що є основою енергоозброєності праці, сприяє зростанню продуктивності і підвищенню ефективності виробництва. Знання властивостей і можливостей електроприводу дозволяє інженеру-електрику забезпечити раціональне використання електроприводу з урахуванням вимог як технологічних машин, так і систем електропостачання.

В наш час у провідних галузях промисловості відношення встановленої потужності електроприводів до загальної встановленої потужності приводів з двигунами всіх видів (теплових, гідравлічних, пневматичних) наближається до 100 %. Це визначається тим, що ЕП виготовляються на різноманітні потужності (від сотих часток вата до десятків тисяч кіловат) і швидкості обертання (від часток обороту валу в хвилину до декількох сотень тисяч обертів на хвилину); ЕП працює в середовищі агресивних рідин і газів при низьких і високих температурах; завдяки керованості перетворювача, ЕП легко регулює хід технологічного процесу, забезпечуючи різні параметри руху робочих органів машин; він має високий к.к.д., надійний в експлуатації і не забруднює навколишнє середовище.

З давніх часів людина прагнула замінити важку фізичну працю, яка була джерелом механічної енергії (МЕ), на роботу механізмів і машин. Для цього на транспорті та на сільськогосподарських роботах, на млинах і зрошувальних системах вона використовувала мускульну силу тварин, енергію вітру і води, а пізніше - хімічну енергію палива. Так з'явився привод - пристрій, що складається з трьох істотно різних частин: двигуна (Д), механічного передавального пристрою (МПП) і технологічної машини (ТМ).

Призначення двигуна - перетворення енергії різних видів в механічну енергію. МПП призначений для передачі МЕ від двигуна до ТМ. Він не впливає на кількість переданої МЕ (без урахування втрат), але може змінювати її параметри і для узгодження видів руху

виконується у вигляді пасової, ланцюгової, зубчастої або інших механічних передач.

У технологічній машині МЕ використовується для зміни властивостей, стану, форми або положення оброблюваного матеріалу або виробу.

2. Механіка електропривода

У сучасних приводах в якості джерела МЕ використовуються різні електричні двигуни (ЕД). Вони перетворюють електричну енергію (ЕЕ) в механічну і тому привід отримав назву електроприводу (ЕП). Його функціональна схема наведена на рис. 1.1. До її складу, крім названих елементів, входить керований перетворювач (П), за допомогою якого ЕЕ від мережі подається до ЕД.

Змінюючи сигнал управління перетворювачем U_y , можна змінювати кількість ЕЕ, що надходить від мережі до ЕД. В результаті цього буде змінюватися кількість МЕ, що виробляється двигуном, і одержує ТМ. Це, в свою чергу, призведе до зміни технологічного процесу, ефективність якого характеризується регульованою величиною $y(t)$.

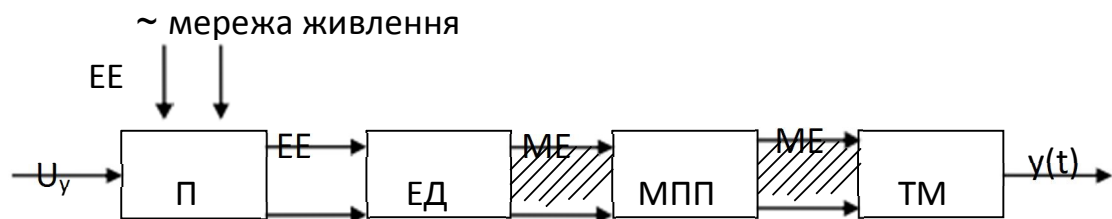


Рис. 1.1. Функціональна схема електропривода

Контрольні питання:

1. Призначення електропривода
2. Основні частини електропривода
3. Принцип дії електропривода

Лекція 2. Електромеханічні та механічні характеристики електродвигунів

План:

- 2.1. Поняття електромеханічних та механічних характеристик.
- 2.2. Механічні характеристики двигунів постійного струму незалежного збудження.
- 2.3. Механічні характеристики двигунів постійного струму послідовного збудження.

2.1. Поняття електромеханічних та механічних характеристик

Електричний двигун, на відміну від двигунів інших типів, здатний сам автоматично розганятися до швидкості усталеного режиму роботи, знижувати швидкість при збільшенні моменту опору і з усталеного режиму з більшою швидкістю переходити в сталий режим з меншою швидкістю, збільшувати швидкість при зменшенні моменту опору і переходити з усталеного режиму з меншою швидкістю до сталого режиму з більшою швидкістю. Ця особливість електричного двигуна пояснюється тим, що між швидкістю обертання і обертовим моментом двигуна існує залежність $\omega = f(M)$, відповідно до якої зі збільшенням моменту швидкість зменшується і навпаки. Називають цю залежність механічною характеристикою двигуна.

За допомогою механічної характеристики можна визначити основні властивості електричного двигуна і перевірити їх відповідність вимогам технологічної машини .

Осі абсцис і ординат, за якими відкладаються відповідно величини M і ω , поділяють площину на чотири квадрата. Перший номер прийнято привласнювати верхньому правому квадрату, а інші нумерувати проти годинникової стрілки.

У першому квадранті знаки M і ω , а значить і напрямки величин, збігається. Тому в ньому розташовуються механічні характеристики для рухового режиму роботи електричної машини. Аналогічні характеристики для протилежного напрямку обертання розташовуються і в третьому квадранті, так як знаки M і ω негативні.

У другому квадранті швидкість ω позитивна, а момент M має негативний знак. Тому в ньому розташовуються механічні характеристики, відповідні режиму електричного гальмування, коли під дією інерційних сил напрямки обертання зберігається, а напрямки моменту за рахунок зміни схеми включення двигуна змінюється на протилежний. Аналогічні характеристики для протилежного напрямку обертання розташовуються і в четвертому квадранті, так як в ньому ω має негативний знак, а M - позитивний.

2.2. Механічні характеристики двигунів постійного струму незалежного збудження

Схема включення двигуна постійного струму (ДПС) з незалежним збудженням наведена на рис. 2.1.

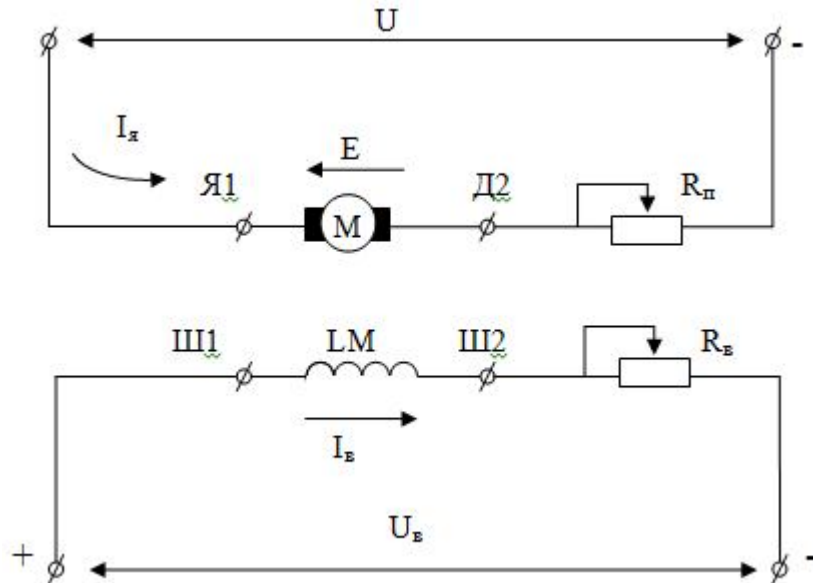


Рис. 2.1. Схема включення двигуна постійного струму (ДПС) з незалежним збудженням

Якір двигуна і обмотка збудження LM отримує живлення від незалежних джерел напруги U і $U_{\text{в}}$. Тому струм в обмотці збудження $I_{\text{в}}$ не залежить від струму якоря $I_{\text{я}}$. Потужність джерела $U_{\text{в}}$ не перевищує 15% від потужності джерела U.

При обертанні якоря в його обмотці наводиться е.р.с. обертання E. На схемі включення двигуна напрямок E зустрічний стосовно напрямку U, що відповідає руховому режиму роботи. Величина E дорівнює:

$$E = k\Phi\omega,$$

где ω – кутова швидкість двигуна;

Φ – потік двигателя;

$$k = \frac{pN}{2\pi a}$$

– конструктивний коефіцієнт двигуна, дані для розрахунку якого наводяться в довідниках;

p - число пар полюсів двигуна;

N - число активних провідників обмотки якоря;

a - число пар паралельних гілок обмотки якоря.

Напрямок якiрного струму $I_{\text{я}}$, як i напрямки E , на схемi включення показано для рухового режиму роботи.

Рiвняння механiчної характеристики $\omega = f(M)$:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR_{\text{яц}}}{k^2\Phi^2} \text{ або } \omega = \frac{U}{c} - \frac{MR_{\text{яц}}}{c^2},$$

де $c = k\Phi$ – коефiцiєнт, що приймається постійним i не залежним вiд струму якоря, якщо у двигуна є компенсацiйна обмотка або якщо реакцiю якоря не враховувати.

При незмiнних параметрах U , Φ , $R_{\text{яц}}$ рiвняння механiчної характеристики є рiвняння прямої лiнii.

Побудувати механiчну характеристику, враховуючи її лiнiiйнiсть, можна по двох точках - точцi iдеального холостого ходу з координатами ($M = 0$; $\omega = \omega_0$) i точцi, що вiдповiдає номiнальному режиму роботи ($M = M_{\text{н}}$; $\omega = \omega_{\text{н}}$). На пiдставi паспортних даних двигуна ($P_{\text{н}}$, $U_{\text{н}}$, $I_{\text{н}}$, $n_{\text{н}}$) можна знайти:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{2\pi n_{\text{н}}}{60}; M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}; \omega_0 = \frac{U_{\text{н}}}{k\Phi_{\text{н}}}$$

Механiчна характеристика приведена на рис. 2.2.

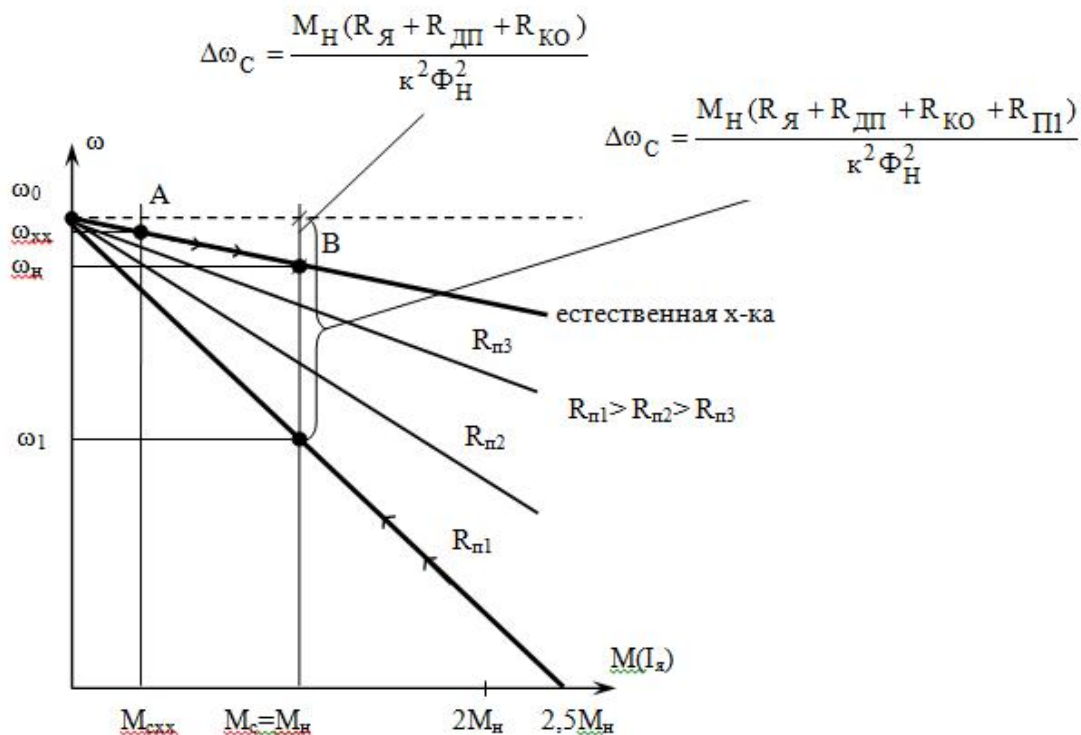


Рис. 2.2. Механiчна характеристика ДПС з незалежним збудженням

2.3. Механічні характеристики двигунів постійного струму послідовного збудження

Схема включення двигуна наведена на рис. 2.3. Якір двигуна М і обмотка збудження LM включені послідовно і отримують живлення від одного джерела U. Тому струм якоря I_a є і струмом збудження I_b . Ця обставина визначає єдину відмінність в конструкції двигуна з послідовним збудженням від двигуна з незалежним збудженням: обмотка збудження LM ДПС з послідовним збудженням виконана провідником того ж перетину, що і обмотка якоря.

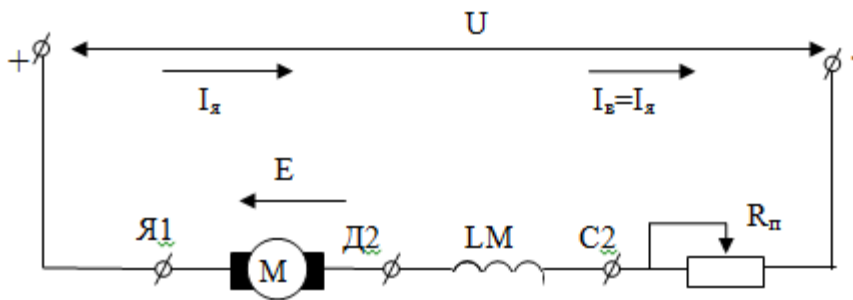


Рис. 2.3. Схема включення ДПС з послідовним збудженням.

Залежність швидкості двигуна ω від струму якоря I_a $\omega = f(I_a)$ називається електромеханічною характеристикою:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I_a R_{яц}}{k\Phi}$$

Рівняння механічної характеристики:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega_c = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I_a R_{яц}}{k\Phi} = \frac{U}{k\alpha I_a} - \frac{I_a R_{яц}}{k\alpha I_a} = \frac{U}{k\alpha \sqrt{\frac{M}{k\alpha}}} - \frac{R_{яц}}{k\alpha} = \frac{A}{\sqrt{M}} - B$$

де $A = U/k\alpha$; $B = R_{яц}/(k\alpha)$ – постійні величини.

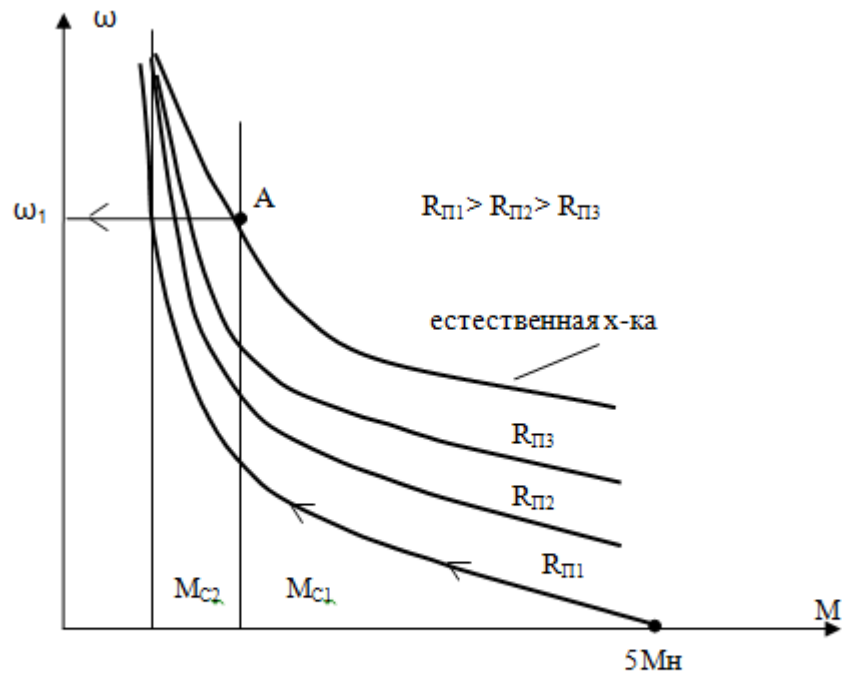


Рис. 2.4. Механічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження.

