

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

# **ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ**

## **Конспект лекцій**

**Суми**  
**2022**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Кафедра енергетики та електротехнічних систем**

## **Основи електроприводу**

### **Конспект лекцій**

для студентів 4 (2 с.т.) курсу бакалавр,  
спеціальність 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»,  
денна та заочна ФН

**Суми**  
**2022**

**УДК 631.81 (631)**  
**УДК – 5150-(075.8)**  
**Р-99**

**Укладачі:**

Рясна О.В., старший викладач кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ

Чепіжний А.В., к.т.н., ст. викладач; завідувач кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ

**Основи електроприводу /Конспект лекцій для студентів 3, 4 (2 с.т.) курсу бакалавр, спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», денна та заочна ФН /Суми, 2022 рік, 103 ст., рис 69 табл. 3, бібл. 20**

В конспекті лекцій наведені всі теми для вивчення дисципліни.

Конспект лекцій призначений для студентів 4 (2 с.т.) курсу денної і заочної форм навчання, спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

**Рецензенти:** Герасименко В.О., к.ф-м.н., доцент, завідувач кафедрою вищої математики СНАУ

Кравченко В.О., к. ф-м. н. , доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ

**Відповідальний за випуск:** Чепіжний А.В., к.т.н., ст. викладач; завідувач кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ

Рекомендовано до видання навчально-методичною радою інженерно-технологічного факультету. Протокол № 6 від « 25» травня 2022 року

© Сумський національний аграрний університет, 2022

Тематичний план

№ п/п	Назва розділу, теми	Кількість годин	
		Денна форма	Заочна форма
1	Лекції	30	10

## ЗМІСТ

<b>1. ЛЕКЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ .....</b>	<b>7</b>
Лекція №1.Тема 1. Вступ. Загальні відомості.....	7
Лекція №2.Тема 2. Будова та принцип дії двигунів постійного струму.....	13
Лекція №3.Тема 3. Механічні властивості та режими роботи ДПС з незалежним (паралельним) та послідовним збудженням.....	15
Лекція №4.Тема 4. Регулювання частоти обертання ДПС НЗ.....	24
Лекція №5.Тема 5. Будова та принцип дії асинхронних двигунів.....	32
Лекція №6.Тема 6. Механічні властивості та режими роботи асинхронного двигуна.....	50
Лекція №7.Тема 7. Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна.....	53
Лекція №8.Тема 8. Будова та принцип дії синхронних двигунів.....	59
Лекція №9.Тема 9. Особливості пуску двигунів постійного струму та асинхронних двигунів.....	67
Лекція №10.Тема 10. Теоретичні основи механіки електроприводу.....	75
Лекція №11.Тема 11. Вибір та перевірка електричних двигунів. Частина 1.....	79
Лекція №12.Тема 12. Вибір та перевірка електричних двигунів. Частина 2.....	80
Лекція №13.Тема 13. Енергетика електроприводу.....	82
Лекція №14.Тема 14. Загальні відомості про схеми керування електроприводом.	85
Лекція №15.Тема 15. Принцип побудови замкнених систем електропривода.....	87
<b>СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....</b>	<b>96</b>

## **ВСТУП**

Дисципліна «Основи електроприводу» є однією з основних профільюючих дисциплін у системі підготовки інженера електромеханіка та інженера механіка.

**Метою вивчення дисципліни «Основи електроприводу»** є надання майбутнім спеціалістам досить глибоких знань і уявлень в галузі електричних машин, електромеханічного перетворення енергії та управління процесами такого перетворення, що повинно стати основою для практичної діяльності в галузі експлуатації електричних машин, електроприводів та систем автоматизації на їх основі.

**Предметом вивчення дисципліни є:** будова та принцип дії електричних машин; питання механіки електроприводу та загальні принципи його будови; схеми, характеристики, регульовальні властивості електроприводу з двигунами постійного та змінного струму; питання запуску та гальмування двигунів та їх вибір. Приділяється увага також вивченню розімкнених та замкнених систем електроприводів з двигунами постійного та змінного струму, які використовують у виробничих процесах як гірничорудної промисловості, так і їх елементної бази та ін.

Дисципліна базується на знаннях з вищої математики, фізики, загальної електротехніки, електроніки, теоретичної механіки. Оволодіння студентами навчальної дисципліни «Електропривод і автоматизація» дозволяє успішно засвоїти такі спеціальні дисципліни, як «Охорона праці в галузі», «Технічне обслуговування машин переробних підприємств», «Технічне обслуговування фермерської техніки», «Технічне обслуговування машин і обладнання», «Основи проектування енергетичних об'єктів АПК», «Електричні машини» та застосовувати знання при розв'язанні практичних виробничих завдань.

# 1. ЛЕКЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ

## 1.1 Лекція №1

### Тема 1. Вступ. Загальні відомості.

#### План

1. Мета та задачі дисципліни.
2. Загальні відомості про електричні машини.

#### 1. Мета та задачі дисципліни.

**Електропривод** - це керована електромеханічна система. Її призначення - перетворювати електричну енергію в механічну й зворотно і управляти цим процесом.

**Електропривод має два канали** - силовий і інформаційний (рис. 1.1). По першому транспортується преутворена енергія (широкі стрілки на рис. 1.1), по другому здійснюється керування потоком енергії, а також збір і обробка відомостей про стан і функціонування системи, діагностика її несправностей (тонкі стрілки на рис. 1.1).

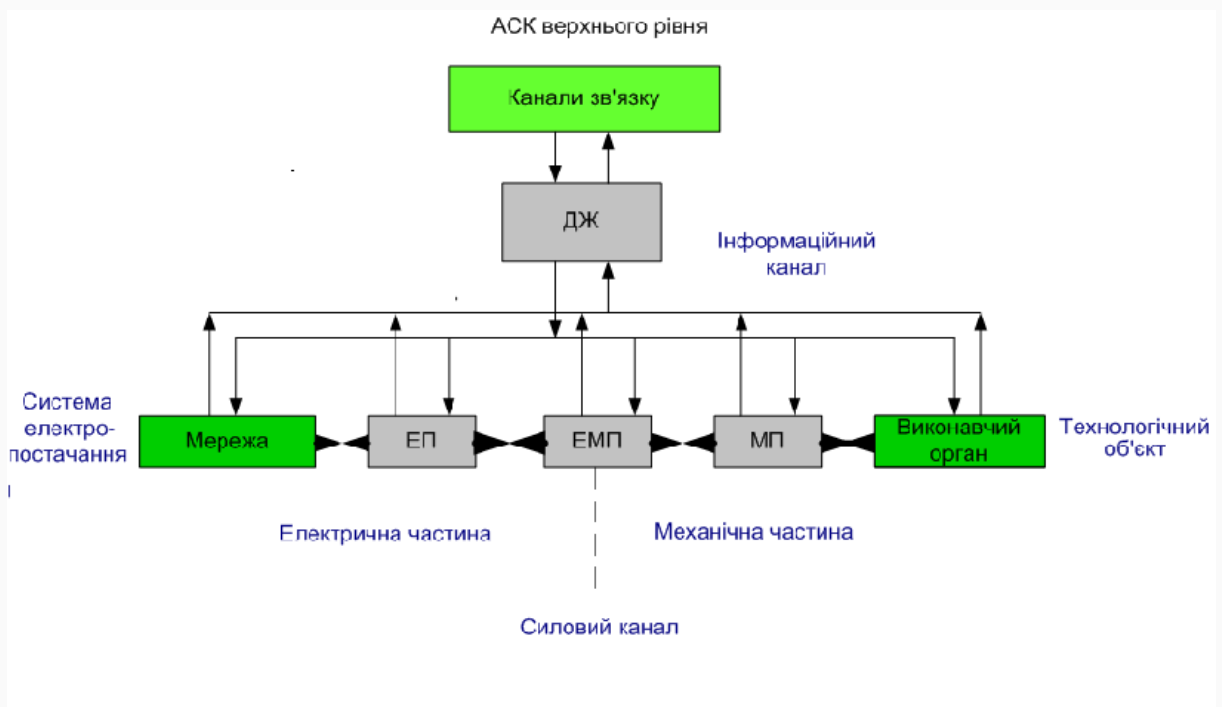


Рис. 1.1. Загальна структура електропривода

Силовий канал у свою чергу складається із двох частин - електричної і механічної й обов'язково містить сполучну ланка- електромеханічний перетворювач.

В **електричну частину** силового каналу входять пристрої *ЕП*, що передають електричну енергію від джерела живлення (шин промислової електричної мережі, автономного електричного генератора, акумуляторної батареї й т.п.) до електромеханічного перетворювача *ЕМП* і зворотно і здійснючі, якщо це потрібно, перетворення електричної енергії.

**Механічна частина** складається з рухливого органа електромеханічного перетворювача, механічних передач і виконавчого органа установки, у якому корисно реалізується механічна енергія.

Електропривод взаємодіє із **системою електропостачання** або джерелом електричної енергії, з одного боку, з **технологічною установкою** або машиною, з іншого боку, і нарешті, через інформаційний перетворювач ІП з **інформаційною системою більше високого рівня**, часто з людиною - оператором, із третьої сторони (рис. 1.1).

Можна вважати, що електропривод як підсистема входить в указані системи, являючись їхньою частиною. Дійсно, фахівця з електропостачання електропривод звичайно цікавить як споживач електроенергії, технолога або конструктора машин - як джерело механічної енергії, інженера, що розробляє або експлуатує АСУ, - як розвинений інтерфейс, що зв'язує його систему з технологічним процесом або системою електропостачання.

Практично всі процеси, пов'язані з механічною енергією, рухом, здійснюються електроприводом. Виняток становлять лише автономні транспортні засоби (автомобілі, літаки, деякі види рухомого складу, судів), що використовують неелектричні двигуни. У відносно невеликому числі промислових установок використовується гідропривід, ще рідше - пневмопривод.

Настільки широке, практично повсюдне поширення електропривода обумовлене особливостями електричної енергії - можливістю пересувати її на будь-які відстані, постійною готовністю до використання, легкістю перетворення в будь-які інші види енергії.

Сьогодні в приладових системах використовуються електроприводи, потужність яких складає одиниці мікромват; потужність електропривода компресора на перекачувальний газ станції - десятки мегават, тобто діапазон сучасних електроприводів по потужності перевищує  $10^{12}$ . Такого ж порядку й діапазон по частоті обертання: в установці, де витягаються кристали напівпровідників, вал двигуна повинен робити 1 оберт у кілька десятків годин при дуже жорстких вимогах до рівномірності руху; частота обертання шліфувального кола в сучасному гарному верстаті може досягати 150000 об/хв.

Але особливо широкий - безмежно широкий - діапазон застосувань сучасного електропривода: від штучного серця до крокуючого екскаватора, від вентилятора до антени радіотелескопа, від пральної машини до гнучкої виробничої системи. **Саме ця особливість - найтісніша взаємодія з технологічною сферою - надавала й надає на електроприводу могутній стимулюючий вплив.** Безупинно зростаючі вимоги з боку технологічних установок обумовлюють розвиток електропривода, удосконалювання його елементарної бази, його методології. У свою чергу розвиток електроприводу позитивно впливає на технологічну сферу, забезпечує нові, недоступні раніше можливості.