Контрольні питання:

1. Поняття електромеханічної характеристики ЕП.
2. Поняття механічної характеристики ЕП.
3. Особливості механічних характеристик двигунів постійного струму незалежного збудження.
4. Особливості механічних характеристик двигунів постійного струму послідовного збудження.

Лекція 3. Перехідні процеси в електроприводах

План:

- 3.1. Поняття про перехідні процеси.
- 3.2. Рівняння перехідного процесу в електроприводах.
- 3.3. Форми запису рівняння руху електроприводу.
- 3.4. Час роботи електроприводу в перехідному режимі.

3.1. Поняття про перехідні процеси

У процесі роботи електроприводу змінюються режими його роботи, обумовлені пуском і гальмуванням приводного двигуна, змінами навантаження з боку робочої машини, регулюванням частоти обертання

і зміною напрямку обертання, коливаннями напруги в мережі живлення і т.і.

Перехід електроприводу з одного усталеного стану, який характеризується визначеними значеннями обертового моменту, частотою обертання, величиною струму, споживаного двигуном, в інший усталений стан з іншими значеннями перерахованих параметрів називається *перехідним процесом*.

Механічна інерція обертових мас електроприводу та електромагнітна інерція обмоток приводного двигуна і керуючих пристроїв уповільнюють тривалість перехідного процесу, що безпосередньо відображається на роботі машин і механізмів, які приводяться в рух.

Найважливіший параметр перехідного процесу — це його тривалість. Тривалість електромагнітних процесів у перехідному режимі роботи електроприводу зазвичай менше тривалості механічних процесів. Тому час протікання перехідного процесу прийнято визначати *електромеханічною постійною часу* T_{em} , що являє собою час, на протязі якого електропривод, маючи момент інерції J , розганяється з нерухомого стану до частоти обертання, рівної $0,633n_0$, де n_0 — частота обертання ротора (якоря) приводного двигуна при ідеальному холостому ході.

3.2. Рівняння перехідного процесу в електроприводах

Рівняння руху одномасової механічної системи в теорії електроприводу отримало назву рівняння руху електроприводу.

У загальній формі запису воно має вигляд:

$$\pm M \pm M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

де $\frac{d\omega}{dt}$ - кутове прискорення одномасової системи.

У рівнянні руху «+» ставиться в тому випадку, коли напрям M або M_c збігається з напрямком швидкості обертання ω , а знак «-», коли вони спрямовані протилежно.

Знак «+» перед M відповідає руховому режиму роботи електричного приводу: двигун перетворює електричну енергію в механічну, розвиває крутний момент M і обертає одномасову систему в напрямку крутного моменту.

Знак «-» перед M відповідає режиму електричного гальмування. Для переведення в цей режим працюючого електропривода схема його включення або її параметри змінюються таким чином, що обертальний

момент M змінюється на протилежний напрямок. Оскільки напрямок обертання зберігається під дією інерційних сил, обертальний момент двигуна починає гальмувати рух одномасової системи. Двигун переходить у генераторний режим роботи. Він забирає запасену в механічній частині приводу механічну енергію, знижуючи тим самим швидкість обертання, та перетворює її в електричну енергію. Електрична енергія або повертається в мережу живлення, або витрачається на нагрів двигуна.

Знак «+» перед M_c говорить про те, що M_c сприяє обертанню. Знак «-» говорить про те, що перешкоджає.

Всі моменти опору можна розділити на дві категорії: 1 - реактивні M_c ; 2 - активні або потенційні M_c .

У першу категорію входять моменти опору, поява яких пов'язана з необхідністю долати тертя. Вони завжди перешкоджають руху електроприводу і змінюють свій знак при зміні напрямку обертання.

У другу категорію входять моменти від сили тяжіння, а також від розтягування, стиснення або скручування пружних тіл. Вони пов'язані зі зміною потенційної енергії окремих елементів кінематичної схеми. Тому вони можуть як перешкоджати, так і сприяти руху, не змінюючи свого знака при зміні напрямку обертання.

3.3. Форми запису рівняння руху електроприводу

На прикладі електроприводу підйомної лебідки можна розглянути всі чотири форми запису рівняння руху електроприводу.

У першому випадку електропривод включений в напрямку підйому вантажу. Двигун працює в руховому режимі. Вантаж, підвішений на гаку, створює момент опору, що перешкоджає обертанню. Тоді рівняння руху буде мати вигляд:

$$+M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

У другому випадку в кінці підйому вантажу двигун переводиться в режим електричного гальмування і його момент, як і момент опору, перешкоджатиме обертанню. Рівняння руху в цьому випадку має вигляд:

$$-M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

У третьому випадку електропривод включений в напрямку опускання вантажу, тобто двигун працює в режимі двигуна. Оскільки момент опору, створюваний піднятим вантажем, є активним, то при

опусканні вантажу він буде не перешкоджати, а сприяти обертанню. Рівняння руху має вигляд:

$$+M + M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

У четвертому випадку в кінці опускання вантажу двигун знову переводиться в режим електричного гальмування, а момент опору продовжує обертати двигун в напрямку спуску. У цьому випадку рівняння руху має вигляд:

$$-M + M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

При прискоренні чи уповільненні електропривод працює в перехідному режимі, вигляд якого повністю визначається законом зміни динамічного моменту M_d . Останній, будучи функцією обертального моменту M і моменту опору M_c , може залежати від швидкості, часу або положення робочого органу машини.

3.4. Час роботи електроприводу в перехідному режимі

Визначення часу роботи електроприводу в перехідному режимі засноване на інтегруванні рівняння руху електроприводу.

Для режиму пуску, коли має місце прискорення приводу, рівняння руху електроприводу має вигляд:

$$+M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Розділивши змінні в рівнянні, отримаємо:

$$dt = J \frac{d\omega}{M - M_c}.$$

Тоді час, необхідний для збільшення швидкості від ω_1 до ω_2 , t_{12} можна знайти, проінтегрувавши останні рівняння:

$$t_{1,2} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} J \frac{d\omega}{M - M_c}.$$

Для вирішення цього інтеграла необхідно знати залежності моментів двигуна і механізму від швидкості. Такі залежності $\omega = f(M)$ і

$\omega = f(M_c)$ називаються механічними характеристиками відповідно двигуна і технологічної машини.

Прийнявши M і M_c незалежними від швидкості величинами, отримуємо найпростіший випадок рішення інтеграла. Величина часу розгону t_{12} буде дорівнювати:

$$t_{12} = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{M - M_c}.$$

Для режиму електричного гальмування, коли має місце уповільнення приводу, рівняння руху має вигляд:

$$-M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Зробивши аналогічні розрахунки, отримаємо час гальмування

$$t_{21} = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{M + M_c}.$$

Якщо величини M і M_c знаходяться в складній залежності від швидкості, то рівняння руху аналітично не вирішується. Необхідно використовувати наближені методи рішення.

Контрольні питання:

1. Ваше розуміння перехідного процесу.
2. Поняття рухового режиму роботи електричного приводу.
3. Поняття режиму електричного гальмування електричного приводу.
4. Пояснити складові рівняння руху електроприводу.

Лекція 4. Енергетика електропривода

План:

- 4.1. Втрати потужності, ККД і коефіцієнт потужності в електроприводах.
- 4.2. Рівняння нагрівання і охолодження електродвигуна.
- 4.3. Класифікація номінальних режимів роботи електродвигунів.
- 4.4. Методи визначення потужності.

4.1. Втрати потужності, ККД і коефіцієнт потужності в електроприводах

Втрати потужності в електродвигунах поділяються на постійні та змінні. Вони включають:

- втрати в сталі (втрати в осерді), які залежать від напруги і тому є постійними для електродвигуна, незалежно від його навантаження;
- втрати на тертя (механічні) і вентиляційні втрати. Ці втрати є постійними для заданої швидкості і не залежать від навантаження;
- втрати від струму збудження або струму намагнічування двигуна;
- втрати в міді, відомі як втрати I^2R , пропорційні квадрату струму навантаження.

Втрати в сталі складаються з втрат на гістерезис, що залежать від фізичних характеристик використовуваної сталі, і втрат на вихрові струми, які визначаються конструкцією і складанням сталевих пластин. Втрати в сталі впливають на коефіцієнт потужності електродвигуна, оскільки їх виникнення пов'язане зі споживанням реактивного струму. При низькому навантаженні основну роль грають втрати в сталі, які обумовлюють низькі значення коефіцієнта потужності електродвигуна. Навіть при повному навантаженні асинхронний двигун має порівняно невисокий коефіцієнт потужності індуктивного характеру і становить 0,8-0,9. Щоб звести до мінімуму можливе зниження ККД і коефіцієнта потужності, необхідно, щоб номінальна потужність електродвигуна була по можливості ближче до існуючого навантаження двигуна.

Економічність роботи електропривода у будь-якому режимі характеризується коефіцієнтом корисної дії (ККД) – відношенням виконаної механічної роботи до кількості спожитої за цей час електроенергії:

$$\eta_{ц} = \frac{A_{мех}}{A_{ен}} = \frac{\int_0^{T_{ц}} M_{м}(t) \omega_{м}(t) dt}{\int_0^{T_{ц}} P dt},$$

де $\eta_{ц}$ – цикловий ККД електропривода; $T_{ц}$ – тривалість робочого циклу, год; $A_{мех}$, $A_{ен}$ – корисна механічна робота і спожита з мережі електрична енергія, Дж; $M_{м}$ – момент на валу робочої машини, Н·м; ω – кутова швидкість приводного вала робочої машини, с⁻¹; P – потужність, споживана електроприводом з мережі, Вт.

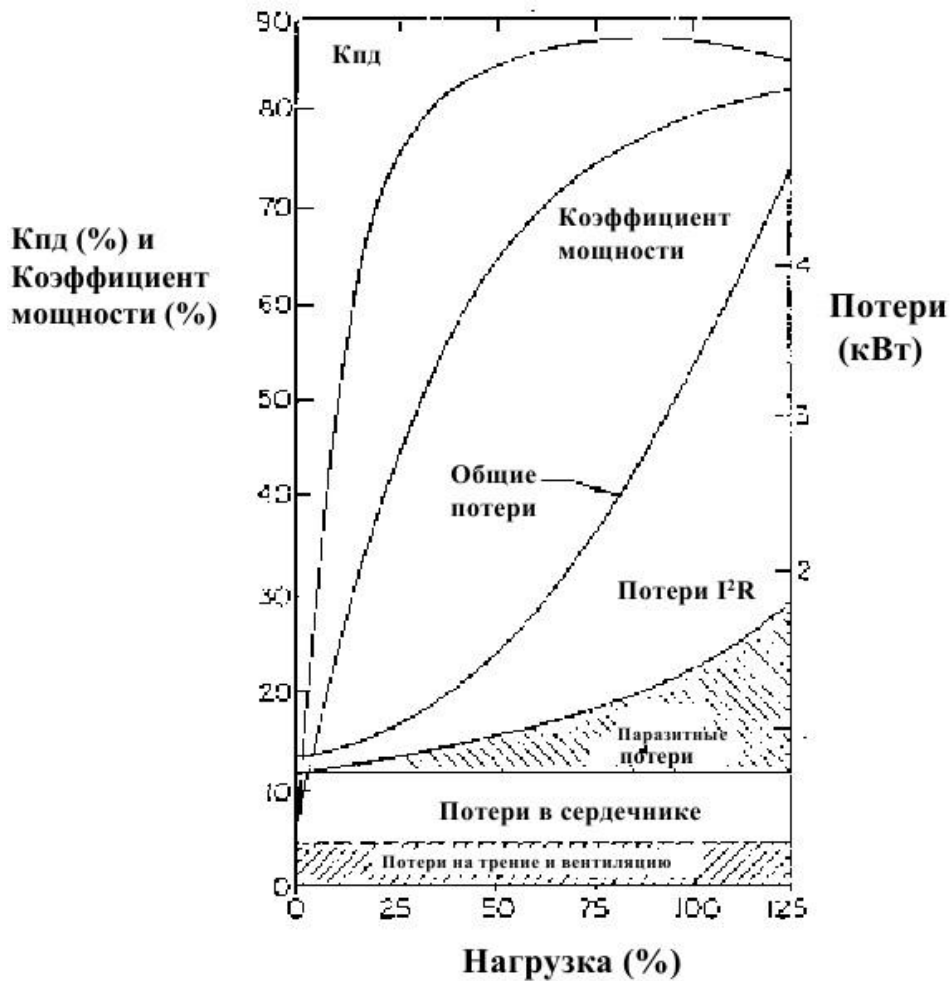


Рис. 4.1. Втрати потужності в електродвигунах

Якщо відомі значення ККД перетворювача електроенергії $\eta_{п.ел.}$, двигуна $\eta_{дв}$ і механічних передач $\eta_{мех.}$, то ККД електропривода

$$\eta = \eta_{п.ел.} \eta_{дв} \eta_{мех.}$$

Економічність споживання електроенергії з мережі характеризується коефіцієнтом потужності, який є відношенням активної потужності P до повної S :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Електропривод змінного струму споживає з мережі активну P і реактивну Q потужності. Активна потужність витрачається на здійснення електроприводом корисної роботи та покриття втрат в ньому, а реактивна потужність забезпечує створення електромагнітних полів

двигуна і безпосередньо корисної роботи не виробляє. Коефіцієнт потужності електроприводу характеризує його як споживача електроенергії.

Кут ϕ визначає зсув фаз між напругою мережі і струмом електроприводу. Електропривод, споживаючи реактивну потужність, додатково навантажує систему електропостачання, викликаючи додаткові втрати напруги та енергії в її елементах.

Для більшості асинхронних двигунів $\cos\phi_n \approx 0,8 \div 0,9$. Для цих значень $Q = (0,5 \div 0,75) P$, тобто асинхронний двигун на кожен кіловат активної потужності споживає з мережі 0,5...0,75 квар реактивної потужності. Чим нижче $\cos\phi$, тим більшу реактивну потужність споживає асинхронний двигун з мережі, завантажуючи її додатковим струмом і викликаючи в ній додаткові втрати.

4.2. Рівняння нагрівання і охолодження електродвигуна

Усі види втрат потужності в двигуні перетворюються в теплоту, що частково віддається в навколишнє середовище, а частково йде на нагрівання двигуна. Якщо умовно вважати, що нагрівання відбувається рівномірно по усьому об'єму двигуна, а теплота однаково розсіюється по усій його поверхні, то рівняння теплового балансу

$$Qdt = G_{дв}cd\tau + S\lambda tdt,$$

де Qdt - кількість теплоти, яка виділяється у двигуні за час dt ; $G_{дв}cd\tau$ — кількість теплоти, витраченої на нагрівання двигуна; $G_{дв}$ — маса двигуна; c - питома теплоємність, яка визначає кількість теплоти, необхідної для нагрівання 1 кг речовини на 1°C ; t — перевищення температури двигуна над температурою q_1 навколишнього середовища; $S\lambda tdt$ — кількість теплоти, яка розсіюється з поверхні двигуна в навколишнє середовище; S — площа поверхні двигуна, з якої розсіюється теплота; λ — коефіцієнт теплового розсіювання, який представляє собою кількість теплоти, яка розсіюється з одиниці поверхні в 1 с при перевищенні температури на 1°C .

В початковий період роботи двигун має температуру, яка практично не відрізняється від навколишнього середовища, тобто $t \gg 0$. В цьому випадку $S\lambda tdt \gg 0$ і вся теплота, яка виділилася в двигуні, йде на підвищення його температури. В міру підвищення температури двигуна, кількість теплоти, яка розсіюється в навколишнє середовище, збільшується. Коли перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища досягне $t_{уст} = q_{уст} - q_1$, де $q_{уст}$ — установлена температура двигуна, то все тепло, що виділяється в двигуні, буде розсіюватися в навколишнє середовище. При цьому

подальше підвищення температури двигуна припиниться, $dt = 0$ і настає режим теплової рівноваги.

$$Qdt = S\lambda\tau_{уст}dt$$

З формули випливає, що $t_{уст}$ не залежить від маси двигуна, а визначається кількістю теплоти, виділеної у двигуні за одиницю часу, площею охолодження і коефіцієнтом теплового розсіювання λ .

Залежність перевищення температури двигуна t над температурою навколишнього середовища від часу t виражається рівнянням

$$\tau = \tau_{уст} (1 - e^{-t/T_H}),$$

де $e = 2,718$ — основа натуральних логарифмів; T_H — постійна часу нагрівання.

Крива нагрівання (рис. 4.2) показує, що електродвигун досягає сталої температури тільки по закінченню тривалого часу. Провівши дотичну до кривої нагрівання, у її початковій частині одержимо відрізок, рівний у масштабі температур постійної нагрівання T_H , що являє собою час, за який двигун нагрівається до температури, рівної $0,632 t_{уст}$. Якщо припиниться нагрівання двигуна, наприклад при відключенні двигуна від мережі, то рівняння теплового балансу запишемо у наступному вигляді:

$$-G_{дв}cdt = S\lambda\tau dt,$$

тобто, випромінювання теплоти з поверхні двигуна відбувається за рахунок накопиченої в ньому теплоти, тому двигун починає охолоджуватися.

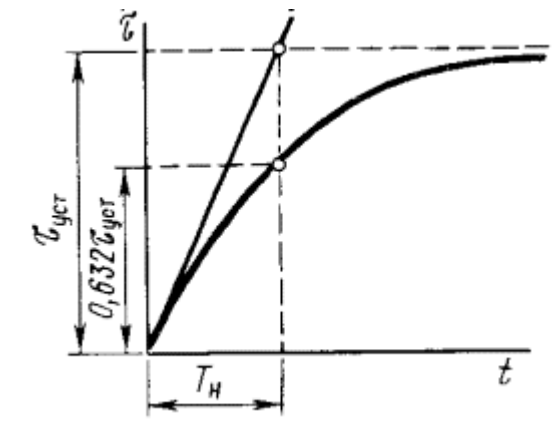


Рис. 4.2. Графік нагрівання електродвигуна

Зміна температури в процесі охолодження двигуна відбувається відповідно формули

$$\tau = \tau_{уст} e^{-t/\Gamma_H},$$

Аналогічні міркування можна провести у випадку охолодження двигуна.

4.3. Класифікація номінальних режимів роботи електродвигунів

Існує три основні номінальних режими роботи двигуна (рис. 4.3), що відрізняються характером зміни навантаження:

1) тривалий номінальний режим — режим роботи при незмінному номінальному навантаженні $P_{ном}$, що продовжується стільки часу, що температура нагрівання усіх частин машини досягає сталих значень. Навантажувальна діаграма тривалого номінального режиму показана на рис. 4.3,а. Умовне позначення режиму S1;

2) короткочасний номінальний режим — режим роботи, при якому періоди незмінного номінального навантаження чергуються з періодами відключення двигуна. При цьому періоди навантаження двигуна t_n настільки короткочасні, що температури усіх частин двигуна не досягають сталих значень, а періоди відключення двигуна настільки тривалі, що усі частини двигуна встигають охолонути до температури навколишнього середовища (рис. 4.3,б). Умовне позначення режиму S2;

3) повторювально-короткочасний номінальний режим — режим роботи, при якому короткочасні періоди номінального навантаження двигуна t_n чергуються з періодами відключення двигуна (паузами) t_p , причому за період навантаження перевищення температури усіх частин не встигає досягти сталих значень, а за час паузи частини двигуна не встигають охолонути до температури навколишнього середовища. Загальний час роботи двигуна в повторювально-короткочасному режимі розділяється на періодично повторювані цикли $t_{ци} = t_n + t_p$. Умовне позначення режиму S3. При повторювально-короткочасному режимі роботи двигуна графік його нагрівання має вигляд пилкоподібної кривої (рис. 4.3, в). При досягненні двигуном сталих значень температури відповідному повторювально-короткочасному режиму, $t_{уст.к.}$ температура перегрівання двигуна продовжує коливатися від t_{min} до t_{max} , при цьому вона менша установленної температури перегріву при номінальному тривалому режимі роботи $t_{уст.}$

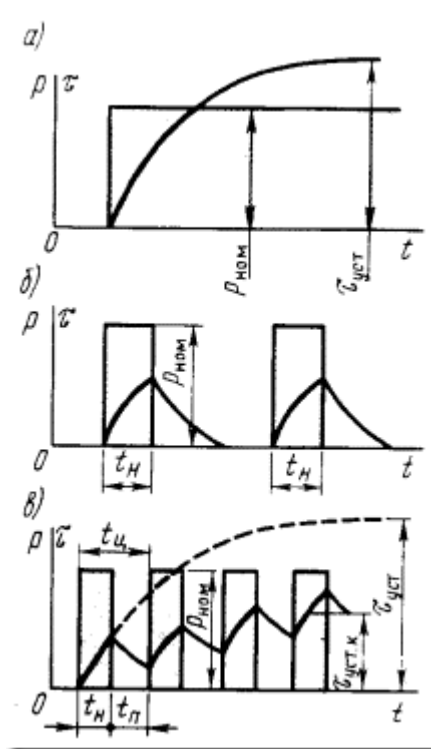


Рис. 4.3. Навантажувальні діаграми електродвигунів при тривалому (а), короткочасному (б) і повторювально-короткочасному (в) номінальних режимах

Повторювально-короткочасний режим характеризується відносною тривалістю включення, %:

$$ПВ = (t_n / t_u) 100.$$

Передбачені номінальні повторювально-короткочасні режими з ПВ 15, 25, 40, 60%. Для тривалого режиму ПВ - 100%.

Оскільки при номінальних короткочасному і повторювально-короткочасному режимах температура перегріву двигуна нижча, ніж при номінальному тривалому режимі, то при переході двигуна з тривалого в повторювально-короткочасний режим роботи корисна потужність двигуна може бути збільшена при ПВ = 60% на 30%, при ПВ = 40% на 60%, при ПВ = 25% у два рази, при ПВ = 15% у 2,6 рази.

4.4. Методи визначення потужності

Попередній вибір потужності двигуна в електроприводі виконується або за допомогою інформації про встановлені потужності на аналогічних механізмах, або за заданою або розрахованою навантажувальною діаграмою, сталою швидкістю і коефіцієнтом динамічності, що враховує нагрів двигуна в пуско-гальмівних режимах.

Номінальна потужність (P_n) двигуна при попередньому виборі визначається за співвідношенням:

$$P_H = K_D \cdot M_{CP} \cdot \omega_H \cdot 10^{-3},$$

де M_{CP} - середній статичний момент за цикл роботи електропривода, який визначається по навантажувальній діаграмі:

$$M_{CP} = \frac{\sum_0^{t_{ц}} M_i t_i}{t_{ц}},$$

K_D - коефіцієнт динамічності.

Перевірка обраної потужності двигуна по нагріванню для всіх режимів, окрім режиму S1, проводиться методом послідовних наближень, при виконанні яких треба підібрати потужність двигуна і його завантаження, що забезпечує використання вибраного обладнання по нагріванню на 85-90%.

Контрольні питання:

1. Поясніть поняття ККД і коефіцієнту потужності.
2. Перерахуйте види втрат у електричних двигунах і дайте їх характеристики.
3. Поясніть явище нагріву електродвигунів, викладіть основні характеристики.
4. Дайте характеристику основних номінальних режимів роботи електродвигунів.
5. Викладіть принципи вибору потужності двигуна електроприводу.

Лекція 5. Апарати керування та захисту електроприводів

План:

- 5.1. Апарати ручного і автоматичного керування.
- 5.2. Призначення і характеристики апаратів захисту.
- 5.3. Вибір апаратів захисту.

5.1. Апарати ручного і автоматичного керування

Розрізняють ручну і автоматичну апаратуру управління.

До апаратурі ручного управління відносять рубильники, пакетні вимикачі, контролери, кнопки управління, автоматичні вимикачі, тумблери і т.і.

Рубильник - найпростіший силовий комутаційний апарат, призначений для нечастого замикання і розмикання силових

електричних ланцюгів двигунів постійного і змінного струму напругою до 500 В і струмом до 5000 А. Розрізняються за величиною комутуючого струму, кількістю полюсів, видом приводу рукоятки і числу її положень.

Пакетні вимикачі - різновид рубильників, характеризують тим, що їх контактна система набирається з окремих пакетів по числу полюсів. Пакет складається з ізолятора, в пазах якого знаходиться нерухомий контакт з гвинтовими зажимами для підключення проводів і пружинний рухливий контакт з пристроєм іскрогасіння.

Промисловість випускає пакетні вимикачі типу ПВМ, ППМ, ПУ, УП, ОКП, ПВП, призначені для комутації електричних ланцюгів постійного струму напругою до 220 В і струмами до 400 А і змінного струму до 250 А при напрузі до 380 В.

Контролери - багатопозиційні електричні апарати з ручним або ножним приводом для безпосередньої комутації силових ланцюгів двигунів постійного і змінного струму з числом позицій до 6.

Кнопки управління - апарати, призначені для подачі оператором управляючої дії на електропривод. Дві, три і більше кнопок, змонтовані в одному корпусі, утворюють кнопку станцію. Особливістю кнопок управління є їх здатність повертатися у вихідне положення після зняття дії.

Автоматичний вимикач (автомат) - апарат для замикання і розмикання електричного кола, що перебуває під навантаженням, і для автоматичного відключення його при ненормальних і аварійних режимах - перевантаженнях, коротких замиканнях, надмірному зниженні напруги живлення.

Автомат може включатися вручну або дистанційно за допомогою електромеханічного приводу.

Параметрами автоматів є номінальний тривалий струм, номінальна напруга, граничний струм відключення, установки спрацьовування по напрузі і струму.

Ручна апаратура управління конструктивно простіше, дешевше автоматичної, досить надійна, але не дозволяє автоматизувати виробництво, до того ж допускає "самопуск", тобто при невимкненому апараті після появи електроенергії відбувається пуск підключених до цього апарату електроустановок.

Автоматична апаратура управління приводиться в дію від електричних сигналів (команд), що подаються різними реле, датчиками і командними апаратами, на які може впливати оператор. В основі схем управління лежить магнітний пускач.

Магнітні пускачі складаються з контактора КМ, кнопкової станції з двома або трьома кнопками SB і тепловим реле КК.

Контактор призначений для приватних перемикачів електричного ланцюга і складається з контактної, електромагнітної, дугогасильної систем і блок - контактів.

Теплове реле захищає електродвигун від перевантажень неприпустимої тривалості.

Кнопкова станція призначена для керування включенням і відключенням двигуна.

5.2. Призначення і характеристики апаратів захисту

Для забезпечення надійної роботи електроприводу і технологічного обладнання в схемах управління передбачається спеціальна захисна апаратура.

При роботі електропривода може статися замикання електричних ланцюгів між собою або на землю (корпус). Для захисту електрообладнання та мережі живлення від неприпустимо великих струмів, які з'являються в цих випадках, передбачають різний захист, який реалізується різними засобами.

Плавкі запобіжники.

Основними елементами є плавка вставка і дугогасильний пристрій.

Для захисту електричних ланцюгів електроустаткування при напрузі до 1000 В застосовують такі типи запобіжників: ПР2 - трубчасті без наповнювача; ПН2 - трубчасті з закритим розбірним патроном і наповнювачем; НПН - із закритим нерозбірним патроном і заповненням кварцовим піском; ПНБ-5 - швидкодіючі; ППЗ1 - з високою розривною здатністю; ПРС - різьбові. Плавкі вставки цих запобіжників калібрують на струми від 6 до 1000 А.

Автоматичні вимикачі (автомати) - комплексні багатоцільові апарати, що забезпечують як ручне включення і відключення двигунів, так і їх захист від надструмів і перевантажень.

Автомат має контактну систему, замикання і розмикання якою здійснюється вручну за допомогою кнопок або рукоятки; максимальне струмове реле; теплове струмове реле (рис. 5.1).

Коли рукоятка 8, укріплена на важелі 5, повернена навколо осі А в положення "Включено", розтягнута пружина 6 утримує важелі 4 і 10 в положенні, зазначеному на рис. 5.1. При цьому важіль 4 через шарнір С тисне на планку 3, скріплену з замикаючою пластиною 1, і утримує її при включеному положенні. Струм навантаження при цьому протікає через контакти 2 автомату, замкнені пластиною Т, нагрівач теплового реле 14, котушку 13 реле максимального струму.

Якщо рукоятку 8 повернути в положення "Відключено", то під дією розтягнутої пружини 6 шарнір В переміститься вниз, а важелі 4 і 10 обернуться навколо шарнірів С і Е. Робочі контакти 2 розмикаються. При цьому розмикання і замикання контактів відбувається майже

миттєво за рахунок дії розтягнутої пружини 6 і не залежить від швидкості повороту рукоятки 8.

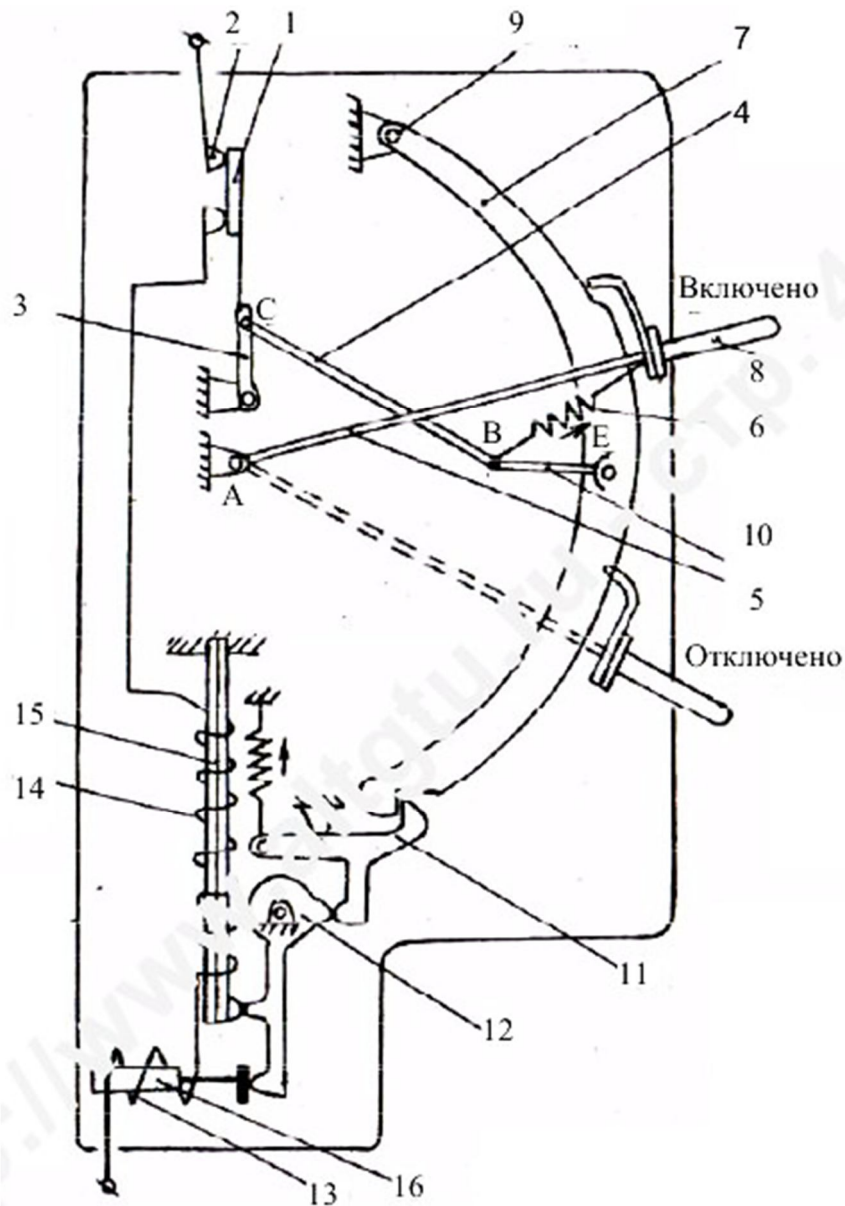


Рис. 5.1. Автоматичний вимикач

Відключення автомата відбувається і при перевантаженні ланцюга, коли струм в ньому більше номінального. Струм, що протікає через нагрівач 14, викликає нагрівання біметалічної пластини 15, яка повертається вправо. При цьому валик 12 повертається, і засувка 11, притиснута пружиною до виступу валика, звільняє скобу 7, що повертається навколо осі 9. Скоба і шарнір Е зміщуються вправо. Під дією пружини 6 шарнір В зміщується вгору і контакти розмикаються (замикальна пластина йде вправо).