З енергетичної точки зору електропривод - **головний споживач електричної енергії**: сьогодні в розвинених країнах він споживає більше 60% всієї виробленої



електроенергії. В умовах дефіциту енергетичних ресурсів це робить особливо гострою проблему енергозбереження в електроприводі й засобами електропривода.

Фахівці вважають, що сьогодні заощадити одиницю енергетичних ресурсів, наприклад 1т умовного палива, удвічі дешевше, ніж її добути. Неважко бачити, що в перспективі це співвідношення буде змінюватися: добувати паливо стає усе суужніше, а запаси його всі убувають.

## **2. Загальні відомості про електричні машини.**

**Перший електропривод** у Росії розробив академік В. С. Якобі. У 1838 р. електродвигун змонтували на човні, що зумовило появу першого в світі електрохода. Моторний човен Якобі з 12—14 пасажирами, використовуючи як джерело електричної енергії батарею сухих елементів, розвивав проти течії на Неві середню швидкість 4 км/год. Спочатку потужність електродвигуна становила 550—736 Вт, а після вдосконалень (1839 р.) підвищилась у 3—4 рази. Висока вартість та мала потужність електричних джерел живлення були основними причинами того, що електроходи тоді не дістали широкого застосування. Для підтвердження цього достатньо сказати, що в той час 1 кВт • год. електричної енергії коштувала приблизно у 12 разів більше, ніж парова енергія. Практика вимагала більш економічних і потужних джерел електроенергії. Такими джерелами стали електричні генератори. Перший патент на електричний генератор з кільцевим якорем одержав у 1870 р. З. Грамм. Це поклало початок поширенню промислових електрогенераторів і електроприводів.

Коротко розглянемо історію розвитку електропривода в Росії. **У 1882 р. В. Н. Чиколєв**, засновник журналу «Електричество» (1880 р.), розробив електропривод для швейної машини, а в **1886 р.**— для вентилятора. Обидві конструкції електроприводів були удостоєні Золотих медалей на Всеросійських виставках. **У 1890—1894 рр. перші електроприводи** було встановлено на кораблях військово-морського флоту для повертання гарматних башт, рульових пристроїв, підйомників боєзарядів. Використання електроприводів на кораблях військово-морського флоту дало імпульс для їх промислового виготовлення. **У 1892 р електроприводи вперше було встановлено на міському транспорті (трамвай у м Києві).** Пізніше трамваї з електроприводами почали експлуатуватись в інших містах — Казані, Нижньому Новгороді, Москві (1903 р.), Петербурзі (1907 р.). В 1896 р. на підмосковних текстильних фабриках уже використовували електроприводи з двигунами постійного струму.

Для перших електроприводів властивим було використання двигунів постійного струму з редукторами та ручним керуванням комутаційними пристроями. На I Всеросійському електротехнічному з'їзді у Петербурзі в 1900 р. говорилось про використання електроприводів потужністю 4,4 і 6,6 кВт для поршневих насосів на Зирянівському руднику (Алтай). Перші шахтні підйомні установки, вентилятори, насоси з електроприводами почали використовувати на Донбасі ще в 1910 р., а в 1912 р. потужність електроустановок на шахтах Донбасу досягла 30 МВт.

Особливо швидкими темпами почав розвиватися електропривод з появою техніки використання **трифазного змінного струму**, розробленої М. О. Доливо-Добровольським (1889 р.). Прості, надійні та економічні асинхронні електродвигуни з короткозамкнутим ротором визначили необхідні умови для більш широкого використання їх у промисловості. В 1893 р. у Росії працювало 209 асинхронних електродвигунів сумарною потужністю 1,5 МВт. Винахід П. Н. Яблочковим і Н. Ф. Усагіним трансформаторів дав змогу вирішити проблему передачі електроенергії на великі відстані і сприяв розвитку електроприводів з двигунами змінного струму.

Поряд з виникненням промислових електроприводів, розвивалися теоретичні основи їх роботи. Ґрунтовною працею в цій області була праця **Д. А. Лачинова «Електромеханічна робота», опублікована в 1880 р.** У цій праці було дано класифікацію електричних машин постійного струму за системами збудження, математичні вирази механічних характеристик, досліджено питання живлення електродвигуна від автономного генератора.

Крім вирішення інженерних і наукових питань, дуже важливою умовою розвитку електропривода була підготовка інженерів-електротехніків, вперше розпочата в Електротехнічному інституті у Петербурзі в 1892 р. У цьому ж році в Харківському технологічному інституті було введено курс електротехніки. Подібний курс почали викладати в 1893 р. також у Петербурзькому гірничому інституті, а з 1901 р. у Петербурзькому і Київському політехнічних інститутах. Перший на Україні електротехнічний факультет було відкрито в Київському політехнічному інституті у 1918 р.

Важлива роль у розвитку електропривода та його автоматизації належить Харківському електромеханічному заводу (ХЕМЗ), заводське бюро досліджень якого переросло в центральну заводську лабораторію, а потім у великий науково-дослідний інститут.

Перший етап розвитку електропривода визначався протистоянням двох тенденцій — використанням трансмісійної чи одиночної систем електропривода. При трансмісійній системі електропривод приводив у дію єдину для групи механізмів трансмісію, від якої механічна енергія передавалась до окремих робочих машин (механізмів); при одиночній (індивідуальній) системі електропривода кожна робоча машина або механізм приводились у дію окремим електродвигуном. До початку 20-х років нашого століття одиночний електропривод в основному витіснив трансмісійну систему, основні недоліки якої полягали у великих габаритних розмірах, низьких ККД і надійності; труднощах експлуатації і регулювання режимів роботи окремих об'єктів тощо.

На першому етапі розвитку електропривода при оцінці його ефективності основна увага приділялась вартості самого електропривода і енергії його живлення. Такі важливі фактори як можливість інтенсифікації промислових процесів на його основі та поліпшення їх якісних характеристик не враховувались. Осмислення цих найважливіших переваг електропривода дало могутній поштовх для електрифікації промисловості, різкого поширення сфери використання електропривода як в Росії, так і за кордоном. *Так, сумарна потужність електродвигунів у СІІІА в 1909 р. становила 25,9 % сумарної потужності всіх двигунів країни, а в 1925 р. їх частка*

*вже досягла 70 %. Подібна тенденція мала місце також в Англії і Німеччині у 1927 р. У 1936 р. сумарна потужність електродвигунів у колишньому СРСР досягла 82 % потужності всіх двигунів.*

З розвитком одиночного електропривода та збільшенням потужності електродвигунів виникла тенденція розвитку також багатодвигунного електропривода, при якому на одній робочій машині розміщувалось кілька двигунів для приведення в дію різних елементів машини, наприклад двигуни подачі та різання у верстатах, вуглевидобувних машинах, індивідуальні приводи рольгангів прокатних станів тощо. Використання індивідуальних двигунів дало змогу спростити конструкцію механізмів, поліпшити їх надійність і техніко-економічні показники, а іноді й оптимізувати керування технологічними процесами.

На початку 20-х років нашого століття у промисловості країни використовували як правило імпортні електродвигуни та електроапаратуру, і лише в кінці 20-х та на початку 30-х років почали серійно випускати вітчизняні електроприводи (для конвейєрів, лебідок тощо). На початку 30-х років на Харківському електромеханічному заводі (ХЕМЗ) почали виготовляти пристрої для дистанційного (кнопкового) керування електроприводами, що стало основою наступного етапу розвитку електропривода — його автоматизації. Так, у 1932 р. ХЕМЗ виготовив релейно-контакторну апаратуру для реверсивного електропривода блюмінга потужністю 5,14 МВт, яка дала змогу автоматизувати процес керування. З 1934 р. вітчизняні магнітні пускачі для дистанційного керування виготовляли у комплекті з шахтними вибійними механізмами.

Починаючи з 30-х років, у колишньому СРСР почався масовий випуск металорізальних верстатів з багатодвигунними електроприводами і релейно-контакторною апаратурою керування. Тоді ж з'являються перші копіювальні верстати, автоматизовані на основі принципу керування за відхиленням, реалізованого за допомогою замкнутих систем автоматичного керування із зворотним зв'язком (системи автоматичного регулювання). Замкнуті системи автоматичного керування в 30-х роках отримують все більший розвиток. У довоєнні роки основна увага приділялась розвитку автоматизованого електропривода у важкій промисловості — металургійній, гірничій, а також у машинобудівній. Досить швидкими темпами розвивалась елементна база (безконтактні сельсини). У 1936 р. було виготовлено першу вітчизняну підйомну машину з редукторним електроприводом постійного струму за системою генератор - двигун (Г-Д) з контакторним керуванням. Для металургійної промисловості розробляли малоінерційні іонні електроприводи великої потужності.

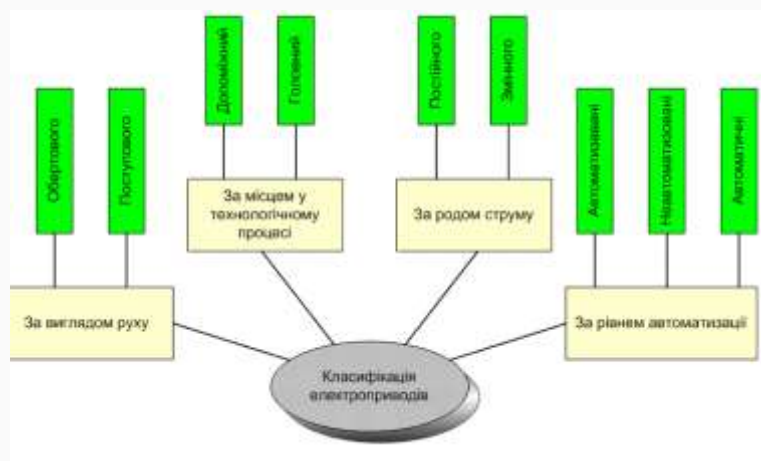
У другій половині 30-х років з'явилися автоматизовані електроприводи з асинхронними двигунами великої потужності для шахтних підйомних машин. На ХЕМЗ і було розроблено схеми й апаратуру автоматизованого пуску асинхронних електроприводів у функції струму і прискорення. В 1937 р. за Ф. І. Бутаєвим і М. В. Мартиновим було закріплено авторство на систему керування генератором постійного струму з декількома обмотками керування, що сприяло розвитку різних електромашинних підсилювачів (ЕМП). Використання ЕМП в автоматизованому електроприводі в багатьох випадках давало змогу замінити великогабаритні

релейно-контакторні схеми більш надійними, дістати потрібні характеристики при плавній зміні швидкості. Було розроблено системи електропривода з ЕМП з двокаскадними підсилювачами. ЕМП все більше використовувались у електроприводах підйомних машин, б'юмінгів, екскаваторів тощо. Потужність серійних ЕМП постійно зростала і досягала десятків кіловат. ЕМП застосовувались також в електроприводах змінного струму (для електродинамічного гальмування). Винахід і поширення ЕМП сприяли появі в автоматизованому електроприводі періоду електромашинної автоматики як нового ступеня його розвитку.