При короткому замиканні, коли струм ланцюга багаторазово перевищує номінальний, автомат також відключається. Струм, що тече

через котушку 13 максимального реле, втягує осердя 16, яке тисне на валик 12, повертає його і в підсумку контакти ланцюга 2 розмикаються через відхід замикальної пластини I вправо.

5.3. Вибір апаратів захисту

Вибір плавкої вставки запобіжників проводиться за струмом, який розраховується таким чином, щоб при пуску двигунів вона не перегорала від пускового струму двигуна.

Для асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором при часі пуску до 5 с

$$I_{пв} \geq I_{пуск} / 2,5 ,$$

а при часі пуску більше 5 с

$$I_{пв} = I_{пуск} / (1,6-2).$$

Для асинхронних двигунів з фазним ротором і двигунів постійного струму струм плавкої вставки розраховується по відношенню до номінального струму, оскільки ці двигуни пускаються за допомогою пускових реостатів, що обмежують пускові струми

$$I_{пв} = (1-1,25) I_{ном}$$

Для захисту ланцюгів управління струм плавкої вставки вибирається з умови

$$I_{пв} = 2,5 I_{\Sigma}$$

де I_{Σ} - сумарний струм котушок максимальної кількості одночасно включених апаратів в схемі управління.

Контрольні питання:

1. Поясніть відмінності апаратів ручного і автоматичного керування.
2. Дайте характеристику апаратів ручного керування.
3. Дайте характеристику апаратів автоматичного керування.
4. Дайте характеристику основних апаратів захисту.
5. Розкажіть принцип дії автоматичного вимикача.
6. Як проводять вибір апаратів захисту?

Лекція 6. Основні поняття автоматики і принципи автоматичного керування

План:

- 6.1. Основні визначення і види автоматизації.
- 6.2. Ручне, автоматизоване і автоматичне управління.
- 6.3. Структурні схеми управління.
- 6.4. Класифікація автоматичних систем управління.

6.1. Основні визначення і види автоматизації

Залежно від функцій, які виконують спеціальні автоматичні пристрої, розрізняють такі основні види автоматизації: автоматичний контроль, автоматичний захист, дистанційне і автоматичне керування, телемеханічне управління.

Автоматичний контроль включає в себе автоматичні сигналізацію, вимір, сортування та збір інформації.

Автоматична сигналізація призначена для сповіщення обслуговуючого персоналу про граничні або аварійні значення фізичних параметрів, місце і характер порушень технологічних процесів (ТП). Сигнальними пристроями служать лампи, дзвінки, сирени, спеціальні мнемонічні покажчики та інші світлові і звукові пристрої.

Автоматичне вимірювання служить для вимірювання та передачі на спеціальні вказівні або реєструючі прилади значень фізичних величин, що характеризують ТП або роботу машин. Обслуговуючий персонал за показниками приладів судить про якість ТП та режим роботи машин і агрегатів.

Автоматичне сортування призначене для контролю і розділення продукції за розміром, масою, твердістю, в'язкістю і іншими показниками (наприклад, сортування зерна, яєць, фруктів, картоплі тощо).

Автоматичний збір інформації необхідний для отримання інформації про хід ТП, якість і кількість продукції, що випускається, і для подальшої обробки, зберігання та видачі інформації обслуговуючому персоналу.

Автоматичний захист являє собою сукупність технічних засобів, які при виникненні ненормальних чи аварійних режимів або припиняють контрольований виробничий процес (наприклад, відключають певні ділянки електроустановки при виникненні на них коротких замикань), або автоматично усувають ненормальні режими. Автоматичний захист тісно пов'язаний з автоматичним управлінням і сигналізацією. Він впливає на органи управління і оповіщає обслуговуючий персонал про здійснену операцію.

Автоматичний захист, виконаний на основі реле, отримав назву релейного. Його застосовують на електричних станціях, підстанціях, в електричних мережах і різних електроустановках.

Пристрої автоблокування, які входять в автоматичний захист, в основному призначені для запобігання невірних включень і відключень і помилкових дій обслуговуючого персоналу; вони попереджають можливі пошкодження і аварії.

Об'єктом управління (ОУ) або керованим об'єктом називають окрему сукупність елементів, в якій технологічні процеси піддаються цілеспрямованим впливам. До такої сукупності відносять поле, теплицю, сховище продукції, трактор, комбайн, рослину, тварину і т. п.

Об'єкт управління та спеціальний керуючий пристрій в цій сукупності утворюють автоматичну систему управління (СУ). Різновидом останньої є автоматична система регулювання, яку використовують для автоматичної підтримки будь-яких параметрів в об'єкті на заданому рівні або зміни їх за певним законом. Автоматичне регулювання здійснюється керуючим пристроєм, який називають автоматичним регулятором.

Якщо цілеспрямований вплив здійснює людина, то таке управління називають ручним.

Дистанційне керування об'єднує в собі методи і технічні засоби управління установками і різними об'єктами на відстані. Імпульси на управління (команди) подаються обслуговуючим персоналом по лініях зв'язку за допомогою відповідних кнопок, ключів та іншої командної апаратури.

Телемеханіка - область науки і техніки, що охоплює теорію і технічні засоби автоматичної передачі на відстань команд управління та отримання інформації про стан ОУ. Телемеханічні системи дозволяють об'єднати в один ТП роботу великої кількості машин і установок, розташованих одна від одної на значній відстані.

Залежно від призначення їх прийнято розділяти на системи телесигналізації, телевимірювання і телекерування.

Усі розглянуті раніше поняття і системи автоматизації об'єднують в науково-технічний напрям, який отримав назву технічної кібернетики.

Кібернетика - наука про управління складними системами і процесами, що вивчає загальні математичні закони управління об'єктами різної природи.

У перекладі з давньогрецької слово «кібернетас» означає керуючий, рульовий, керманіч. Американський математик Н. Вінер надав цьому терміну новий, сучасний зміст, назвавши кібернетикою науку, що вивчає закони управління процесами, що відбуваються в живих організмах і машинах. В наш час кібернетика вивчає загальні закономірності процесів, які відбуваються в техніці, промисловості, живій природі,

людському суспільстві, і забезпечує створення систем оптимального управління цими процесами в оптимальному варіанті. Сфера дії кібернетики надзвичайно обширна. Вона охоплює питання управління машинами і системами машин, виробничими процесами та організованою діяльністю людей, фізіологічними, біохімічними і біофізичними процесами.

6.2. Ручне, автоматизоване і автоматичне управління

Залежно від ступеня автоматизації розрізняють ручне, автоматизоване і автоматичне управління. При ручному управлінні всі функції управління виконує людина-оператор. При автоматизованому управлінні частину функцій виконує людина, а іншу частину - автоматичні пристрої. При автоматичному управлінні всі функції управління виконують автоматичні пристрої. У відповідності з цими поняттями прийнято розділяти системи управління на автоматизовані і автоматичні.

У сучасній автоматизованій системі управління поділяють на автоматизовані системи управління виробництвом (АСУВ) і автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ ТП).

АСУВ - це людино-машинна система, що забезпечує автоматизований збір, обробку та зберігання інформації, необхідної для оптимізації управління в різних сферах, головним чином в організаційно-економічній діяльності людини, наприклад управління господарсько-плановою діяльністю галузі, підприємства, комплексу, територіального регіону, тобто управління системою сільськогосподарських підрозділів.

Автоматизована СУ ТП - це теж людино-машинна система, що забезпечує автоматизований збір, зберігання та обробку інформації про хід протікання ТП, а також видачу керуючих впливів на ТП відповідно до прийнятого критерія управління. Зазвичай АСУ ТП охоплює окремі цехи, тваринницькі та птахівницькі ферми, сховища, господарства в цілому. АСУ ТП допомагає диспетчеру і керівнику підприємства оперативно знаходити рішення з оптимального керування виробничим процесом, спираючись на показники окремих технологічних операцій.

Автоматична СУ ТП являє собою сукупність автоматичних керуючих пристроїв і ОУ, які взаємодіють без безпосередньої участі людини.

За ступенем автоматичного управління виробничими ТП розрізняють часткову, комплексну і повну автоматизацію.

Часткова автоматизація поширюється тільки на окремі виробничі операції або установки. Вона не звільняє людину від участі у

виробничому процесі, але істотно полегшує його працю. Прикладом може служити дистанційне керування електроприводами.

Комплексна автоматизація ТП означає автоматичне виконання всього комплексу операцій і установок з обробки матеріалів та їх транспортування за заздалегідь заданими програмами за допомогою різних автоматичних пристроїв, що входять в загальну систему управління. У цьому випадку функції людини зводяться до спостереження за ходом процесу, його аналізу і зміни режиму роботи автоматичних пристроїв з метою досягнення найкращих техніко-економічних показників. Як приклад можна привести управління післязбиральним очищенням і сушінням зерна, управління коморприготувальними агрегатами.

Повна автоматизація на відміну від комплексної покладає виконання функцій вибору і узгодження режимів роботи окремих машин і агрегатів (як при нормальному режимі, так і в аварійних ситуаціях) не на людину, а на спеціальні автоматичні пристрої. У цьому випадку всі основні і допоміжні установки здатні працювати в автоматичному режимі протягом тривалого періоду без безпосередньої участі людини. За обслуговуючим персоналом залишаються функції періодичного огляду, профілактичного ремонту і перебудови всієї системи на нові режими роботи.

6.3. Структурні схеми управління

Метою управління ТП може бути: стабілізація деякої фізичної величини, зміна її за заданою програмою або, в більш складних випадках, оптимізація деякого узагальнюючого критерію: найбільша продуктивність процесу, найменша собівартість продукту і т. д.

У самому простому випадку (рис. 6.1, а) управління ТП здійснюється оператором 3, який на підставі свого досвіду і орієнтуючись за показаннями контрольно-вимірювальних приладів 2 оцінює хід процесу по вихідних параметрах $Y(t)$ і вживає заходи впливу $X(t)$ з метою усунення впливу зовнішніх збурень $X_v(t)$, які діють на об'єкт управління 1. Зазвичай результати ТП в цьому випадку залежать від кваліфікації оператора.

Структурні схеми автоматичних СУ представляють у вигляді ланцюжка елементів, кожен з яких схильний до дії одного або декількох вхідних впливів, в результаті чого змінюються вихідні параметри цього елемента.

Зазвичай елементи мають детектуючі властивості, коли вихідні величини не впливають на вхідні. Але можливі також випадки, коли вихідні параметри впливають на вхідні. Це має місце в тому випадку, коли елемент охоплений зворотним зв'язком, або якщо така фізична сутність процесів, які протікають в об'єкті.

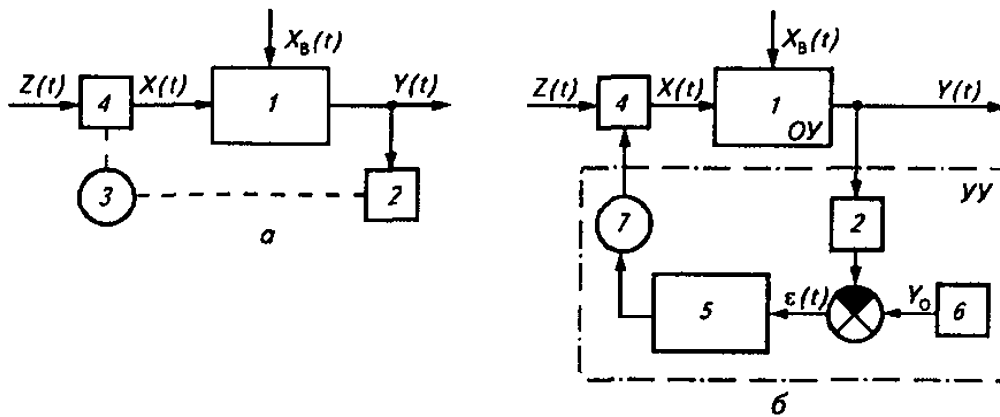


Рис. 6.1. Структурні схеми систем ручного (а) і автоматичного (б) управління:

- 1 - об'єкт управління; 2 – вимірювальний прилад; 3 - оператор; 4 - регулюючий орган; 5 - керуючий елемент; 6 - задатчик; 7 - виконавчий механізм

Структурні схеми автоматичних СУ (рис. 6.1, б) в простому випадку включають в себе два елементи: об'єкт 1 управління (спільно з регулюючим органом 4) і керуючий пристрій УУ (на малюнку обведено пунктиром). У схему УУ входять вимірювальний перетворювач (датчик) 2, що вимірює регульовану величину і перетворює її в певний сигнал певної фізичної природи (електричної, механічної та ін.); задатчик 6; керуючий елемент 5, який підсилює і перетворює відхилення керованої величини $Y(t)$ від заданого значення Y_0 відповідно до закладеного в нього алгоритмом; виконавчий механізм 7, керуючого елемента 5, який виконує команду по зміні положення регулюючого органу 4, що здійснює управління витратою речовини або енергії в ОУ.

На вхід керуючого елемента (регулятора) 5 подається сигнал, за значенням рівний різниці $\varepsilon(t)$ поточного значення керованої величини $Y(t)$ і її заданого значення Y_0 . Керована величина $Y(t)$ знаходиться під дією одного або декількох збуджуючих впливів, частина яких може контролюватися.

6.4. Класифікація автоматичних систем управління

Класифікація автоматичних СУ можлива за різними ознаками. Перша з ознак - призначення інформації, відповідно до якої автоматичні СУ ділять на замкнені і розімкнені.

Замкнені системи використовують поточну інформацію про вихідні величини, визначають відхилення $\varepsilon(t)$ керованої величини $Y(t)$ від її заданого значення Y_0 і приймають дії до зменшення або повного виключення $\varepsilon(t)$. Найпростішим прикладом замкненої системи, системи регулювання по відхиленню, служить показана на рис. 6.2, а система

стабілізації рівня води в баку. Система складається з вимірювального перетворювача (датчика) рівня 2, пристрою управління (регулятора) 1 і виконавчого механізму 3, який керує положенням регулюючого органу (клапану) 5.

Ознака замкненої системи, яка діє на відхилення регулюємої величини, - зворотний зв'язок з виходу ОУ на його вхід. Замкнені системи цього типу компенсують будь-які обурення, оскільки регулятор контролює тільки відхилення регульованої величини незалежно від причини, яка його викликала. Вони не можуть забезпечити рівність вихідної величини $Y(t)$ заданому значенню Y_0 протягом усього часу управління t , оскільки їх принцип роботи пов'язаний з наявністю відхилення $\varepsilon(t) = Y(t) - Y_0$.

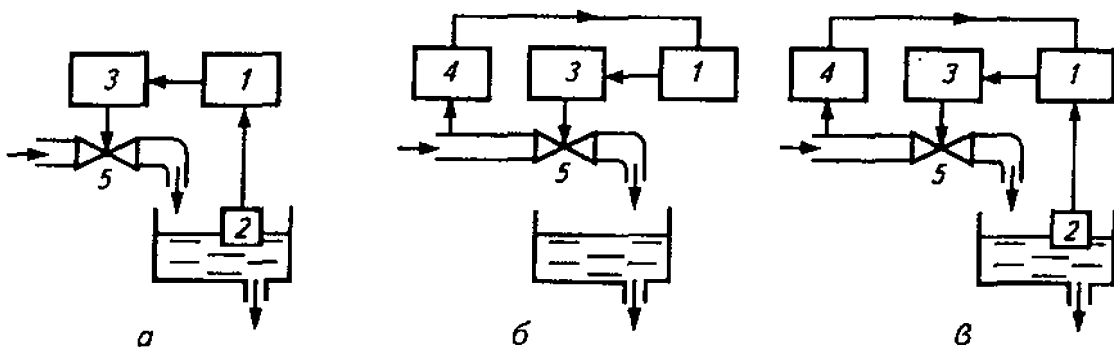


Рис. 6.2. Функціональні схеми автоматичних СУ з управлінням по відхиленню (а), по обуренню (б) і комбіновані (в):

1 - регулятор; 2, 4 - вимірювальні перетворювачі рівня та тиску води, 3 - виконавчий механізм; 5 - регулюючий орган

Розімкнені автоматичні СУ підрозділяють на системи з жорсткою програмою і з управлінням по збуренню. Приклад систем першого типу - система автоматичного пуску і зупинки комплексу машин, що входять в технологічну лінію, в якій повинна витримуватися певна послідовність (програма) роботи окремих механізмів, при цьому зворотний зв'язок з виходу об'єкта на його вхід відсутній.

У розімкнених автоматичних СУ, діючих за збуренням, управління здійснюється на підставі інформації про вхідні (збурюючі) впливи. У показаній на рис. 6.2, б системі таким обуренням є зміна тиску води в трубопроводі.

У реальних системах можлива компенсація одного або декількох збурень, які піддаються вимірюванню. Якщо таких збурень декілька, то для компенсації кожного з них необхідний свій контур регулювання. При цьому завжди залишиться частина збурень, в тому числі випадкових і неконтрольованих, які можуть викликати відхилення регульованої величини $Y(t)$ від заданої Y_0 .

Вихід з цього - поєднання обох принципів управління (по обуренню і відхиленню). Таку систему називають комбінованою (рис. 6.2, в), і її перевага в порівнянні з системою, що діє за відхиленням, в кращій стабілізації регульованої величини.

Стабілізуючі системи підтримують керовану величину на заданому рівні, програмні - змінюють керовану величину за заданою програмою і стежать - забезпечують вимір керованої величини в певному співвідношенні до задаючого впливу. У захищеному ґрунті приклад стабілізуючої СУ - система регулювання температури ґрунту, програмної СУ - система управління температурою в залежності від часу доби, стежачої СУ - те ж, але залежно від рівня природної освітленості.

За методом керування автоматичні СУ ділять на ті, що пристосовуються (адаптивні) і не пристосовуються до мінливих умов роботи ОУ.

Автоматичні СУ, які пристосовуються, або адаптивні цілеспрямовано змінюють алгоритми управління або параметри керуючих впливів для досягнення найкращого управління об'єктом. Оскільки в процесі роботи таких систем відбувається зміна їх алгоритмів і (або) структура, то їх називають також самоналаштуванням. Окремий випадок систем, які пристосовуються - екстремальні, завдання яких - автоматичний пошук максимуму або мінімуму керованої величини.

Наступна ознака класифікації пов'язана з результатом роботи системи в сталому стані. Відповідно до неї автоматичні СУ ділять на статичні і астатичні.

В статичних системах по закінченні перехідного процесу існує різниця між заданим і сталим значеннями керованої величини, яку називають статичної помилкою. Статична помилка $\Delta Y_{ст}$ - неодмінна ознака таких систем, причому величина її залежить як від величини збурення, так і від параметрів настройки регулятора.

В астатичних системах керована величина по закінченні перехідного процесу дорівнює заданому значенню. Можливе відхилення (помилка управління), властиве реальним системам автоматики, обумовлено недосконалістю їх елементів.

За характером зміни керуючих впливів у часі автоматичні СУ ділять на безперервні і переривчасті, або дискретні.

У безперервних системах керована величина і керуючий вплив - безперервні функції часу.

Переривчасті автоматичні СУ підрозділяють на релейні, імпульсні і цифрові.

У релейних (позиційних) системах один з елементів, зазвичай це керуючий пристрій (КП), має істотно нелінійну (релейну) характеристику, відповідно до якої керуючий вплив змінюється стрибкоподібно при певному значенні керованої величини. Така,

наприклад, система управління водонагрівачем, в якій регулятор температури включає електронагрівач при зниженні температури води до значення, яке визначається налаштуванням регулятора.

Імпульсні автоматичні СУ мають у своєму складі ланку, яка перетворює керовану величину в дискретну імпульсну. При цьому амплітуда або тривалість імпульсів пропорційна керованій величині.

У цифрових системах формування керуючих впливів здійснюється цифровими обчислювальними пристроями, які оперують не безперервними сигналами, а дискретними числовими послідовностями.

Наступна ознака класифікації - число керованих величин. Відповідно до цієї ознаки автоматичні СУ ділять на одномірні і багатовимірні. Одномірні мають по одній вхідній і вихідній величині, а багатовимірні - по кілька.

По виду диференційного рівняння автоматичні СУ підрозділяють на лінійні та нелінійні. До лінійних відносять системи, поведінка яких описується лінійними диференційними рівняннями. Оскільки систем, абсолютно точно описуваних лінійними диференційними рівняннями, практично не існує, сюди відносять також лінеаризовані системи, описувані лінійними диференційними рівняннями наближено, при деяких припущеннях і обмеженнях. До нелінійних відносять системи, поведінка яких описується нелінійними диференційними рівняннями, причому в системі досить мати всього один нелінійний елемент, щоб вся вона стала нелінійною.

Контрольні питання:

1. Дайте характеристику основних видів автоматизації.
2. Дайте характеристику основних систем керування.
3. Поясніть відмінності між ручним, автоматизованим і автоматичним керуванням.
4. Поясніть відмінності між частковою, комплексною і повною автоматизацією.
5. Поясніть принцип дії структурної схеми системи ручного управління.
6. Поясніть принцип дії структурної схеми системи автоматичного управління.
7. Дайте характеристику замкненої системи автоматичного керування.
8. Дайте характеристику розімкненої системи автоматичного керування.

Лекція 7. Схеми систем автоматизації

План:

- 7.1. Класифікація схем автоматизації.
- 7.2. Класифікація електричних схем.
- 7.3. Структурні та функціональні схеми.
- 7.4. Принципові та монтажні схеми.

7.1. Класифікація схем автоматизації

При розробці схем автоматичного управління і технологічного контролю застосовують різні прилади і засоби автоматизації, що сполучаються з об'єктом управління і між собою по певних схемах. Залежно від використовуваних приладів і засобів автоматизації (електричних, пневматичних, гідравлічних) і лінійного зв'язку в проектах автоматизації розробляють схеми, які розрізняють по видах і типах.

По видах схеми підрозділяють на електричні, пневматичні, гідравлічні і комбіновані.

Найбільшого поширення в практиці автоматизації технологічних процесів набули електричні прилади і засоби автоматизації, що пояснюється великою різноманітністю наявної апаратури і приладів і наявністю на об'єктах джерел електроживлення необхідної потужності і напруги. У зв'язку з цим найбільшого поширення набули електричні схеми. У спеціальних умовах, наприклад в умовах вибухонебезпечних виробництв, в переважній більшості випадків застосовують пневматичні прилади і засоби автоматизації. Це зумовило необхідність виконання великого числа різних пневматичних схем. Через громіздкість гідравлічної апаратури і труднощів передачі гідравлічних командних імпульсів на великі відстані гідравлічні схеми набули невеликого поширення.

У ряді випадків в проектах зустрічаються комбіновані електропневматичні, електропневмогідравлічні, пневмогідравлічні і електрогідравлічні схеми.

По типах схеми автоматизації підрозділяють на структурні, функціональні, принципові, монтажні, з'єднань.

Схеми автоматизації, як правило, виконують без дотримання масштабу. У монтажних схемах дотримується дійсне просторове розташування окремих засобів автоматизації і монтажних виробів.

7.2. Класифікація електричних схем

У проектах автоматизації сільськогосподарського виробництва використовують такі електричні схеми: структурні, функціональні, принципові, з'єднань, підключень та ін.

Визначення типу та сфери застосування схем автоматизації показано в табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Характеристики типів схем

Тип схеми	Визначення типу	Сфера застосування
1	2	3
1. Структурна схема	Визначає основні функціональні частини виробу, їх призначення і взаємозв'язок	Розробляються при проектуванні виробів (установок) на стадіях, що є попередніми відносно розробки схем інших типів, використовуються для загального ознайомлення з
2. Функціональна схема	Визначає основні процеси, що протікають в окремих функціональних колах виробу (установки) чи у виробі (установці) в цілому	Використовуються для вивчення принципів роботи виробів (установок), а також при їх налагодженні, контролі і ремонті
3. Принципова (повна) схема	Визначає повний склад елементів і зв'язків між ними, і, як правило, дає детальне уявлення про принципи роботи виробу (установки)	Служать основою для розробки конструкторської документації наприклад схем з'єднань (монтажних). Використовуються для вивчення принципів роботи виробів (установок), а також при їх налагодженні, контролі і ремонті
4. Схема з'єднань (монтажна)	Показує з'єднання складових частин виробу (установки) і визначає проводи, джгути, кабелі, якими здійснюються ці з'єднання, а також місця їх приєднання вводу	Використовуються при розробці конструкторської документації креслень, які визначають прокладання і способи кріплення проводів, джгутів, кабелів у виробі, а також для здійснення приєднань і при контролі, експлуатації і ремонті виробів (установок).

1	2	3
5. Схема підключення	Показує зовнішні електричні зв'язки між вимірювальними пристроями і засобами отримання первинної інформації, щитами і пультами автоматизації	Використовується при розробці конструкторської документації, а також для здійснення підключень виробів і при їх експлуатації.
6. Загальна схема	Визначає складові частини комплексу і з'єднання їх між собою на місці експлуатації	Використовується при ознайомленні з комплексами, а також при їх контролі і експлуатації. За необхідності загальна схема може розроблятися на збиральну одиницю
7. Схема розташування	Визначає відносне розташування складових частин виробу провідів, двигунів, кабелів.	Використовується при розробці конструкторської документації, а також при експлуатації і ремонті виробів (установок)

В конструкторській документації схеми автоматизації кодуються буквами і цифрами в залежності від виду і типу схеми. Коди видів і типів схем автоматизації показано в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2

Коди видів і типів схем автоматизації

Вид схеми	Шифр	Тип схеми	Шифр
Електрична	Е	1. Структурна	1
Гідравлічна	Г	2. Функціональна	2
Пневматична	П	3. Принципова (повна)	3
Кінематична	К	4. З'єднань (монтажна)	4
Оптична	Л	5. Підключення	5
Вакуумна	В	6. Загальна	6
Газова	Х	7. Розташування	7
Автоматизації	А	8. Інші	8
Комбінована	С	9. Об'єднана	9

Схеми автоматизації мають загальні терміни і поняття щодо схем (Додаток до ГОСТ 2.701-76).

Елемент схеми – складова частина схеми, яка виконує певну функцію у виробі і не може бути розділена на частини, які мають

самостійне функціональне призначення (резистор, трансформатор, насос-розподільник, муфта та ін.).

Пристрій – сукупність елементів, що являє собою єдину конструкцію (блок, шафа, механізм). Пристрій може не мати у виробі певного функціонального призначення.

Функціональна група – сукупність елементів, що виконують у виробі певну функцію і не об'єднані в єдину конструкцію.

Функціональна частина – елемент, пристрій, функціональна група.

Функціональне коло – лінія, канал, тракт певного значення (канал звуку, тракт ПВЧ та ін.)

Лінія взаємозв'язку – відрізок лінії, що вказує на наявність зв'язку між функціональними частинами виробу.

Установка – умовне найменування об'єкта в енергетичних спорудах, на який випускається схема, наприклад головні (силові) кола.

7.3. Структурні та функціональні схеми

При розробці систем автоматизації в першу чергу необхідно з'ясувати, з яких місць ті або інші ділянки об'єкту управляються, де розміщені пункти управління, операторські приміщення і який взаємозв'язок між ними, тобто необхідно встановити, яка структура управління об'єктом.

У найзагальнішому вигляді структурна схема системи автоматизації представлена на рис. 7.1. Система автоматизації складається з об'єкту автоматизації і системи управління цим об'єктом. Завдяки певній взаємодії між об'єктом автоматизації і системою управління система автоматизації в цілому забезпечує необхідний результат функціонування об'єкту, що характеризується параметрами y_1, y_2, \dots, y_n . Ці параметри називають вихідними параметрами об'єкта автоматизації.

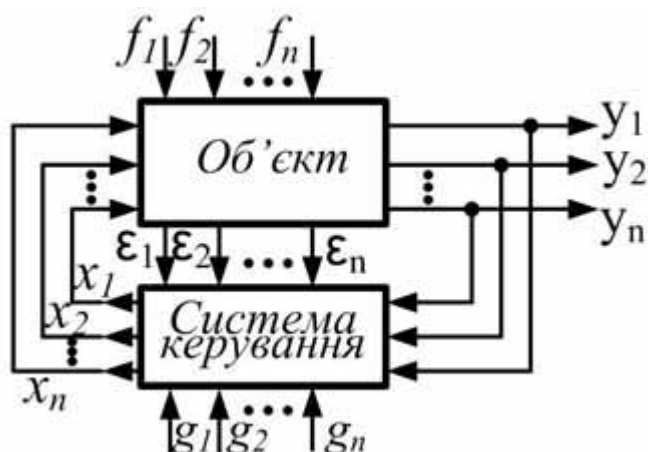


Рис. 7.1. Структурна схема системи автоматизації

До цих параметрів можна віднести як величини, що визначають, наприклад, доцільний кінцевий продукт технологічного процесу, так і окремі параметри, що визначають хід технологічного процесу, його економічність, безаварійну роботу тощо.

Окрім цих основних параметрів, робота об'єктів автоматизації характеризується рядом допоміжних параметрів ($\varepsilon_1, \varepsilon_2 \dots, \varepsilon_n$), які також повинні контролюватися і регулюватися, наприклад підтримуватися постійними. До такого роду параметрів можна віднести, зокрема, величини, що визначають роботу установок підготовки технологічного повітря, технологічної пари насосних станцій оборотного водопостачання тощо.

Від цих установок потрібна тільки подача на вхід технологічної установки початкової сировини і енергоносіїв із заданими параметрами. При цьому необхідне дозування подачі сировини і енергоносіїв здійснюється засобами управління, що відносяться до технологічної установки.

В процесі роботи на об'єкт поступають збурюючі дії f_1, f_2, \dots, f_n , що викликають відхилення параметрів y_1, y_2, \dots, y_n від їх оптимальних значень. Ці дії на об'єкт автоматизації, які є непрогнозованими, називають збуренням.

Інформація про поточні значення $y_1, y_2, \dots, y_n, \varepsilon_1, \varepsilon_2 \dots, \varepsilon_n$ поступає в систему управління і порівнюється з їх заданими значеннями g_1, g_2, g_n , внаслідок чого система управління здійснює керуючий вплив x_1, x_2, \dots, x_n на об'єкт, направлений на компенсацію відхилень вихідних параметрів від їх оптимальних значень. Цей керуючий вплив на об'єкт називають вхідними параметрами об'єкта автоматизації.

Таким чином, об'єкт автоматизації в загальному випадку складається з декількох більшою чи меншою мірою зв'язаних один з одним ділянок управління. Останні фізично можуть представлятися у вигляді окремих установок, агрегатів і так далі або у вигляді локальних каналів управління окремими параметрами одних і тих же установок, агрегатів тощо.

У свою чергу система управління залежно від важливості регульованих параметрів, кола інтересів експлуатаційного персоналу, якому важливо знати їх значення для здійснення оптимального управління об'єктом, в загальному випадку повинна забезпечувати різні рівні управління об'єктом автоматизації, тобто повинна включати декілька пунктів управління, в тому або іншому ступені взаємозв'язаних один з одним.

Як було викладено вище об'єкти автоматизації характеризуються вихідними, вхідними параметрами та збуреннями. Для того щоб врахувати дію цих параметрів на об'єкт автоматизації розробляється

структурна схема. Перед виконанням структурної схеми потрібно знати призначення об'єкта автоматизації та його технологічну роботу.

Об'єкт автоматизації на схемі показують в вигляді прямокутника. Параметри об'єкта позначають літерами.

Всі параметри зображують стрілками і розміщують вихідні параметри у праворуч, а вхідні x – ліворуч від об'єкта автоматизації, збурення f – зверху. Біля стрілок позначають фізичну, механічну, енергетичну, електричну величини відповідними літерами. Під схемою проставляються всі позначення з їх розшифровкою.

Функціональні схеми поділяються на функціональні електричні та функціонально-технологічні схеми автоматизації.

Функціональна електрична схема показує функціональне призначення елементів, пристроїв схеми автоматизації, їх взаємозв'язок з вказуванням виду величини, що передається між функціональними пристроями, використовуючи умовні позначення.

Для того, щоб розробити функціональну схему, потрібно досконало знати технологічну роботу установки та призначення кожного елемента об'єкта автоматизації.