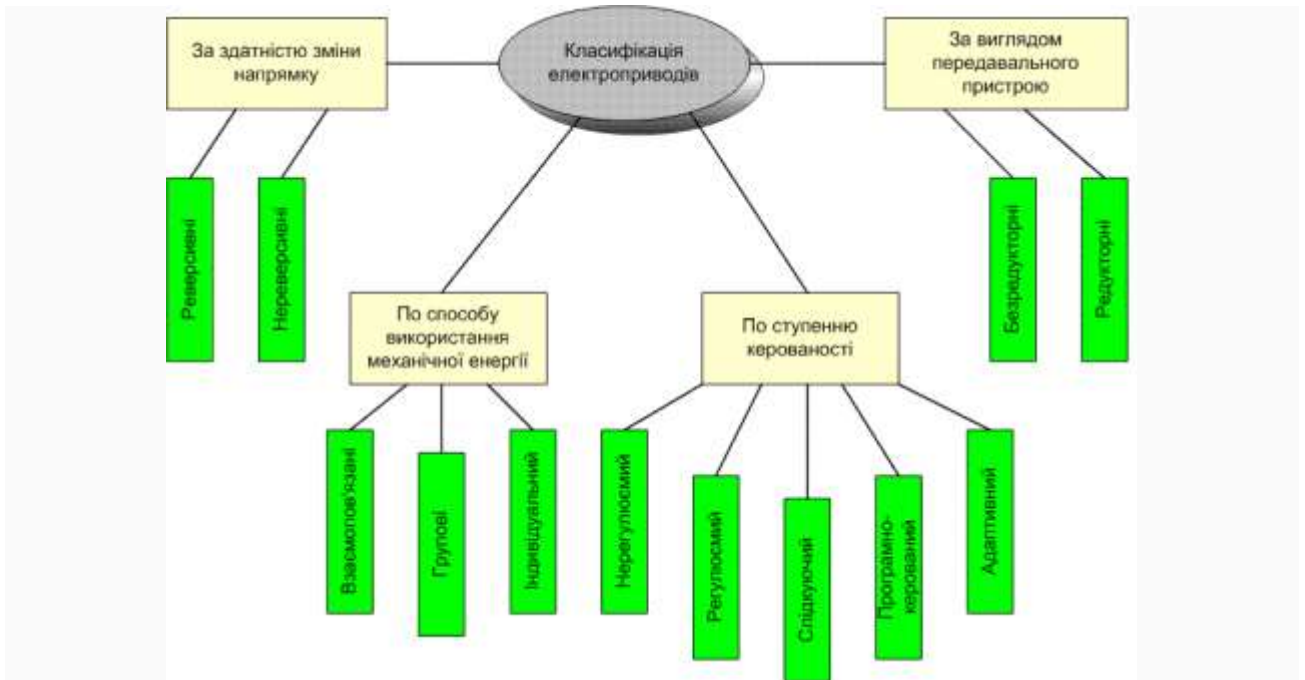
Велика Вітчизняна війна внесла корективи у розвиток електропривода як для потреб фронту, так і в наступний період відбудови народного господарства країни. У багатоплановому розвитку електропривода в цей і наступні періоди можна зазначити такі основні напрямки:

- постійне розширення сфери використання електропривода;
- збільшення сумарної потужності електроприводів і потужності окремих установок;
- розширення галузей використання регульованих електроприводів
- розвиток і вдосконалення елементної бази автоматизованого електропривода;
- розробка і розвиток теорії автоматизованого електропривода та зростання наукового і технічного рівня;
- розвиток електропривода як підсистеми автоматизованого керування технологічними процесами;
- розробка нових конструкцій електромеханічних перетворювачів (електродвигунів), підвищення їх надійності та техніко-економічних показників;
- поліпшення підготовки інженерних і наукових кадрів для обслуговування автоматизованого електропривода.

**З однієї сторони електроприводи можна класифікувати, як :**



**З іншої :**



**Рис. 1.2 Класифікація електроприводів**

## 1.2 Лекція №2

### Тема 2. Будова та принцип дії двигунів постійного струму.

#### План

1. Призначення та класифікація двигунів постійного струму.
2. Принцип дії ДПС.

#### 1. Призначення та класифікація двигунів постійного струму.

Розглянемо саму найпростішу механічну систему, що складається з ротора двигуна й безпосередньо пов'язаного з ним навантаження - робочого органа машини (рис. 2.1.). Незважаючи на простоту, система цілком реальна: саме так реалізована механічна частина ряду насосів, вентиляторів, багатьох інших машин. Далі в п. 2.2 показано, що до такої моделі може бути приведена механічна частина більшості електроприводів, розглянутих у курсі.

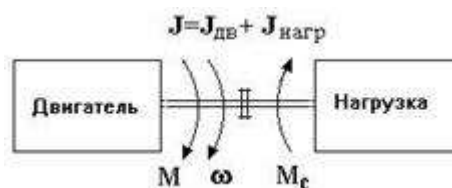


Рис. 2.1. Модель механічної частини

Будемо вважати, що до системи на рис. 2.1 прикладені два моменти - електромагнітний момент  $M$ , що розвивається двигуном, і момент  $M_c$ , створюваний навантаженням, а також втрати механічної частини (тертя); кожний момент має свою величину й напрямок. Рух системи визначається другим законом Ньютона:

$$\pm M \pm M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.1)$$

де  $\omega$  - кутова швидкість,  
 $J$  - сумарний момент інерції.

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{дин}}$$

Права частина рівняння (2.1) - *динамічний момент*. Він виникає, якщо алгебраїчна сума моментів  $M$  і  $M_c$  відмінна від нуля; величина й знак динамічного моменту визначають *прискорення*.

Режими, при яких  $\sum M = 0$ , тобто моменти  $M$  і  $M_c$  рівні по величині й протилежно спрямовані, називають *сталими* або *статичними*, їм відповідає, тобто моменти  $M$  і  $M_c$  рівні по величині й протилежно спрямовані, називають *сталими* або *статичними*, їм відповідає  $\omega = \text{const}$ , у тому числі  $\omega = 0$ .

Режими, коли  $\sum M \neq 0$ , називають *перехідними* або *динамічними* (прискорення, гальмування).

У рівнянні (2.1) момент  $M_c$  практично повністю визначається властивостями навантаження, а момент  $M$ , який можна прийняти за незалежну змінну, формується двигуном. Швидкість  $\omega$  - залежна змінна;  $\omega(t)$  визначається в динамічних режимах рішенням (2.1) для будь-яких конкретних умов, а в статичних режимах знаходиться з умови

$$\pm M(\omega) \pm M_c(\omega) = 0$$

## 2. Принцип дії ДПС.

Звичайно між двигуном і навантаженням знаходиться яка-небудь механічна передача (рис. 1.1, 1.2), тобто є кілька різних валів зі своїми моментами й швидкостями. Для зведення будь-якої реальної системи до найпростішої моделі на рис. 2.1 потрібно виконати ряд операцій, названих *приведенням* моментів і моментів інерції до деякого обраного в якості основного вала, звичайно - до вала двигуна. Іншими словами, деяку реальну механічну систему, наприклад, показану на рис. 2.2,а, потрібно помітити еквівалентною системою (рис. 2.2,б), такою, щоб ця заміна не відбилася на поведінці частини системи, залишеною незмінною (двигуна).

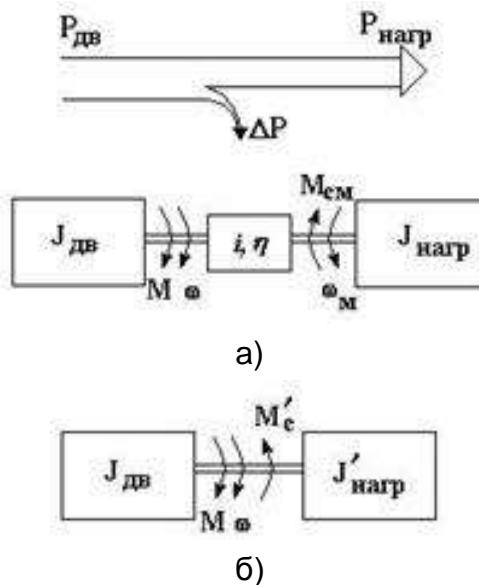


Рис. 2.2. До приведення  $M_{см}$  і  $J_{нав}$  до вала двигуна

Прийmemo наступні допущення: система жорстка, без зазорів; моменти інерції, що належать до основних валів, незмінні, що відносяться до проміжних валів, якщо

$$i = \frac{\omega}{\omega_M}$$

такі є, дорівнюють нулю; відношення  $i$  й ККД передачі  $\eta$ - постійні.

У реальній і приведеній системах повинні залишитися незмінної потужність, що розвиває двигуном  $M\omega$ , тобто в нашому випадку, коли втрати покриваються двигуном ( $M$  и  $\omega$  направлені згідно):

$$\frac{M_{CM}\omega_M}{\eta} = M'_C\omega$$

звідки

$$M'_C = \frac{M_{CM}}{i\eta} \quad (2.2)$$

Втрати завжди покриваються тією частиною системи, що створює рух, тому при зворотному потоці потужності - від навантаження до двигуна

$$M'_C = \frac{M_{CM}\eta}{i} \quad (2.2,a)$$

У реальній і наведеній системах повинні бути однакові запаси кінетичної енергії, тобто

$$\frac{J_{RE}\omega^2}{2} + \frac{J_{KAL}\omega_M^2}{2} = \frac{J_{RE}\omega^2}{2} + \frac{J'_{KAL}\omega^2}{2}$$

або

$$J'_{KAL} = \frac{J_{KAL}}{i^2} \quad (2.3)$$

Тут з метою спрощення ми не врахували втрати в передачах; це звичайно не приводить до великих погрешностей, якщо динамічні режими не відіграють визначальну роль у роботі приводу.

### 1.3 Лекція №3

**Тема 3. Електропривод ДПС. Механічні властивості та режими роботи ДПС з незалежним (паралельним) та послідовним збудженням.**

План

1. Основні рівняння
2. Характеристики й режими при незалежному збудженні,  $U=\text{const}$
3. Характеристики й режими при незалежному збудженні,  $I=\text{const}$
4. Характеристики й режими при послідовному збудженні

#### 1. Основні рівняння

Для одержання найпростішої моделі електропривода постійного струму, що описує сталі (статичні) режими й що дозволяє отримати основні характеристики, скористаємося схемою на рис. 3.1.

Будемо думати, що якірний ланцюг живиться від незалежного джерела з напругою  $U^*$ , опір ланцюга якоря  $R$  постійний, магнітний потік  $\Phi$  визначається лише струмом збудження й не залежить від навантаження (реакція якоря не проявляється), індуктивні параметри ланцюгів поки не враховуються, оскільки розглядаються лише сталі (статичні) режими.

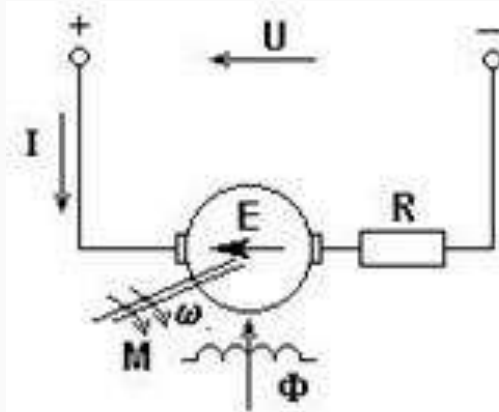


Рис. 3.1. Схема електропривода із двигуном постійного струму

Взаємодія струму  $I$  в обмотці якоря з магнітним потоком  $\Phi$ , створеним обмотками, розташованими на полюсах машини, приводить відповідно до закону Ампера й виникненню електромагнітних сил, що діють на активні провідники обмотки й, отже, електромагнітного моменту  $M$ :

$$M = k\Phi \quad (3.1)$$

де  $k$ - конструктивний параметр машини.

У провідниках обмотки якоря, що рухаються з кутовою швидкістю  $\omega$  в магнітному полі під дією моменту  $M$ , відповідно до закону Фарадея наводиться ЕРС обертання  $E$ :

$$E = k\Phi\omega, \quad (3.2)$$

спрямована в розглянутому випадку зустрічно стосовно причини, що викликала рух, - ЕРС джерела харчування  $U$ .

В відповідність із другим законом Кирхгоффа для якірного ланцюга машини справедливе рівняння:

$$U - E = IR. \quad (3.3)$$

Рівняння (3.1)-(3.3) - найпростіа, але достатня для розуміння головних процесів в електроприводі постійного струму модель. Для рішення практичних завдань вони повинні бути доповнені рівнянням руху з моментом втрат  $\Delta M$ , що входять у  $M_c$ ,

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

і рівняннями ланцюга збудження для конкретної схеми електропривода.

Зрозуміло, в умовах кожного завдання повинне бути строго обговорено, що задано й відомо, а що потрібно знайти.

Розглянемо докладніше роль, що грає ЕРС  $E$  в процесі перетворення енергії, здійснюваному електричною машиною. Якщо існував деякий сталий режим  $M_1 = M_{c1}$ ,



а потім  $M_c$  змінився, наприклад, зріс до величини  $M_{c2}$ , то для одержання нового сталого режиму необхідно мати засіб, що змінив б  $M$ , привівши його у відповідність із новим значенням  $M_c$ . У двигуні внутрішнього згорання цю роль виконає оператор, збільшивши подачу палива; у паровій турбіні - спеціальний регулятор, що збільшить подачу пари. В електричній машині цю роль виконає ЕРС. Дійсно, при зростанні  $M_c$  швидкість двигуна почне знижуватися, значить зменшиться відповідно до (3.2) і ЕРС (думаємо для простоти, що  $\Phi$ , а також  $U$  і  $R$  - постійні). З (3.3) треба, що

$$I = \frac{U - E}{R},$$

отже, струм виросте, обумовивши тим самим ріст моменту відповідно до (3.1). Двигун автоматично, без яких-небудь зовнішніх впливів перейде в новий сталий стан. Ці процеси будуть мати місце при будь-яких величинах і знаках  $M_c$ , тобто ЕРС буде виконувати функцію регулятора як у руховому, так і в гальмових режимах роботи машини.

## 2. Характеристики й режими при незалежному збудженні, $U = \text{const}$

При використанні в електроприводі постійного струму двигуна з незалежним збудженням - рис. 3.2 з живленням від джерела напруги  $U = \text{const}$  рівняння *електромеханічної характеристики*  $\omega(I)$  вийде підстановкою (3.2) в (3.3) і рішенням відносно  $\omega$ :

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi} \quad (3.4)$$

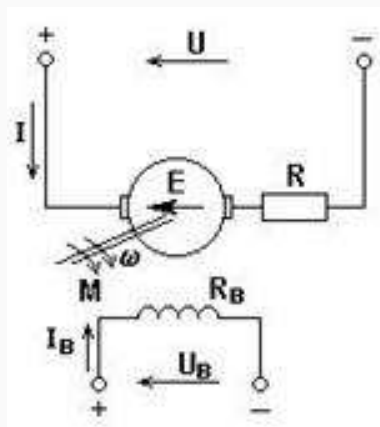


Рис. 3.2. Схема двигуна постійного струму незалежного порушення

Механічну характеристику  $\omega(M)$  отримаємо, підставивши в (3.4) струм, виражений з (3.1):

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR}{(k\Phi)^2} \quad (3.5)$$

При заданих  $U$ ,  $\Phi$  і  $R$  рівняння (3.4) і (3.5) однозначно визначають зв'язок між  $\omega$ ,  $I$  і  $M$  у будь-яких режимах. Характеристики  $\omega(M)$  й  $\omega(I)$  це прямі лінії, що проходять через дві характерні точки:  $M=0$ , це прямі лінії, що проходять через дві характерні точки:  $M=0$ ,  $\omega=\omega_0$  і  $\omega=0$ ,  $I=I_{кз}$ ,  $M=M_{кз}$ ; при  $\Phi = \text{const}$  вони розрізняються лише масштабами по осі абсцис.

Швидкість  $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$  (рис. 3.3) відповідає режиму ідеального холостого ходу :  $M=0$ ,  $E=U$  і спрямовані зустрічно.

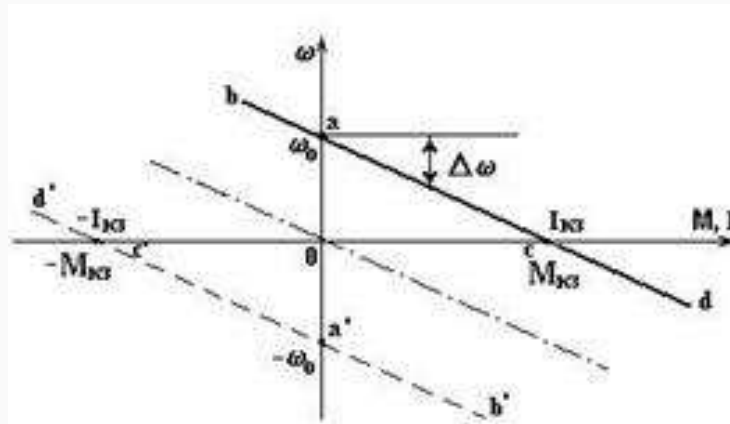


Рис. 3.3. Механічні (електромеханічні) характеристики електропривода постійного струму незалежного збудження при  $U = \text{const}$

$$\Delta\omega = \frac{MR}{(k\Phi)^2}$$

Величина  $\Delta\omega = \frac{MR}{(k\Phi)^2}$  - перепад швидкості під впливом навантаження.

Збільшенням навантаження за певних умов, які розглядаються нижче, можна прийти

до режиму короткого замикання :  $\omega = 0$ ,  $I = \frac{U}{R} = I_{к3}$ ,  $M = k\Phi I_{к3} = M_{к3}$ .

При зміні полярності  $U$  характеристика займе положення, показане на рис. 3.3 пунктиром. Ділянки характеристики між  $\omega_0$  і  $M_{к3}$ , де знаки  $\omega$  і  $M$  збігаються, відповідають, як було домовлено раніше, *руховому режиму* роботи; ділянки з різними знаками  $\omega$  й  $M$  - *гальмовим режимам*.

Гальмові режими - це генераторні режими, оскільки механічна енергія, що надійшла з вала машини, перетвориться в електричну й передається через електричні затискачі машини. Залежно від того, куди надходить електрична енергія, розрізняють три гальмових режими.

**а) Гальмування з віддачею енергії в мережу (рекуперативне) або генераторний режим роботи паралельно з мережею**

Якщо якір двигуна обертати від деякого стороннього джерела зі швидкістю, що перевищує швидкість ідеального холостого ходу, то ЕРС двигуна буде більше прикладеної напруги, у результаті чого струм у якорі двигуна й момент змінять свій знак. Механічна енергія, що надходить при цьому на вал двигуна, перетвориться в електричну й за винятком втрат у двигуні рекуперується в мережу.

На механічних характеристиках гальмуванню з віддачею енергії в мережу відповідають ділянки  $ab$  і  $a'b'$  (рис. 3.3)

**б) Гальмування противмикання або генераторний режим роботи послідовно з мережею**

У режимі противмикання змінює знак швидкість двигуна при збереженні знака моменту або знак моменту двигуна при збереженні знака швидкості.

Перший випадок має місце при впливі активного моменту статичного навантаження, що перевищує момент короткого замикання на даній характеристиці.

У результаті зміни знака швидкості ЕРС двигуна буде збігатися із прикладеною напругою, і струм у якорі визначиться виразом:

$$I = \frac{U + E}{R}$$

Другий випадок використовується для зупинки двигуна шляхом зміни полярності напруги, що підводиться до його якоря.

Внаслідок механічної інерції швидкість двигуна й ЕРС у початковий момент зберігаються незмінними, а струм буде дорівнює:

$$I = \frac{-U - E}{R}$$

На механічних характеристиках (рис. 3.3) гальмуванню противмикання відповідають ділянки  $cd$  і  $c'd'$ .

У режимі гальмування противовмиканням енергія надходить у привод і з боку механізму, і від мережі й розсіюється в опорах якорного ланцюга; у попередньому випадку енергія, що надходить від механізму, передавалася в мережу.

в) **Динамічне гальмування або генераторний режим роботи незалежно від мережі**

Якщо якорний ланцюг відключений від джерела живлення й замкнутий на зовнішній резистор, то при обертанні двигуна від зовнішнього джерела або по інерції

$$I = -\frac{E}{R}$$

в якорному ланцюзі індукуються ЕРС і протікає струм, що створює момент. Характеристики проходять через початок координат - штрих-пунктир на рис. 3.3.

### 3. Характеристики й режими при незалежному збудженні, $I = \text{const}$

У ряді застосувань якорний ланцюг двигуна постійного струму незалежного збудження живиться не від джерела напруги, як у попередньому випадку, а від джерела струму ( $I = \text{const}$ ) - рис. 3.4. При цьому, природно, зберігають силу фундаментальні співвідношення (3.1)-(3.3), однак властивості електропривода радикально змінюються.