На функціональній схемі позначення зображують квадратами з розмірами 15 мм, пристрій, що порівнює вхідні величини з заданим параметром позначають колом з діаметром –10 мм і проставляють напрямок дії сигналів за допомогою стрілок між функціональними пристроями.

Напрямок дії керуючого сигналу вказують відповідно до послідовності спрацювання елементів або пристроїв установки. Наприклад, від сприймаючого до порівняльного пристрою, потім до підсилювального, керуючого, виконавчого та на об'єкт керування, яким являється установка. На стрілках напрямку дії проставляють величину, яка передається між цими елементами або пристроями використовуючи позначення, що прийняті для позначення фізичних, механічних і електричних величин.

Розміщують на схемі умовні позначення симетрично, лінії зв'язку повинні бути паралельні або перпендикулярні. Позначення мають бути акуратні і розбірливі. Під схемою розміщують позначення елементів або пристроїв на функціональній схемі.

7.4. Принципові та монтажні схеми

Принципові електричні схеми – це проектний документ, розроблений на основі схем автоматизації, який визначає повний склад електричних елементів та зв'язків між ними, а також дає детальне уявлення про принципи роботи схеми.

При виконанні принципівих електричних схем керуються в першу чергу такими нормативними документами: ГОСТ 2.701-84 «Схеми.

Виды и типы. Общие требования к выполнению»; ГОСТ 2.702-75 «Правила выполнения электрических схем»; ГОСТ 2.708-81 «Правила выполнения электрических схем цифровой вычислительной техники».

У загальному випадку принципів електричні схеми складаються з умовних зображень елементів і зв'язків між ними; пояснюючих написів; окремих елементів даної схеми, що використовуються в інших схемах, а також елементів із інших схем; діаграми перемикачів контактів багато позиційних пристроїв; переліку пристроїв, засобів автоматизації та апаратури, що використовується в даній схемі; переліку креслень, що належать до даної схеми, загальних пояснень та примітки.

Для доповнення умовного графічного позначення елементів на принципових електричних схемах за ГОСТ 2.710-81 застосовують літерно-цифрові позначення (табл. 7.3). Їх називають позиційними.

Позиційне позначення згідно з ГОСТ 2.710-81 складається із трьох частин. У першій частині записують одну або дві літери латинського алфавіту (вид елемента), у другій – одну або кілька цифр (номер), у третій – одну або кілька латинських літер (функція елемента). Слід пам'ятати, що вид та номер елемента – обов'язкова частина умовного позначення. Показувати функцію елемента необов'язково.

Таблица 7.3

Літерні коди для показу функціонального призначення елементів

Літерний код	Функціональне призначення	Літерний код	Функціональне призначення
A	Допоміжний	P	Пропорційний
B	Напрямок руху	Q	Стан (стоп, старт, обмеження)
C	Зчитуючий		
D	Дифереціюючий	R	Поворот, скидання
F	Захисний	S	Запам'ятовування, запис
G	Випробовуючий	T	Синхронізація, затримка
H	Сигнальний	V	Швидкість, прискорення
I	Інтегруючий	W	Додавання
K	Штовхаючий	X	Перемноження
M	Головний	Y	Аналоговий
N	Вимірювальний	Z	Цифровий

Наприклад, конденсатор, що використовується як інтегруючий, на принциповій електричній схемі позначається C4I (4 – його порядковий номер), а цифрова мікросхема, що виконує функцію запам'ятовування – DD7S (7 – її порядковий номер) і т.д.

При виконанні принципових електричних схем рекомендується дотримувати певних правил. Аркуш із схемами заповнюють так: у лівій частині розміщують основну схему, потім графічний матеріал, що

пояснює дію схеми (циклограми, діаграми замикань контактів і т. п.), а в правій частині — текстовий матеріал.

Принципові схеми виконують рядковим методом. При цьому графічні позначення елементів або їх складові частини, що входять в один ланцюг, зображують послідовно один за іншим по прямій, а окремі ланцюги—поряд, створюючи паралельні (горизонтальні або вертикальні) рядки.

Усі апарати (реле, контакти, кнопки та ключі управління, автоматичні вимикачі, перемикачі ланцюгів тощо) на електричних схемах необхідно зображувати у вимкненому положенні, тобто при відсутності напруги у всіх ланцюгах схеми та зовнішніх механічних діях на апарати.

Контакти реле, контакторів, кнопкових перемикачів показують таким чином, щоб сила, необхідна для спрацювання, діяла на рухомий контакт зверху вниз при горизонтальному зображенні ланцюгів схеми та зліва направо – при вертикальному.

Для позиційного позначення елементів рекомендується застосовувати дволітерні коди. Але залежно від конкретного змісту схеми елемент будь-якого виду може бути позначений і однією літерою – загальним кодом виду елемента. Наприклад, якщо в схемі є магнітний пускач і відсутні інші реле, то цей пускач можна позначити літерою К, хоч він має дволітерний код КМ.

На принципових електричних схемах лінії зв'язку потрібно показувати, повністю, але якщо це утруднює читання схем, тоді допускається їх обривати. У таких випадках обриви слід закінчувати стрілками, біля яких показують місце підключення та характеристику ланцюгів (полярність, потенціал). Лінії зв'язку, що переходять з одного аркуша на інший, необхідно обривати за межами зображення схеми.

Товщина ліній зв'язку допускається 0,2-1,0 мм, а рекомендується – 0,3-0,4 мм. На одній схемі бажано використовувати не більше трьох різних за товщиною розмірів ліній зв'язку.

На принципових електричних схемах графічні умовні зображення елементів можуть бути виконані двома способами: суміщеним та рознесеним.

При використанні суміщеного способу частини кожного приладу, засобу автоматизації або електричного апарату розміщують у безпосередній близькості один від одного та окреслюють їх прямокутником, квадратом або колом. Недолік цього способу - недостатня наочність.

При використанні рознесеного способу складові частини приладів, апаратів, засобів автоматизації розміщують у різних місцях схеми, але таким чином, щоб окремі ланцюги були зображені найбільш наочно.

Належність елементів до одного і того ж пристрою встановлюють по позиційному позначенню.

Система позначення і правила нанесення позначення кіл (силових, керування, захисту, сигналізації, автоматики, виміру) в електричних схемах виробів усіх галузей промисловості й енергетичних споруд встановлена стандартом ГОСТ 2.709-83 «Система обозначения цепей в электрических схемах».

Допускається, якщо це не викличе помилкового підключення, позначати фази відповідно літерами А, В, С.

Силові кола постійного струму позначають:

- а) ділянки кіл позитивної полярності – непарними числами;
- б) ділянки кіл негативної полярності – парними числами;
- в) вхідні та вихідні ділянки ланцюгів — з показом полярності «+» та «—», а середній провідник — літерою *N* та *M*.

Позначення ділянок кола служить для їх розпізнавання і може вказувати їх функціональне призначення в електричній схемі.

Ділянки кола, розділені контактами апаратів, обмотками реле, приладів, машин, резисторами й іншими елементами, повинні мати різне позначення.

Ділянки кола, що проходять через роз'ємні, розбірні чи нерозбірні контактні з'єднання, повинні мати однакове позначення.

Допускається для розпізнавання ділянок кола додавати до позначення послідовні числа або позначення пристроїв (агрегатів), відокремлюючи їх знаком дефіс.

Послідовність позначення повинна бути від вводу джерела живлення до споживача, а ділянки кола, що розгалужуються, позначають зверху донизу у напрямку зліва направо.

При позначенні кіл допускається залишати резервні номери або пропускати номери для забезпечення зручності користування схемою.

При позначенні застосовують арабські цифри і великі літери латинського алфавіту.

Цифри і літери, що входять у позначення, слід виконувати одним розміром шрифту.

Для комутації електричних ланцюгів часто використовують багатопозиційні апарати (ключі, перемикачі, програмні пристрої). У цьому випадку на схемі необхідно розмістити діаграми та таблиці перемикання їх контактів. У таблицях наводять відомості, що відображають тип апарата, вид рукоятки, номер контактів і режим роботи.

Дані про елементи схем, що зображуються на кресленнях принципів електричних схем, повинні бути занесені до переліку елементів, які оформляють у вигляді таблиці.

Контрольні питання:

1. Зробіть класифікацію видів схем автоматизації.
2. Зробіть класифікацію типів електричних схем.
3. Назвіть основні параметри структурної схеми системи автоматизації
4. Назвіть основні принципи побудови структурних схем автоматизації.
5. Назвіть основні вимоги при побудові монтажних схем.
6. Назвіть основні вимоги при побудові принципових схем.

Лекція 8. Принцип дії типової схеми керування електроприводом

План:

- 8.1. Принципи автоматичного управління двигунами електроприводів.
- 8.2. Реостатний пуск ДПС з незалежним збудженням з двома ступенями пускового опору.
- 8.3. Види автоматичного управління.

8.1. Принципи автоматичного управління двигунами електроприводів

Найбільшого поширення у всіх галузях промисловості отримали електроприводи, що відносяться до першої групи класифікації за функціональним призначенням і забезпечують автоматичне керування процесами пуску, гальмування і реверсу двигунів. Їх частина у загальній кількості електроприводів, які використовують в Україні, перевищує 80%. У таких системах застосовують контактні і безконтактні електричні апарати релейної дії. У силових ланцюгах, які живлять обмотки двигунів, використовують електромагнітні контактори змінного і постійного струму, електромагнітні пускачі, тиристорні перемикачі. У колах управління різні реле часу, напруги, струму, частоти, потужності та ін. Команди на виконання тієї чи іншої операції подаються за допомогою кнопоквих постів управління тощо. Крім цього сигнали на пуск, зупинку, реверсування або зміну швидкості двигуна можуть надійти в систему управління від колійних або кінцевих вимикачів, датчиків тиску, температури та інших датчиків, що контролюють роботу технологічних машин.

У розглянутій групі електроприводів автоматизація процесу пуску найбільш просто здійснюється для АД з короткозамкненим ротором: після подачі команди на пуск операції керування зводяться до включення обмоток двигуна на повну напругу мережі, тобто до прямого

пуску двигуна. Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором і синхронні двигуни великої потужності (більше 100 кВт) запускають при зниженій напрузі.

При пуску ДПС і АД з фазним ротором автоматично вимикаються ступені пускового реостату з ланцюга протікання струму якоря або ротора відповідно.

Автоматизація процесу гальмування працюючого двигуна при будь-якому виді електричного гальмування передбачає виконання двох основних операцій управління:

1 - після подачі команди на гальмування відбуваються перемикання в силових колах двигуна, що призводять до зміни напрямку обертального моменту двигуна, тобто що роблять його гальмівним;

2 - в кінці гальмування при швидкості, близькій до нуля, двигун, який гальмують до зупинки, відключається від мережі і загальмовується механічним гальмом.

В іншому випадку в головних колах робляться перемикання, необхідні для реверсу двигуна, тобто для розгону в протилежному напрямку.

Системи автоматичного управління пуском, гальмуванням і реверсом, що реалізують зазначені раніше операції, конструктивно виконують у вигляді комплектних стандартизованих пристроїв - станцій управління. Станції управління забезпечують можливість регулювання швидкості двигуна, тобто різні за величиною швидкості усталеного режиму роботи двигуна.

На станціях управління встановлюються апарати електричного захисту головних кіл і кіл управління двигуном. Командоапарати, пускорегулювальні і гальмівні резистори, струмообмежуючі реактори та інші елементи розташовують найчастіше поза станцій управління.

У електричних апаратів станцій управління передбачені запасні контакти, які можуть бути використані для сигналізації і різних блокувань. Можливе також підключення в колі управління станцій контактів кінцевих вимикачів, технологічних датчиків і апаратів інших автоматичних пристроїв.

8.2. Реостатний пуск ДПС з незалежним збудженням з двома ступенями пускового опору

В електричних схемах станцій управління широко застосовують типові вузли управління та захисту. Принципи побудови типових вузлів розглянемо на прикладі реостатного пуску ДПС з незалежним збудженням з двома ступенями пускового опору. Схема включення двигуна наведена на рис. 8.1а, діаграма швидкості двигуна ω і струму якоря I_a - на рис. 8.1б.

У першу чергу підключається до джерела напруги U_B обмотка збудження LM. Струм збудження I_B , протікаючи по LM, створює магнітний потік Φ . Після цього до джерела якірної напруги U підключається якірний ланцюг двигуна.

При розімкнених контактах контакторів прискорення КУ1 і КУ2 в момент часу $t = 0$ замикається контакт лінійного контактора КЛ. Пусковий струм якоря $I_{я1}$ протікає по обидвох ступенях пускового опору $R_{дп1}$ і $R_{дп2}$. Якщо величина пускового опору $R_n = R_{дп1} + R_{дп2}$ обрана вірно, то пусковий струм не перевищуватиме допустимого значення $I_{я1} \leq I_{я доп} \leq 2,5 I_{я н}$. На якір двигуна при швидкості $\omega = 0$ починає діяти пусковий момент M_n . Якщо M_n більше моменту опору M_c , динамічний момент має позитивну величину $M_d > 0$, то відповідно до рівнянням руху електроприводу при пуску, величина кутового прискорення буде позитивна і швидкість обертання якоря двигуна ω буде зростати.

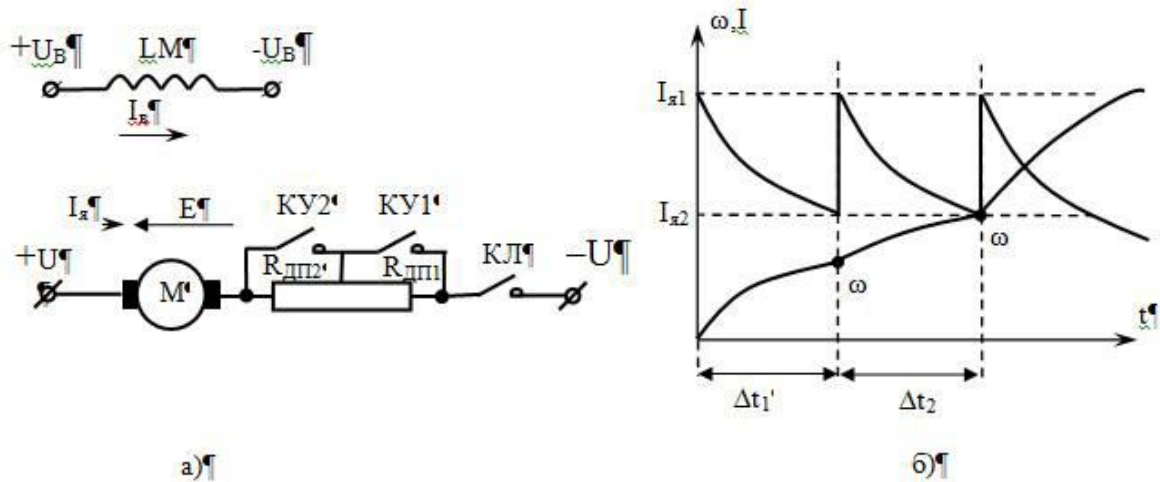


Рис. 8.1. Реостатний пуск ДПС з незалежним збудженням:

а) схема включення; б) діаграма швидкості двигуна ω і струму якоря $I_{я}$.

В обмотці якоря двигуна, що обертається в магнітному потоці Φ , буде знаходитися е.р.с. обертання $E = k\omega\Phi$. Згідно схеми включення двигуна рис. 7.1а, е.р.с. обертання E по відношенню до джерела якірного напруги U спрямована зустрічно. Тому зі збільшенням ω буде збільшуватися E і зменшуватися якірний струм

$$I_{я1} = \frac{U - E}{R_{\beta} + R_{\alpha} + R_{\alpha 1} + R_{\alpha 2}}$$

Із зменшенням $I_{я}$ буде зменшуватися і крутний момент двигуна $M = k\Phi I_{я}$. Це, в свою чергу призведе до зменшення динамічного моменту

$$M_d = M - M_c$$

і швидкості ω . Як впливає з діаграми на рис. 8.1б, після закінчення проміжку часу Δt_1 двигун досяг швидкості ω_1 , а якірний струм величини $I_{я2}$. Обертаючий момент двигуна M став рівним M_c , тобто $M_d = 0$ і тому збільшення швидкості обертання якоря двигуна припинилося. Двигун з перехідного режиму роботи з $\frac{d\omega}{dt} > 0$ при $\omega = \omega_1$ перейшов в сталий режим з $\frac{d\omega}{dt} = 0$.

Для того, щоб продовжити розгін, необхідно замкнути контакт першого контактора прискорення $R_{дп1}$ КУ1 і зашунтувати першу ступінь пускового опору $R_{дп1}$. При цьому якірний струм практично миттєво збільшиться до значення $I_{я1}$, що призведе до появи позитивного M_d і зростанню швидкості. За закінчення проміжку часу Δt_2 двигун досягне швидкості ω_2 , а якірний струм зменшиться до величини $I_{я2}$. Двигун перейде в сталий режим роботи зі швидкістю ω_2 . Для продовження розгону необхідно замкнути контакт другого контактора прискорення КУ2 і зашунтувати $R_{дп2}$. Знову збільшиться $I_{я}$, з'явиться $M_d > 0$ і продовжиться зростання швидкості, яке припиниться при $M = M_c$.

8.3. Види автоматичного управління

З графіків зміни в часі швидкості і струму ДПС при реостатному пуску з двома ступенями пускового опору видно, що автоматичне вимикання (шунтування) ступенів пускового опору повинно здійснюватися:

- 1) через певні проміжки часу ($\Delta t_1, \Delta t_2$);
- 2) при певних значеннях швидкості (ω_1, ω_2);
- 3) при певній величині струму $I_{я2}$.

Таким чином, автоматичне керування пуском, суть якого полягає в шунтуванні ступенів пускового реостата, може бути здійснене:

- 1 - у функції часу;
- 2 - у функції швидкості;
- 3 - у функції струму.

Управління у функції часу припускає наявність у схемі автоматичного управління реле часу, що настроюють на відлік заданих витримок часу.

Управління у функції швидкості здійснюють за допомогою реле, які контролюють швидкість двигуна безпосередньо або побічно.

Управління у функції струму реалізують застосуванням реле мінімального струму. Всі апарати подають команди на включення контакторів прискорення.

Управління гальмуванням може проводитися у функції тих же самих засобів автоматизації, що й при пуску.

Контрольні питання:

1. Дайте перелік основних засобів автоматизації.
2. Основні операції при запуску асинхронного двигуна та ДПС.
3. Основні операції при гальмуванні асинхронного двигуна та ДПС.
4. Пояснити принцип реостатного пуску ДПС з незалежним збудженням з двома ступенями пускового опору.
5. Пояснити принцип реостатного гальмування ДПС з незалежним збудженням з двома ступенями пускового опору.
6. Дайте характеристику видів автоматичного управління.

Лекція 9. Типові вузли схем автоматичного управління гальмуванням ДПС

План:

- 9.1. Управління у функції часу динамічним гальмуванням ДПС.
- 9.2. Управління у функції швидкості динамічним гальмуванням ДПС.
- 9.3. Реверсивна схема включення ДПС.

9.1. Управління у функції часу динамічним гальмуванням ДПС

Управління гальмуванням двигунів можливе у функції часу, швидкості та струму із застосуванням тих же засобів, що і при пуску. Автоматизація процесу гальмування при будь-якому його вигляді передбачає виконання двох основних операцій:

1 - після подачі команди на гальмування в силових колах працюючого двигуна робляться перемикання, в результаті яких змінюється напрямок моменту двигуна;

2 - в кінці гальмування при ω , близькій до нуля, двигун автоматично відключається від мережі, або в силових колах виробляються перемикання, необхідні для реверсу.

Типовий вузол, що забезпечує автоматичне управління динамічним гальмуванням ДПС з незалежним збудженням у функції часу, наведено на рис. 9.1а. Відповідні схемі включення двигуна механічні характеристики зображені на рис. 9.1б. Пуск двигуна показаний умовно в одну ступінь. Управління при пуску може здійснюватися одним з раніше розглянутих методів. Після закінчення пуску двигун працює в точці А на природній характеристиці. Напрямок е.р.с. обертання Е і струму якоря $I_{\text{я}}$ показані для рухового режиму роботи.

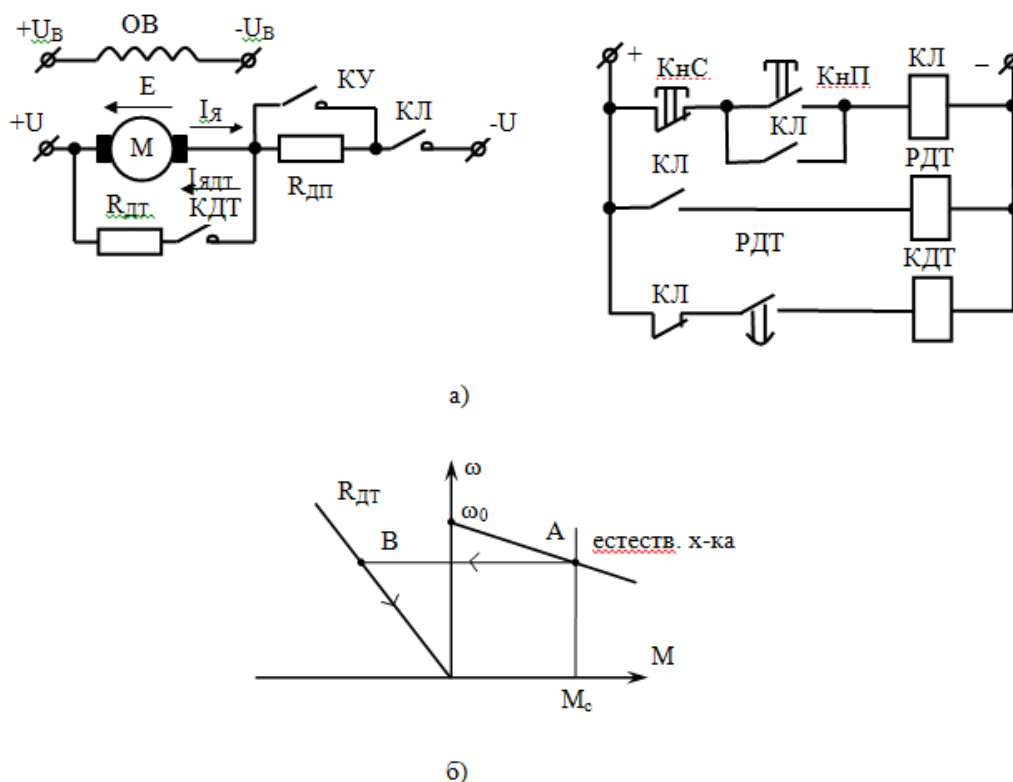


Рис. 9.1. Управління у функції часу динамічним гальмуванням ДПТ:
а) схема включення двигуна; б) механічні характеристики.

При пуску замикаючий контакт КЛ подає живлення на котушку реле динамічного гальмування РДТ і реле спрацьовує. Замикаючий контакт РДТ в колі живлення котушки контактора динамічного гальмування КДТ замкнеться. Однак КДТ не увімкнеться, оскільки в колі живлення його котушки контакт КЛ розімкнений.

При натисканні на кнопку «стоп» КнС відключиться контактор КЛ і якірний ланцюг двигуна буде відключений від джерела якірної напруги U . Котушка РДТ втратить живлення. Однак реле РДТ, електромагнітне реле часу, залишиться у включеному стані і буде вести відліки витримки часу. Включиться контактор КДТ і до затискачів якоря двигуна буде підключено опір динамічного гальмування $R_{дт}$. В утвореному контурі під дією E буде протікати струм динамічного гальмування $I_{яДТ}$, спрямований зустрічно до струму рухового режиму $I_{я}$. Тому крутний момент двигуна змінить напрямок і стане гальмівним. Двигун з точки А перейде в точку В на характеристиці динамічного гальмування, а його швидкість буде знижуватися. Після закінчення відліку витримки часу реле РДТ відключиться, котушка КДТ розімкне свій контакт в колі живлення і відключить його.

Управління гальмуванням в функції часу застосовується тільки при реактивному M_c . Уставка РДТ має бути рівною або трохи більшою часу гальмування.

9.2. Управління у функції швидкості динамічним гальмуванням ДПС

Автоматичне управління динамічним гальмуванням ДПС з незалежним збудженням при активному M_c здійснюється у функції швидкості при її прямому чи непрямому контролі. Схема типового вузла наведена на рис. 9.2.

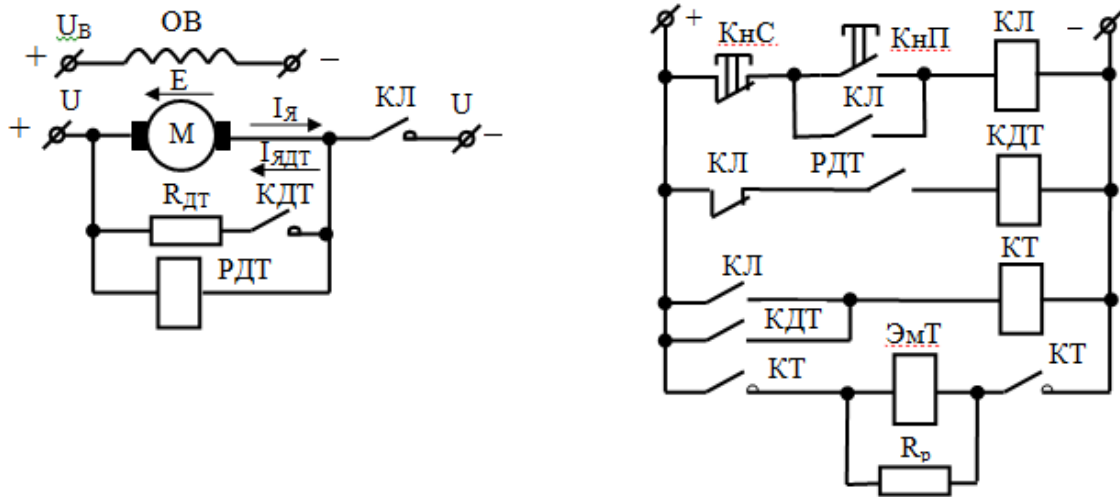


Рис. 9.2. Схема включення ДПС з незалежним збудженням в режимі динамічного гальмування.

Контроль е.р.с. здійснюється за допомогою реле напруги РДТ. Котушка РДТ підключена до затискачів якоря двигуна. Пускові опори і КУ на схемі не показані. РДТ спрацьовує під час пуску при $U_{я} = 0,6 \dots 0,7U_n$. При відключенні КЛ включається КДТ. До затискачів якоря підключається $R_{дт}$ і двигун гальмується. Коли швидкість стане досить малою, РДТ відпустить якор і відключить КДТ. Вал двигуна вільний, коли електромагніт гальма $ЭМТ$ отримує живлення. Тому котушка гальмівного контактора КТ отримує живлення як в руховому режимі, так і в гальмівному. R_p запобігає відпадинню якоря в процесі перемикання КЛ і КДТ.

9.3. Реверсивна схема включення ДПС

При реверсивній схемі включення ДПС з незалежним і послідовним збудженням автоматичне керування процесом гальмування противключенням здійснюється у функції швидкості при непрямому контролі її величини за е.р.с. двигуна. Схема включення двигуна наведена на рис. 9.3а. На ній показані обмотки незалежного LM1 і послідовного LM2 збудження. Схема ланцюгів управління наведена на рис. 9.3б. В схемі використовується не кнопкове, а більш зручне командоконтролерне управління. Вертикальні штрихові лінії означають фіксовані положення рукоятки командоконтролера. В даному випадку їх

три: 0 - нульове (середнє) положення; В - вперед; Н - назад. Точка на штриховий лінії під контактом означає, що контакт в даному положенні замкнений. У нашому випадку в нульовому положенні рукоятки розімкнуті; в положенні «вперед» замкнений КК1, а КК2 розімкнений; в положенні «назад» - навпаки.

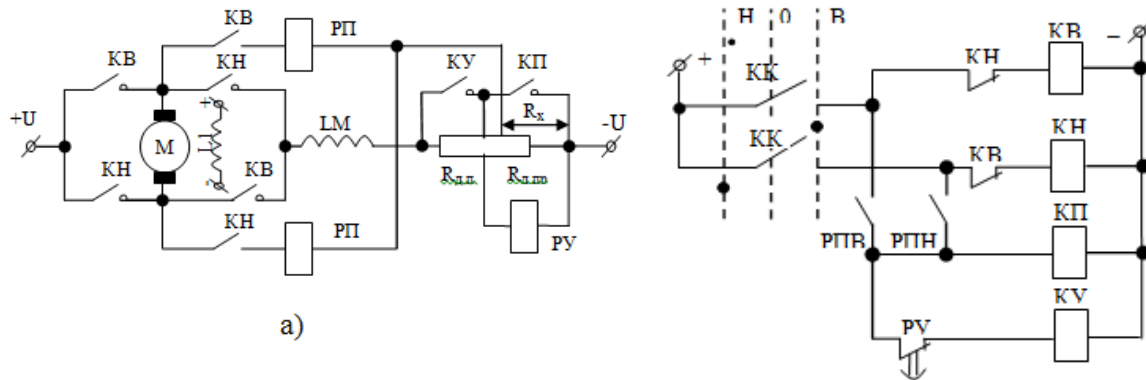


Рис. 9.3: а) реверсивна схема включення ДПС; б) схема кіл управління.

Пуск двигуна показаний умовно одноступеневим у функції часу. Для пуску двигуна в напрямку «вперед» необхідно перевести рукоятку командоконтролера з положення «0» в положення «В». Замкнеться контакт КК1 командоконтролера і отримає живлення котушка контактора «вперед» КВ: контактор КВ спрацьовує і своїми головними контактами підключає якір двигуна до джерела напруги U . Котушки контакторів противключення КН і прискорення КУ живлення не отримують, контактори відключені і їх головні контакти розімкнені. Пусковий струм протікає по $R_{дп}$ і $R_{дпр}$. Тому двигун починає розгін по характеристиці противключення. З'являється падіння напруги від пускового струму на $R_{дпр}$ і отримує живлення котушка реле РУ. Включиться реле прискорення РУ і розімкне свій контакт в колі живлення котушки КУ.

Замикаючий контакт КВ подає живлення на котушку реле противключення «вперед» РПВ. Реле РПВ спрацьовує і своїм замикаючим контактом подає живлення на котушку КН. Контактор КН спрацьовує й своїм головним контактом шунтує $R_{дпр}$. Двигун з характеристики противключення переходить на пускову характеристику. Одночасно з цим втрачає живлення котушка РУ і реле починає відлік витримки часу. Після закінчення витримки часу реле РУ відключиться, його контакт в колі живлення котушки КУ замкнеться і контактор прискорення КУ спрацює. Головний контакт КУ замкнеться і зашунтує $R_{дп}$. Двигун перейде на природну характеристику.

Для переведення двигуна в режим гальмування противключенням необхідно рукоятку командоконтролера з положення «В» перевести в

положення «Н». При переході рукоятки через положення «0» обидва контакту командоконтролера виявляються роз'єднаними, тому котушки КВ, КП, КУ втрачають живлення і контактори відключаються. У ланцюг протікання якірного струму включаються $R_{дп}$ і $R_{дпр}$, тобто двигун готується до режиму гальмування противключенням. У положенні рукоятки «Н» замикається контакт КК2. Отримує живлення котушка контактора «назад» КН і контактор КН спрацьовує. Головні контакти КН замикаються і змінюють полярність напруги на затискачах якоря двигуна. Змінюється напрямок якірного струму і обертового моменту двигуна. Він стає гальмівним. Замикаючий контакт КН в колі живлення котушки реле противключення «назад» РПН замкнеться, проте реле РПН не увімкнеться. Котушки КП і КУ живлення не отримують, контактори відключені і двигун гальмується по характеристиці противключення. Реле РУ включено і його контакт в колі живлення котушки КУ розімкнений.

Зі зменшенням швидкості двигуна напруга на котушці РПН збільшується. При швидкості, близькій до нуля, РПН включиться і своїм замикаючим контактом подасть живлення на котушку КП. Контакт КН спрацює і своїм головним контактом зашунтує $R_{дпр}$. Двигун перейде на пускову характеристику. Втратить живлення котушка РУ і реле почне відлік витримки часу. Двигун по пусковий характеристиці загальмується і відразу ж почне розгін в напрямку «назад». Після закінчення витримки часу РУ відключиться і включить КУ. Головний контакт КУ зашунтує $R_{дп}$, двигун перейде на природну характеристику.