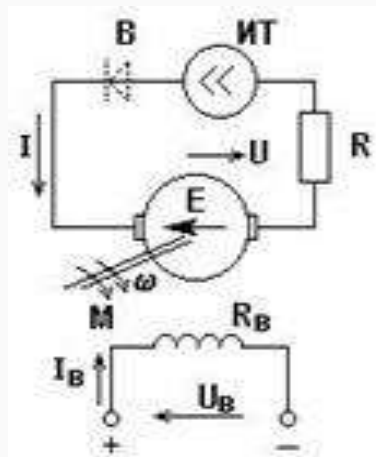


Рис. 3.4. Схема двигуна постійного струму незалежного збудження при живленні від джерела струму

Електромеханічна  $\omega(I)$  й механічна  $\omega(M)$  механічна  $\omega(M)$  характеристики представлені тепер вертикальними прямими (рис. 3.5)

$$I = \text{const} \quad (3.6)$$

i

$$M = k\phi = \text{const} \quad (3.7)$$

i привод здобуває нову властивість “джерела моменту”. Це пов’язане з тим, що джерело живлення - джерело струму - нейтралізує дію ЕРС, воно тепер уже не грає ролі внутрішнього регулятора й не впливає на швидкість. У свою чергу, напругу  $U$  стає залежною змінною

$$U = E + IR = k\Phi\omega + IR, \quad (3.8)$$

i характеристика  $\omega(U)$  (рис. 3.5) визначає енергетичні режими роботи електропривода.

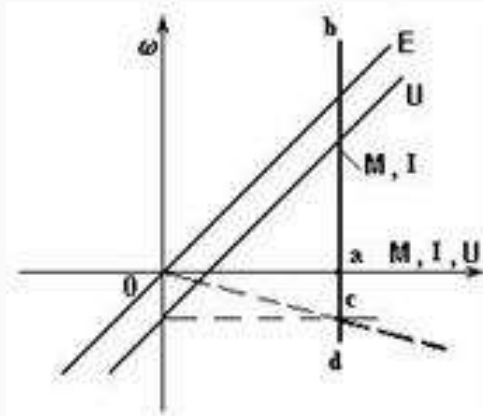


Рис. 3.5. Характеристики електропривода при живленні якоря від джерела струму

Режиму ідеального холостого ходу немає в розглянутій структурі - “джерело моменту”.

Руховий режим відповідає ділянці  $ab$  в I квадранті:  $M\omega > 0$ , тобто механічна енергія надходить до споживача - технологічній машині,  $UI > 0$  - електрична енергія надходить до свого споживача - двигуну.

Режим короткого замикання - точка  $a$ , тут  $E = 0$  і  $U = IR$ .

На ділянці  $ac$   $M\omega < 0$ , тобто механічна енергія надходить від технологічної машини й, перетворюючись в електричну, передається в якірний ланцюг; як і раніше  $UI > 0$  - електрична енергія від джерела струму також надходить у якірний ланцюг. Цей режим ми визначили раніше як гальмування протидвиженням.

У точці з  $U = 0$  - режим динамічного гальмування: вся механічна енергія, що надійшла, розсіюється в опорах якірного ланцюга.

І, нарешті, на ділянці  $cd$   $M\omega < 0$  і  $UI < 0$  - рекуперативне гальмування, якщо джерело струму дозволяє передати енергію в мережу. Якщо джерело струму має однобічну провідність (пунктир на рис. 3.4) цього режиму не буде, і електропривод буде продовжувати працювати в режимі динамічного гальмування (пунктир на рис. 3.5).

#### 4 Характеристики й режими при послідовному збудженні

В електроприводах постійного струму іноді використовуються двигуни з послідовним збудженням, коли спеціально виконана обмотка збудження включена послідовно з обмоткою якоря - рис. 3.6

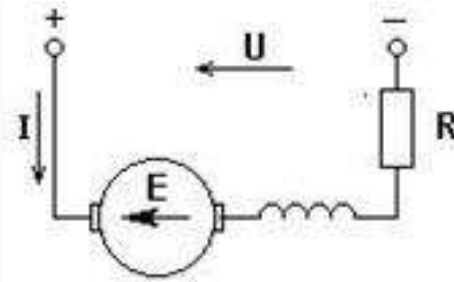


Рис. 3.6. Схема двигуна постійного струму послідовного збудження

Для двигуна послідовного збудження, як і для інших двигунів постійного струму при живленні якоря від джерела напруги ( $U = \text{const}$ ), справедливі рівняння (3.4) і (3.5), однак, якщо для двигуна незалежного збудження потік не залежить від струму навантаження, то для двигуна послідовного збудження потік є функцією струму навантаження.

Залежність  $\Phi = \varphi(I)$  - характеристика намагнічування - не має простого аналітичного вираження, її зразковий вид зображений на рис. 3.7.

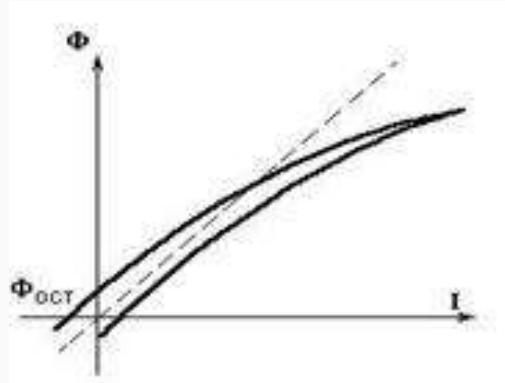


Рис. 3.7. Характеристика намагнічування машини постійного струму

У першому наближенні залежність між швидкістю двигуна й моментом, що розвивають їм, у сталому режимі можна знайти в припущенні, що потік збудження й струм у якорі двигуна зв'язані між собою лінійною залежністю (пунктир на рис. 3.7):

$$\Phi = \alpha I$$

Тоді

$$\omega = \frac{U}{k\alpha I} - \frac{R}{k\alpha}$$

а оскільки

$$M = k\Phi = k\alpha I^2,$$

те

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{k\alpha M}} - \frac{R}{k\alpha}$$

Таким чином, при зробленому допущенні механічна характеристика двигуна послідовного збудження зображується гіперболою (рис. 3.8); однієї з її асимптот є вісь ординат, а іншої - пряма, паралельна осі абсцис,

$$\omega = -\frac{R}{k\alpha}$$

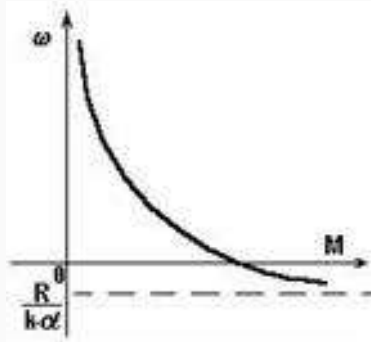


Рис. 3.8. Механічна характеристика двигуна послідовного збудження

$$\beta = \frac{dM}{d\omega}$$

Жорсткість механічної характеристики двигуна послідовного збудження змінна й зростає зі збільшенням навантаження.

Отримані рівняння дають лише загальне уявлення про характеристики електропривода із двигуном послідовного збудження, тому що в дійсності магнітна система машин насичена й крива намагнічування досить далека від прямої. Тому в практичних цілях звичайно користуються універсальними характеристиками для серії

$$\omega^* = \frac{\omega}{\omega_H}, I^* = \frac{I}{I_H}, M^* = \frac{M}{M_H}; \omega_H,$$

машин - рис. 3.9, побудованими у відносних величинах  $I_H$  і  $M_H$  - номінальні величини двигуна,  $R_{\text{дод}} = 0$ .

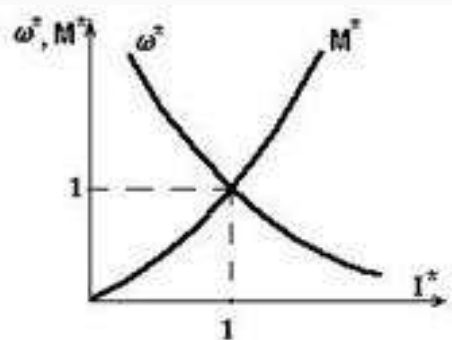


Рис. 3.9. Характеристики двигуна послідовного збудження в відносних величинах

Електропривод із двигунами послідовного збудження в нормальній схемі ( $U = \text{const}$ ) може працювати в тих же енергетичних режимах, що й привод із двигунами незалежного порушення, за винятком режиму ідеального холостого ходу й генераторного режиму паралельно з мережею (рекуперативне гальмування), оскільки при навантаженні, що прагне до нуля, до нуля прагне й магнітний потік, вісь  $\omega$  - асимптот механічної характеристики.

Деякі особливості при послідовному збудженні має режим динамічного гальмування. Якщо якор обертової машини відключити від джерела напруги й замкнути на зовнішній резистор (рис. 3.10, схема ліворуч), то під дією потоку залишкового магнетизму ( $\Phi_{\text{ост}}$  на рис. 3.7) у провідниках якоря виникає деяка ЕРС  $E_{\text{ост}}$ , що спричинить в замкнутому ланцюзі струм. Цей струм, протікаючи по обмотці збудження у зворотному проти вихідного напрямку розмагнітить машину ( $\Phi = 0$ ) і гальмового моменту створено не буде.

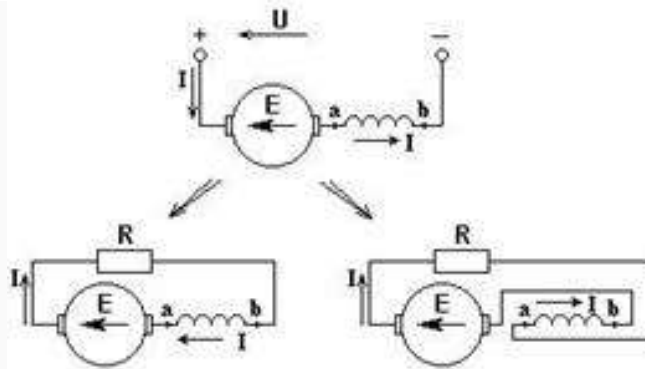


Рис. 3.10. До режиму динамічного гальмування із самозбудженням

Для того, щоб отримати гальмовий момент, струм, створений  $E_{ост}$ , повинен протікати в тім же, що й раніше, напрямку, підсилюючи магнітний потік, тобто створюючи самозбудження. Ця умова виконається, якщо при переході на режим гальмування переключити обмотку збудження як показано на рис. 3.10, схема праворуч.

Струм, створюваний ЕРС, що збільшується, змінить знак, момент буде спрямований проти руху, тобто стане гальмовим.

Робота машини постійного струму із самозбудженням можлива лише за певних умов, а саме при таких значеннях швидкості й опору  $R$  ланцюга якоря, щоб мало місце рівність

$$E = IR, \quad (3.11)$$

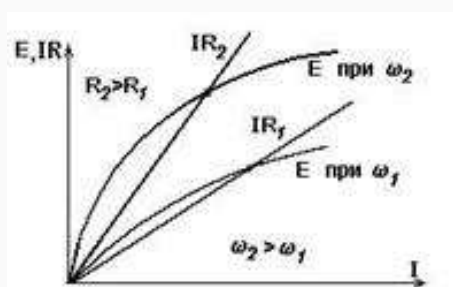
Існуванню цієї рівності відповідає наявність точки перетинання кривих  $E = \varphi(I)$  (при даній швидкості) і прямої  $IR = f(I)$  - рис. 3.11. Очевидно, що чим більше  $R$ , тим при більшій швидкості відбудеться самозбудження машини.