Контрольні питання:

1. Пояснити принцип управління у функції часу динамічним гальмуванням ДПС.
2. Пояснити принцип управління у функції швидкості динамічним гальмуванням ДПС.
3. Пояснити принцип дії реверсивної схеми включення ДПС.

Лекція 10. Вузли електричного захисту двигунів і систем управління

План:

- 10.1. Включення апаратів захисту від струмів короткого замикання.
- 10.2. Захист двигунів від перегріву.
- 10.3. Захист від самозапуску і при обриві поля.
- 10.4. Захист від тривалого пуску і випадання з синхронізму синхронних двигунів

10.1. Включення апаратів захисту від струмів короткого замикання

Для запобігання виходу з ладу і підвищення надійності ЕП застосовують різні види електричних захистів.

Максимально-струмовий захист при короткому замиканні (к.з.) забезпечує негайне відключення кола, в якому відбулося к.з. Здійснюється: запобіжниками з плавкими вставками $Пр$; автоматами з електромагнітними розчеплювачами $В$; максимальними струмовими реле $РМ1$ і $РМ2$. При потужності двигунів до 10 кВт кола управління захищають при к.з. тими ж апаратами, що і силові кола або своїми $Пр$ і $В$. Приклади включення апаратів захисту наведено на рис. 10.1.

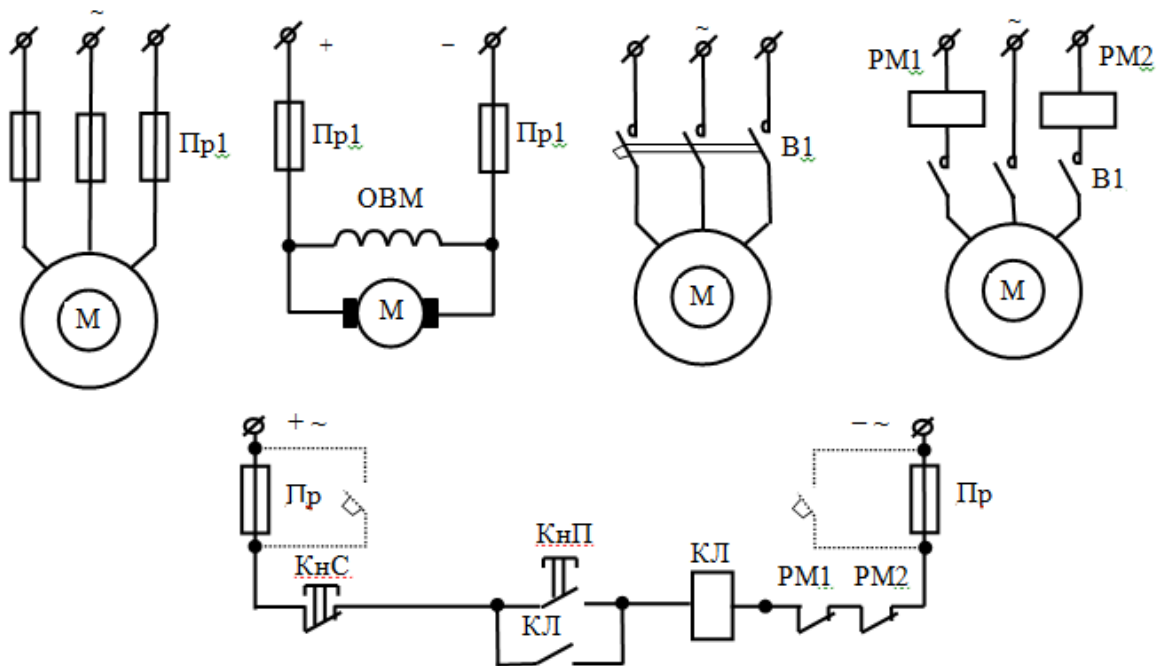


Рис. 10.1. Схеми включення апаратів захисту від струмів короткого замикання.

10.2. Захист двигунів від перегріву

Захист двигунів від перегріву, викликаного перевантаженням по струму, здійснюється: при тривалому режимі роботи - за допомогою двох теплових реле або теплових розчеплювачів (ДПТ-1реле); при S3 режимі роботи - за допомогою двох $РМ1$ і $РМ2$, оскільки в S3 режимі важко узгодити теплові характеристики. У цьому випадку одночасно забезпечується захист $М$ від роботи на двох фазах. Приклади включення апаратів захисту наведено на рис. 10.2.

Реле $РВ$ виключає можливість спрацьовування $РМ1$ і $РМ2$ при пуску. $РМ3$ служить для захисту при к.з. Номінальний струм нагрівального елемента теплового реле $I_{нагр.н.}$ або теплового розчеплювача $I_{расц.н.}$ вибирають з умови $I_{нагр.н.} = I_{расц.н.} \approx I_n$. Струм уставки

$PM I_{3\phi} < I_{уст.} < I_{2\phi}$; де $I_{3\phi}$ і $I_{2\phi}$ - струми двигуна при роботі на двох і трьох фазах.

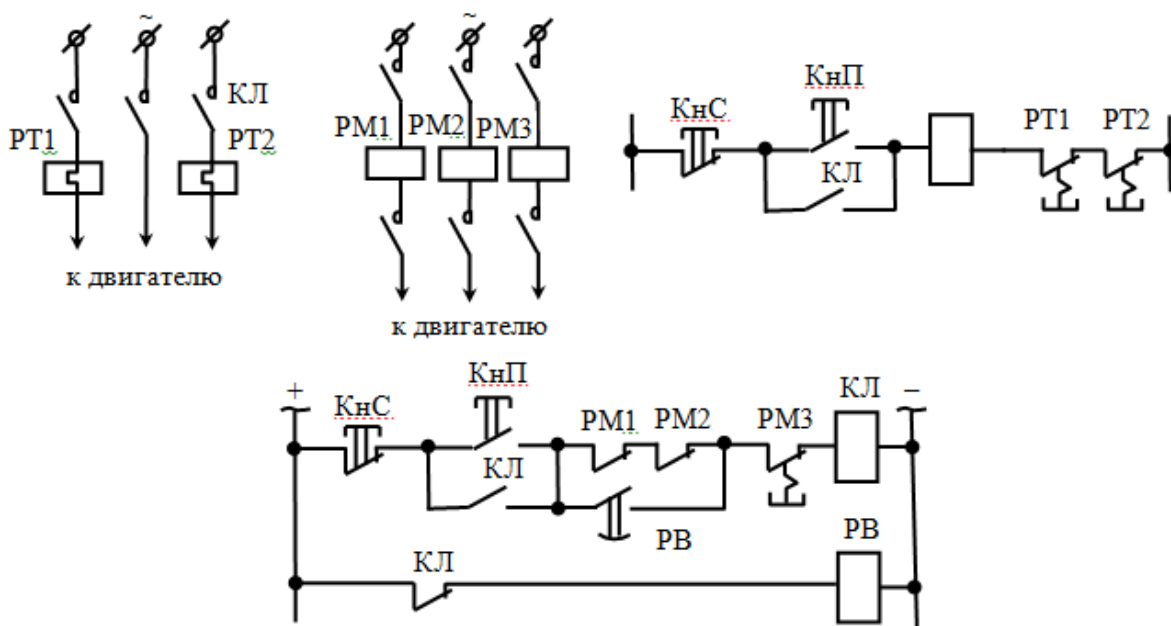


Рис. 10.2. Схеми включення апаратів теплового захисту.

10.3. Захист від самозапуску і при обриві поля

Захист від самозапуску (нульовий захист) забезпечує відключення двигуна при зникненні або надмірному зниженні напруги мережі і запобігає самозапуску - мимовільному пуску двигуна після відновлення напруги. При кнопковому управлінні його здійснює КЛ. При управлінні за допомогою командоконтролера - реле напруги РН. У цьому випадку пуск можливий тільки після установки КК в нульове положення. У ланцюг котушки РН включаються контакти інших апаратів захисту. Якщо, навпаки, потрібно забезпечити самозапуск двигуна, то кнопки управління замінюють вимикачами.

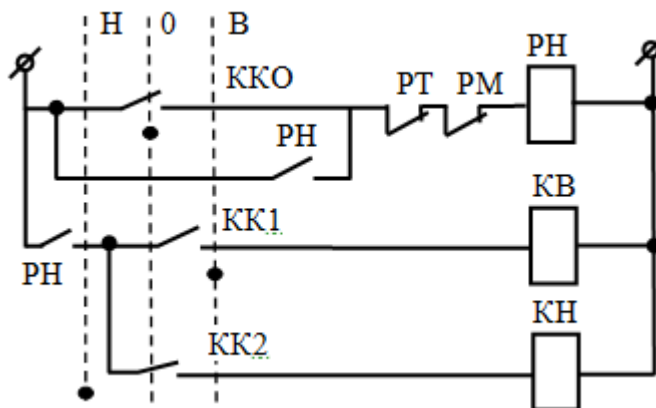


Рис. 10.3. Схема включення захисту від самозапуску.

Захист при обриві поля, тобто при обриві кола обмотки збудження ДПС і СД, здійснюється за допомогою мінімального струмового реле РОП. При обриві в ланцюзі ОВМ РОП вимикається і включає двигун. Захист від перенапруги на ОВМ при її відключенні здійснюється розрядним опором $R_{рд}$ і усуває втрати енергії при роботі.

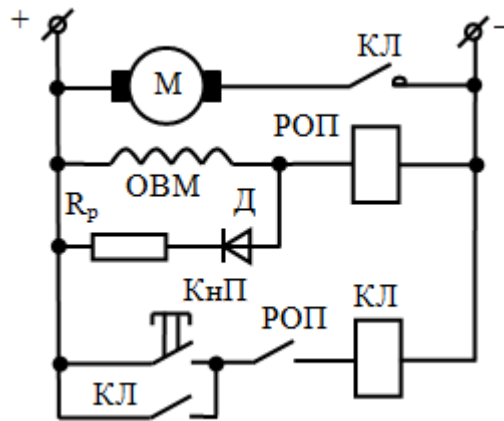


Рис. 10.4. Схема включення захисту від обриву поля.

10.4. Захист від тривалого пуску і випадання з синхронізму синхронних двигунів

Захист від тривалого пуску синхронних двигунів (СД), схема якого наведена на рис. 10.5, виконують за допомогою РОП і реле часу РВ. Захист необхідний, оскільки пускова обмотка розрахована на короткочасний режим роботи. Витримка РВ відповідає допустимій тривалості пуску. Якщо до моменту спрацювання РВ струм збудження не досяг свого номінального значення і РОП не включений, то РП спрацює і двигун відключиться.

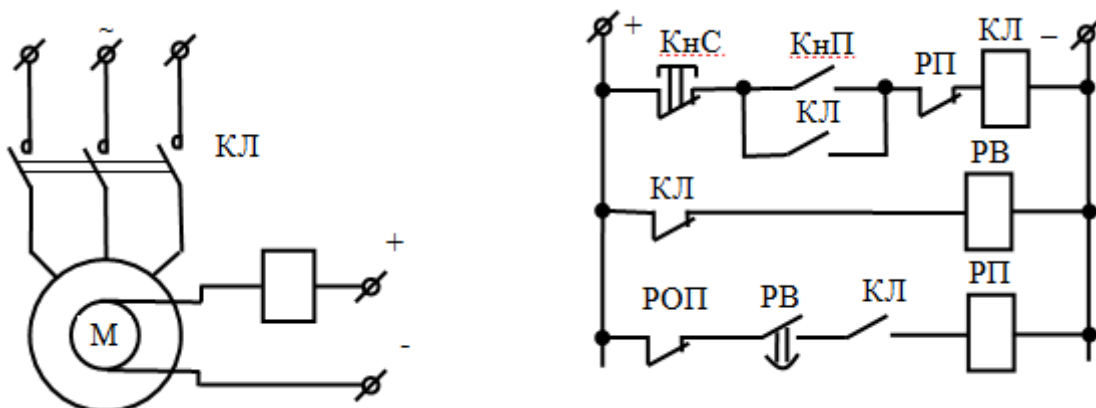


Рис. 10.5. Схема включення захисту від тривалого пуску СД.

Захист від випадання з синхронізму СД, схема якого наведена на рис. 10.6, застосовується для двигунів з різко змінюваним

навантаженням на валу. Для збереження переважувальної здатності двигуна при зниженні напруги мережі на 15-20% відключиться реле мінімальної напруги КЛ. Замикається його контакт і включає контактор фазировки КФ. Останній своїм контактом шунтує реостат R_{дв} в ланцюзі ОВВ. Напруга збудника, струм збудження і максимальний момент двигуна зростають.

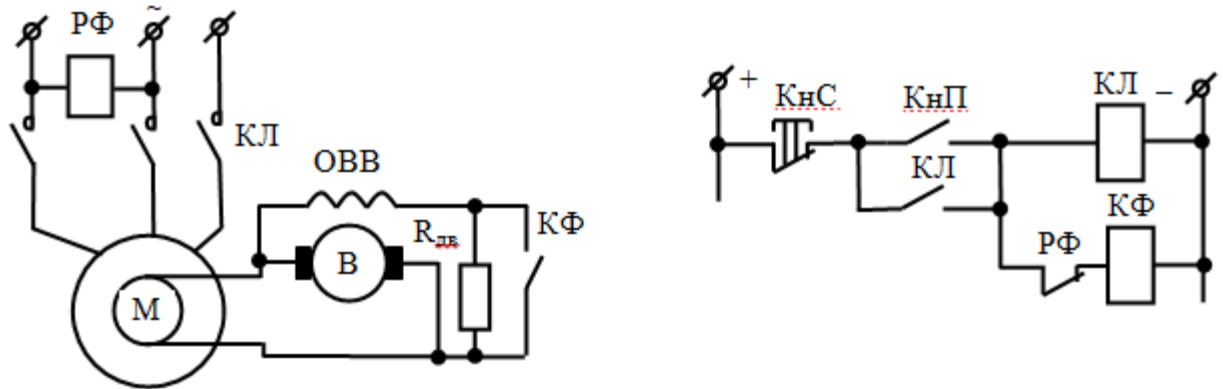


Рис. 10.6. Схема включення захисту СД від випадання з синхронізму.

Контрольні питання:

1. Пояснити принцип дії схеми включення апаратів захисту від струмів короткого замикання двигунів.
2. Пояснити принцип дії схеми включення апаратів теплового захисту двигунів.
3. Пояснити принцип дії схеми включення захисту від само запуску двигуна.
4. Пояснити принцип дії схеми захисту від обриву поля.
5. Пояснити принцип дії схеми включення захисту від тривалого пуску синхронних двигунів.
6. Пояснити принцип дії схеми включення захисту синхронних двигунів від випадання з синхронізму.

Список рекомендованої літератури

1. Павленко Т. П., Милых В. И. Электроснабжение промышленных предприятий. Харьков : НТУ «ХПИ», 2015. 267 с.
2. Далека В. Х., Скуріхін В. І. Електропостачання електричного транспорту. Харків : ХНАМГ, 2012. 168 с.
3. Буряк В. М. Експлуатація електрообладнання систем електропостачання. Харків : ХДАМГ, 2011. 386 с.
4. Мілих В. І. Електропостачання промислових підприємств : підручник. Харків : НТУ «ХПІ», 2016. 272 с.
5. Нем В. К., Донець О. В., Лукашова Н. П. Електропостачання електричного транспорту : практикум до лабораторних і практичних занять. Харків : ХДАМГ, 2014. 137 с.
6. Нем В. К., Лукашова Н. П. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Электроснабжение электрического транспорта». Харьков : ХНАМГ, 2017. 82 с.
7. Шевченко В. В., Арзамасцев Н. В., Бодрухина С. С. Электроснабжение технологических систем. Харьков : Транспорт, 2014. 271 с.
8. Електропостачання метрополітенів. Прилад, експлуатація та проектування / Є. І. Биков та ін. ; за ред. Є. І. Бикова. Харків : Транспорт, 2017. 431 с.

Для нотаток

ЕЛЕКТРОПРИВОД І АВТОМАТИЗАЦІЯ

Методичні рекомендації

Укладач: **Марченко** Дмитро Дмитрович

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 3,62.

Тираж 100 прим. Зам. № ____

Надруковано у видавничому відділі

Миколаївського національного аграрного університету

54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №4490 від 20.02.2013 р.