Найменша швидкість, при якій машина може самозбуджуватися, буде при  $R_{дод} = 0$ , тобто при замкнутій накоротко якорному ланцюгу машини.

Побудування характеристики в режимі динамічного гальмування при самозбудженні можна зробити, виходячи з рівняння балансу потужностей.

Потужність, що розвиває двигуном у режимі динамічного гальмування, цілком розсіюється в опорах якорного контуру, тобто  $(-I)^2 R = -M\omega$ , звідки

$$\omega = -\frac{I^2 R}{M}. \quad (3.12)$$



а)



б)

Рис. 3.11. Характеристики динамічного гальмування з самозбудженням

Знаючи  $R$  і задаючись струмом  $I$ , по універсальній характеристиці визначають відповідному цьому струму момент  $M$ , обчислюють швидкість  $\omega$  і т.д. Характер

залежної  $\omega(M)$  в гальмовому режимі при самозбудженні зображений на рис. 3.11,б.

В електроприводах постійного струму іноді використовуються двигуни змішаного збудження, що мають дві обмотки збудження, одна йз яких включена послідовно в якірний ланцюг, а інша має незалежне живлення.

Двигуни послідовного збудження можуть отримувати живлення не тільки від джерела напруги, що було розглянуто вище, але й від джерела струму. Оскільки при цьому магнітний потік буде незмінним, зберігаються й основні властивості електропривода, розглянуті раніше.

## 1.4 Лекція №4

### Тема 4. Регулювання частоти обертання ДПС НЗ.

#### План

1. Прості моделі асинхронного електропривода
2. Механічні характеристики. Енергетичні режими
3. Номінальні дані

#### 1. Прості моделі асинхронного електропривода

Принцип дії асинхронної машини в самому загальному виді полягає в наступному: один з елементів машини - статор використовується для створення магнітного поля, що рухається з певною швидкістю, а в замкнених провідних пасивних контурах іншого елемента - ротора наводяться ЕРС, що викликають протікання струмів і утворення сил (моментів) при їхній взаємодії з магнітним полем. Всі ці явища мають місце при несинхронному - асинхронному русі ротора відносно поля, що й дало машинам такого типу назва - асинхронні.

Статор звичайно виконаний у вигляді декількох розташованих у пазах котушок, а ротор - у вигляді "білячої клітки" (короткозамкнений ротор) або у вигляді декількох котушок (фазний ротор), які з'єднані між собою, виведені на кільця, розташовані на валу, і за допомогою ковзних по них щіток можуть бути замкнуті на зовнішні резистори.

Незважаючи на простоту фізичних явищ і реалізуючих їх конструктивів повний математичний опис процесів в асинхронній машині досить складний:

по-перше, всі напруги, струми, потокозчкплення - змінні, тобто характеризуються частотою, амплітудою, фазою або відповідними векторними величинами;

по-друге, взаємодіють контури, що рухаються, взаємне розташування яких змінюється в просторі;

по-третє, магнітний потік нелінійно пов'язаний зі струмом, що намагнічує (проявляється насичення магнітного ланцюга), активні опори роторного ланцюга залежать від частоти (ефект витиснення струму), опори всіх ланцюгів залежать від температури й т.п.

Розглянемо найпростішу модель асинхронної машини, придатну для пояснення основних явищ в асинхронному електроприводі.



### Принцип одержання двигунного магнітного поля

Нехай на статорі розташований виток (катушка) А-Х (рис. 4.1,а,б), по якому протікає змінний струм  $i = I_m \sin \omega t$ ;  $\omega = 2\pi f_1$ . МРС  $F_A$ , створена цим струмом, буде пульсувати по осі витка

$$F_A = F_m \sin \omega t$$

(горизонтальні штрихові стрілки на рис. 4.1,в). Якщо додати виток (катушку) В-У, розташований під кутом  $90^\circ$  до А-Х, і пропускати по ньому струм  $i = I_m \cos \omega t$ , то МРС  $F_B$  буде пульсувати по осі цього витка (вертикальні стрілки):

$$F_B = F_m \cos \omega t.$$

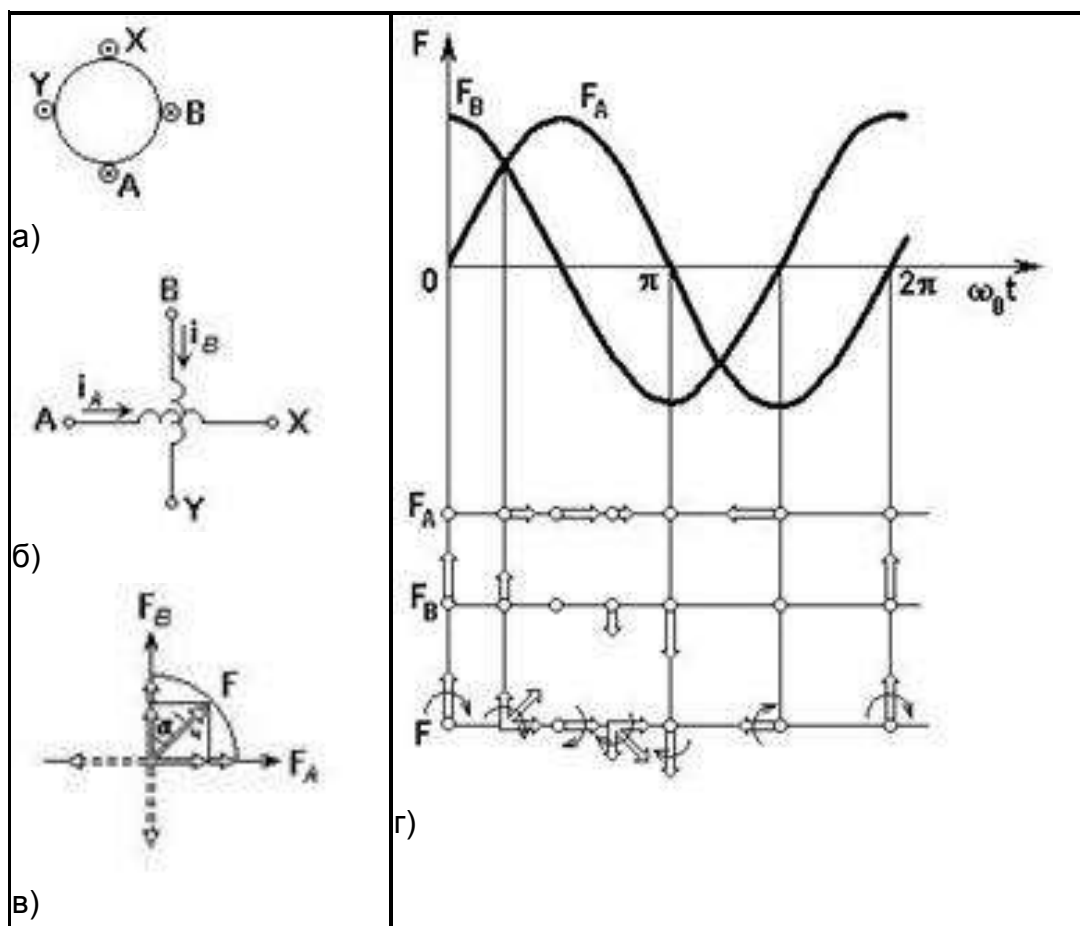


Рис. 4.1. До утворення обертового магнітного поля в машині

Вектор результуючої МРС має модуль

$$F = \sqrt{F_A^2 + F_B^2} = F_m = \text{const.}$$

Його фаза визначиться з умови

$$\text{tg} \alpha = \frac{F_A}{F_B} = \text{tg} \omega t$$

Таким чином, вектор результуючої МРС при прийнятих умовах, тобто при зрушенні двох витків у просторі в  $\frac{\pi}{2}$  і при зрушенні струмів у часі на  $\frac{\pi}{2}$  і при зрушенні

струмів у часі на  $\frac{\pi}{2}$ , обертається з кутовою швидкістю, обертається з кутовою швидкістю  $\omega = 2\pi f_1$ , де  $f_1$  - частота струмів у витках.

У загальному випадку для машини, що має  $p$  пар полюсів ( $p=1,2,3\dots$ ), синхронна кутова швидкість  $\omega_0$ , рад/с, тобто швидкість поля, визначиться як

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}; \quad (4.1)$$

для частоти обертання  $n_0$ , об/хв, будемо мати:

$$n_0 = \frac{60f_1}{p}, \quad (4.2)$$

т. є. при живленні від мережі  $f_1=50$ Гц синхронна частота обертання може бути 3000, 1500, 1000, 750, 600... про/хв залежно від конструкції машини.

Вирази (4.1) і (4.2) мають принципний характер: вони показують, що для даної машини є лише одна можливість змінювати швидкість поля - змінювати частоту джерела живлення  $f_1$ .

### Процеси при $\omega = \omega_0$

Нехай ротор обертається зі швидкістю  $\omega_0$ , тобто його обмотки не перетинають силових ліній магнітного поля й він не робить істотного впливу на процеси.

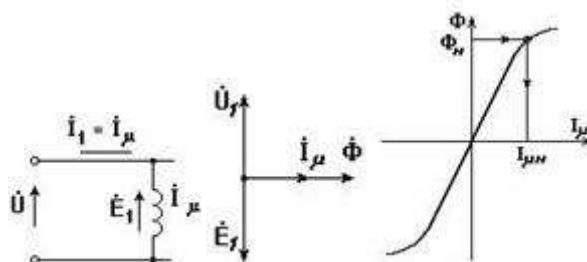
У досить грубому, але іноді корисному наближенні можна представити обмотку фази статора як деяку ідеальну котушку, до якої прикладене змінна

напряга  $u_1 = U_m \sin \omega t$ . Ми будемо далі або позначати його й інші синусоїдальні змінні відповідними заголовними буквами, якщо інтерес представляють лише їхні діючі значення, або будемо додавати крапку вгорі, показуючи тим самим, що мова йде про часовий вектор, що має амплітуду. Ми будемо далі або позначати його й інші синусоїдальні змінні відповідними заголовними буквами, якщо інтерес представляють лише їхні діючі значення, або будемо додавати крапку вгорі, показуючи тим самим, що мова йде про часовий вектор, що має амплітуду  $U_m = \sqrt{2}U$  й фазу  $\varphi$ .

Очевидно, що прикладена напряга  $\dot{U}_1$  зрівноважується ЕРС самоіндукції зрівноважується ЕРС самоіндукції  $\dot{E}_1$  (рис. 4.2, а, б)

$$E_1 = 4,44\Phi f_1 w_1 k_{об}, \quad (4.3)$$

де  $w$  - число витків обмотки;  $k_{об}$  - коефіцієнт, що залежить від конкретного виконання обмотки.



а) б) в)

Рис. 4.2. Ідеалізована модель асинхронної машини при  $\omega = \omega_0$  (а), векторна діаграма (б) і крива намагнічування (в)

Можна приблизно вважати, що магнітний потік визначається прикладеною напругою, частотою й параметрами обмотки:

$$\Phi_{\approx} \frac{U_1}{4,44f_1w_1k_{\phi}} \equiv \frac{U_1}{f_1} \quad (4.4)$$

Струм в обмотці (фазі) статора - струм намагнічування визначиться при цьому лише магнітним потоком і характеристикою намагнічування машини (рис. 4.2,в):

$$I_1 = I_{10} = I_{\mu}$$

У серійних машинах при  $U_1=U_{1н}$  і  $f_1=f_{1н}$ , тобто при номінальному магнітному потоці струм холостого ходу  $I_{10}$  становить звичайно 30% - 40% від номінального струму статора  $I_{1н}$ .

### Процеси під навантаженням

При навантаженні вала  $\omega \neq \omega_0$ ; відмінність швидкостей  $\omega$  і  $\omega_0$  прийнято характеризувати ковзанням

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \quad (4.5)$$

Тепер у роторному ланцюзі з'явиться ЕРС  $E'_2$ , наведена за законом електромагнітної індукції й рівна

$$E'_2 = E_1 s; \quad (4.6)$$

штрихом тут і далі відзначені наведені величини, що враховують неоднаковість обмоток статора й ротора. Частота наведеної ЕРС становить

$$f_2 = f_1 s \quad (4.7)$$

Струм  $I_2'$  у роторному ланцюзі, що володіє опором  $R_2'$  і індуктивністю  $L_2'$ , визначиться як

$$I_2' = \frac{E'_2}{\sqrt{(R_2')^2 + (2\pi f_2 L_2')^2}}$$

або після простих перетворень

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_2'/s)^2 + (X_2')^2}}, \quad (4.8)$$

де  $X_2'$  - індуктивний опір розсіювання вторинного ланцюга при частоті  $f_1$ .

Ми одержали рівняння, що відповідає традиційній схемі заміщення фази асинхронного двигуна - мал. 4.3, у якій враховані й параметри статора  $R_1$  і  $X_1$ . Ця проста модель придатна для аналізу сталих режимів при симетричному живленні із симетричним живленням.

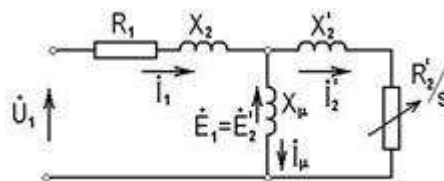


Рис. 4.3. Схема заміщення фази асинхронного двигуна

## 2. Механічні характеристики. Енергетичні режими

Для одержання механічної характеристики ще більше спростимо модель - винесемо контур намагнічування на затискачі - рис. 4.4,а, як це часто робиться в курсі електричних машин.

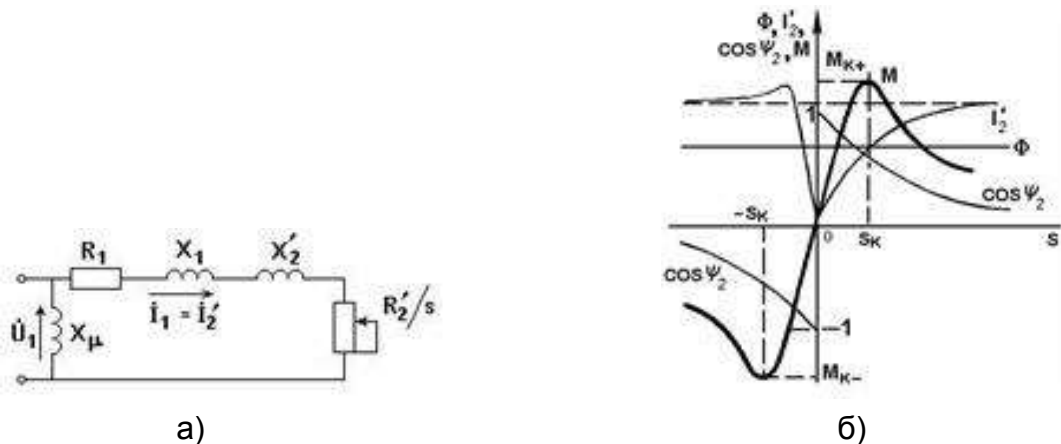


Рис. 4.4. Спрощена схема заміщення (а) і характеристики асинхронної машини (б)

Оскільки

$$M = k\Phi I_{2a} = k\Phi I_2 \cos \psi_2,$$

де  $I_{2a}$  - активна складова струму ротора,

$\psi_2$  - кут між  $\vec{E}_2$  і  $\vec{I}_2$ ,

якісне подання про механічну характеристику  $M(s)$  можна одержати, простеживши залежність кожного із трьох співмножників від  $s$ .

Магнітний потік  $\Phi$  у першому наближенні відповідно до (4.4) не залежить від  $s$  - рис.

4.4,б. Струм ротора (4.8) дорівнює нулю при  $s = 0$  і асимптотично прагне до  $\frac{U_1}{X_2'}$  при  $s \rightarrow \pm\infty$  - рис. 4.4,б. Останній співмножник легко визначити за схемою заміщення:

$$\cos \psi_2 = \frac{R_2'/s}{\sqrt{(R_2'/s)^2 + (X_2')^2}};$$

$\cos \psi_2$  близький до  $\pm 1$  при малих  $s$  і асимптотично прагне до нуля при  $s \rightarrow \pm\infty$ . Момент, як добуток трьох співмножників, дорівнює нулю при  $s = 0$  ( $\omega = \omega_0$  - ідеальний холостий хід), досягає позитивного  $M_{K+}$  і негативного  $M_{K-}$  максимумів - критичних значень при деяких критичних значеннях ковзання  $\pm s_{K*}$ , а потім при  $s \rightarrow \pm\infty$  прагне до нуля за рахунок третього співмножника.

Рівняння механічної характеристики одержимо, дорівнявши втрати в роторному ланцюзі, виражені через механічні й через електричні величини. Потужність, споживана з мережі, якщо зневажити втрати в  $R_1$ , приблизно дорівнює електромагнітній потужності:

$$P_1 \approx P_{em} = M\omega_0,$$

а потужність на валу визначається як

$$P_2 = M\omega.$$

Втрати в роторному ланцюзі складуть

$$\Delta P_2 = P_1 - P_2 \approx M\omega_0 - M\omega = M\omega_0 s = P_1 s \quad (4.9)$$

або при вираженні їх через електричні величини

$$\Delta P_2 = 3(I_2')^2 R_2'$$

звідки

$$M = \frac{3(I_2')^2 R_2'}{\omega_0 s}$$

Підставивши в останнє вираження  $I_2'$  з (4.8) і знайшовши екстремум функції  $M=f(s)$  і відповідні йому  $M_k$  і  $s_k$ , будемо мати:

$$M_{\text{max}} = \frac{2M_x(1+as_x)}{\frac{s}{s_x} + \frac{s_x}{s} + 2as_x} \quad (4.10)$$

де  $a=R_1/R_2'$ :

$$M_x = \frac{3U^2}{2\omega_0 \left[ R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}; \quad (4.11)$$

$$s_x = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (4.12)$$

На практиці іноді думають, що  $a = 0$ , тобто зневажають активним опором обмоток статора. Це звичайно не приводить до істотних погрешностей при  $P_n > 5$  квт, однак може не виправдано погіршити модель при малих потужностях. При  $a = 0$  вираження (4.10) - (4.12) мають вигляд:

$$M = \frac{2M_x}{\frac{s}{s_x} + \frac{s_x}{s}}; \quad (4.10,a)$$

$$M_x = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 X_k}; \quad (4.11,a)$$

$$s_x = \frac{R_2'}{X_k}, \quad (4.12,a)$$

де  $X_k = X_1 + X_2'$  - індуктивний опір розсіювання машини.

У рівнянні (4.10,a) при  $s \ll s_k$  можна зневажити першим членом у знаменнику й одержати механічну характеристику на робочій ділянці у вигляді

$$M \approx \frac{2M_x s}{s_x}. \quad (4.13)$$

Як свідчить з мал. 4.4,б і виразів (4.10) і (4.10,a), жорсткість механічної характеристики асинхронних двигунів перемінна, на робочій ділянці  $\beta < 0$ , а при  $s(>s_{кр})$  - позитивна.

Асинхронний електропривод як і електропривод постійного струму, може працювати в руховому й трьох гальмових режимах з таким же, як в електроприводі постійного струму розподілом потоків енергії - рис. 4.5.

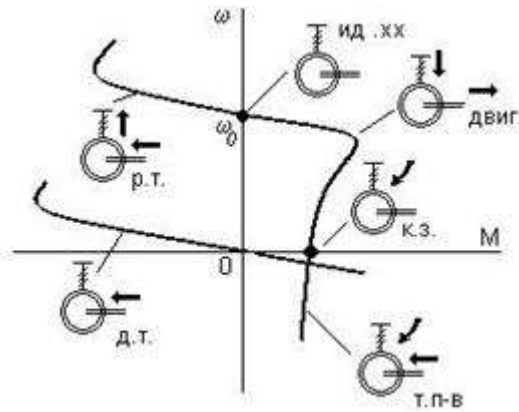


Рис. 4.5. Енергетичні режими асинхронного електропривода

Рекуперативне гальмування (р.г.) здійснюється при обертанні двигуна активним моментом зі швидкістю  $\omega > \omega_0$ . Цей же режим буде мати місце, якщо при обертанні ротора зі швидкістю  $\omega$  зменшити швидкість обертання поля  $\omega_0$ . Роль активного моменту тут буде виконувати момент інерційних мас обертального ротора.

Для здійснення гальмування противмикання (г.п-в) необхідно поміняти місцями дві будь-які фази статора - рис. 4.6. При цьому міняється напрямок обертання поля, машина гальмується в режимі противовмикання, а потім реверсується.

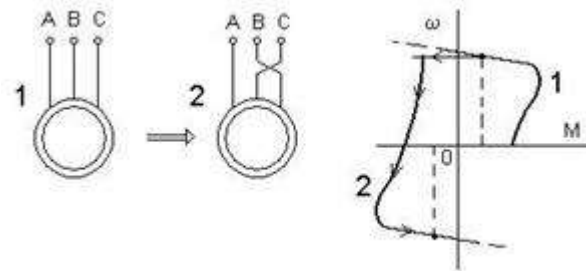


Рис. 4.6. Реверс асинхронного двигуна

Специфічним є режим динамічного гальмування, що представляє собою генераторний режим відключеного від мережі змінного струму асинхронного двигуна, до статора якого підведений постійний струм  $I_n$ . Цей режим застосовується в ряді випадків, коли після відключення двигуна від мережі потрібно його швидко зупинка без реверса.

Постійний струм, що підводиться до обмотки статора, утворить нерухоме в просторі поле. При обертанні ротора в його обмотці наводиться змінна ЕРС, під дією якої протікає змінний струм. Цей струм створює також нерухоме поле.

Складаючись, полюси статора й ротора утворюють результуюче поле, у результаті взаємодії з яким струму ротора виникає гальмовий момент. Енергія, що надходить із вала двигуна, розсіюється при цьому в опорах роторного ланцюга.

У режимі динамічного гальмування поле статора нерухоме ковзання записується як

$$s = \frac{\omega}{\omega_0}$$

і справедливі співвідношення для механічної характеристики аналогічні (4.10,а) - (4.12,а):

$$M = \frac{2M_{x,r}}{\frac{s}{s_{x,r}} + \frac{s_{x,r}}{s}}, \quad (4.14)$$

$$M_{x,r} = \frac{3I_{\text{вх}}^2 X_{\mu}^2}{2\omega_0 (X_{\mu} + X_2')}, \quad (4.15)$$

де  $I_{\text{вх}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{\text{н}}$  при з'єднанні обмоток статора в зірку

і  $I_{\text{вх}} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_{\text{н}}$  при з'єднанні обмоток статора в трикутник;

$$s_{x,r} = \frac{R_2'}{X_{\mu} + X_2'} \quad (4.16)$$

Тому що при ненасиченій машині  $X_{\mu} \gg X_2'$ , критичне ковзання в режимі динамічного гальмування  $s_{к.г}$  істотно менше  $s_{к.}$ .

### 3. Номінальні дані

В паспорті асинхронного двигуна звичайно зазначені номінальні лінійні напруги при з'єднанні обмоток у зірку й трикутник  $\frac{U_{1\Delta}}{U_{\text{зд}}}$ , струми, струми  $\frac{I_{1\Delta}}{I_{1\Delta}}$ , частота  $f_{1\text{н}}$ , потужність на валу  $P_{\text{н}}$ , частота обертання  $n_{\text{н}}$ , ККД, частота  $f_{1\text{н}}$ , потужність на валу  $P_{\text{н}}$ , частота обертання  $n_{\text{н}}$ , ККД  $\eta_{\text{н}}$ ,  $\cos \phi_{\text{н}}$ .

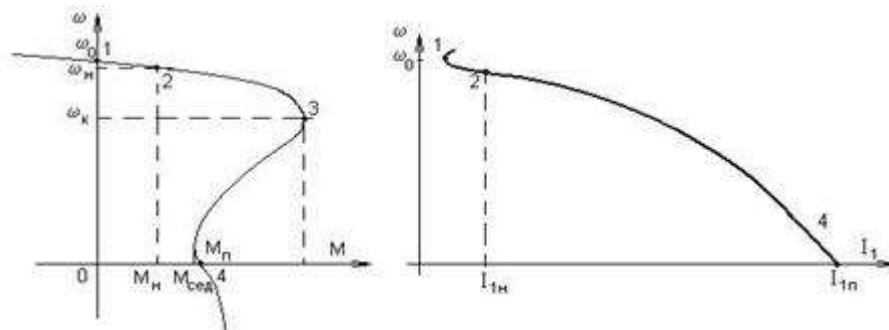
Для двигунів з короткозамкненим ротором у каталозі приводяться кратності

пускового струму  $k_I = \frac{I_{1\text{п}}}{I_{1\text{н}}}$ , пускового моменту, пускового моменту  $k_M = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}}$ ,

критичного моменту, критичного моменту  $\lambda = \frac{M_{\text{к}}}{M_{\text{н}}}$ , іноді - типові природні характеристики.

Для двигунів з фазним ротором указується ЕРС на розімкнутих кільцях загальмованого ротора  $E_{2\text{н}}$  при  $U_{1\text{н}}$  і номінальний струм ротора  $I_{2\text{н}}$ .

Приводять у каталозі даних недостатньо, щоб визначити по них параметри схеми заміщення й користуватися їй при всіх розрахунках, однак за каталожними даними можна побудувати природну електромеханічну й механічну характеристики, скориставшись декількома опорними точками - рис. 4.7.



а) б)

Рис. 4.7. До побудови природних характеристик асинхронного двигуна з к.з. ротором

Точка 1 ( $\omega = \omega_0, M = 0, I_1 = I_{xk} \approx 0,35I_{1k}$ ) вийде з ряду  $n_0 = 3000, 1500, 1000, 750, 600$  про/хв як найближча більшу до  $n_n$ ; ) вийде з ряду  $n_0 = 3000, 1500, 1000, 750, 600$  про/хв як

найближча більшу до  $n_n$ ;  $\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30}$ .

Точка 2 - номінальна.

Для визначення точки 3 ( $\omega = \omega_k, M = M_k$ ) потрібно розрахувати  $M_k = \frac{P_k}{\omega_k}$ , визначити  $\lambda$ , визначити  $M_k = \lambda M_{кн}$  й обчислити  $s_{кп}$  по (4.10) або (4.10,а), підставивши в ці рівняння  $M_n$  і

й обчислити  $s_k$  по (4.10) або (4.10,а), підставивши в ці рівняння  $M_n$  і  $s_k = \frac{\omega_0 - \omega_k}{\omega_0}$ .

Точка 4 ( $\omega = 0, M = M_n, I_1 = I_{1n}$ ) розраховується безпосередньо за каталожним даними. Сучасні двигуни з короткозамкненим ротором проектують так, щоб мати підвищений пусковий момент  $M_n$ , і в деяких каталогах указують так званий "сідловий" момент  $M_{сід}$  - рис. 4.7,а.

Деяке подання про характеристики сучасних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором можна одержати з наступних даних:

$s_n = 0,01-0,05$  (менші значення у двигунів більшої потужності - сотні кВт);

$k = 5-7$ ;

$k_M = 1,3-1,6$ ;

$\lambda = 1,8-3,0$ .

Як виходить із цих даних, природні властивості асинхронних двигунів досить несприятливі: малий пусковий момент, великий пусковий струм і сама головне - обмежена можливість керування координатами.

## Лекція №5

### Тема 5. Будова та принцип дії асинхронних двигунів. Електропривод машин змінного струму

#### План

1. Загальні відомості
2. Перехідні процеси при  $L = 0$  і "швидких" змінах фактору
3. Перехідні процеси при  $L=0$  і "повільних" змінах фактору

#### 1. Загальні відомості

У попередніх розділах вивчалися властивості й характеристики електроприводів у *сталих режимах*, тобто при виконанні умови

$M - M_c = 0$ .

У даній главі розглядаються *несталі* або *перехідні* процеси, що мають місце при переході привода з одного сталого стану в інше, що відбувається в часі. При цьому

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \frac{d\omega}{dt} \neq 0.$$

Можна назвати наступні причини виникнення перехідних процесів:

зміна  $M_c$ ;



зміна  $M$ , тобто перехід привода з однієї характеристики на іншу, що має місце при пуску, гальмуванні, реверсі, регулюванні швидкості, зміні якого-небудь параметра привода.

Необхідність в аналізі перехідних процесів виникає у зв'язку з тим, що продуктивність ряду відповідальних механізмів (наприклад, реверсивного прокатного стану) визначається швидкістю протікання перехідних процесів; якість виконання багатьох технологічних операцій визначається перехідними процесами (рух ліфта, врізання різця в деталь і т.п.); механічні й електричні перевантаження встаткування в більшості випадків визначаються перехідними процесами.

Об'єктом дослідження, як і колись, буде спрощена, ідеалізована модель привода - рис. 5.1.

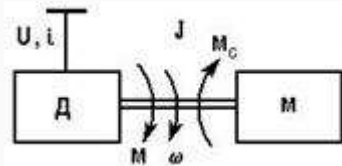


Рис. 5.1. Модель електропривода для дослідження динаміки

Основне завдання при вивченні перехідних процесів зводиться до визначення залежностей  $\omega(t)$ ,  $M(t)$  і  $i(t)$  для будь-яких конкретних приводів у будь-яких умовах.

При вивченні перехідних процесів ми будемо думати відомими наступні вихідні дані:

- початковий стан:  $\omega_{\text{поч}}$ ,  $M_{\text{поч}}$ ,  $i_{\text{поч}}$ ;
- кінцевий стан:  $\omega_{\text{кін}}$ ,  $M_{\text{кін}}$ ,  $i_{\text{кін}}$  і відповідна йому характеристика  $\omega(M)$ ;
- характер зміни в часі фактору, що викликав перехідний процес;
- параметри приводу.

Всі виникаючі на практиці задачі з метою їхньої упорядкованого вивчення розділимо на чотири більші групи.

1. Переважної інерційністю в приводі є механічна інерційність ( $J$ ); електричні інерційності ( $L$ ) малі або не проявляються. Фактор, що викликає перехідний процес, змінюється стрибкоподібно (миттєво) тобто багато швидше, ніж швидкість.

Приклади задач, що ставляться до цієї групи: миттєвий наброс і скидання навантаження, пуск, реверс, гальмування, регулювання швидкості асинхронних двигунів при живленні від мережі, якщо не враховувати індуктивності обмоток; те ж для двигунів постійного струму незалежного збудження якщо  $\Phi = \text{const}$ , а  $L_{\text{я}} = 0$ , те ж для двигунів послідовного або змішаного збудження, якщо  $L_{\text{я}} = L_{\text{з}} = 0$ .

2. Переважна інерційність - механічна ( $J$ ); індуктивності електричних ланцюгів малі або не проявляються. Фактор, що викликає перехідний процес, змінюється не миттєво, тобто темп його зміни порівнюємо з темпом зміни швидкості  $\omega$  ("повільна" зміна фактора, що впливає).

Приклади: перехідні процеси в системах керований перетворювач - двигун постійного струму, перетворювач частоти - асинхронний двигун, якщо  $L = 0$ .

3. Механічна й електрична інерційність сумірні; фактор, що викликає перехідний процес, змінюється миттєво.

Приклади: перехідні процеси в приводі постійного струму при  $\Phi = \text{var}$ ; те ж при  $\Phi = \text{const}$ , але  $L_{\text{я}} \neq 0$ , те ж у системі джерело струму - двигун.

4. Ураховуються трохи інерційностей, фактор, що викликає перехідний процес, змінюється не миттєво. Ці найбільш складні задачі, що ставляться до замкнених

систем регулювання, ми розглянемо дуже коротко - вони будуть детально вивчатися в інших курсах.

## 2. Перехідні процеси при $L = 0$ і “швидких” змінах фактору

Всі перехідні процеси, що ставляться до першої групи, підпорядковуються механічному рівнянню руху

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \quad (5.1)$$

Шукані залежності  $\omega(t)$  і  $M(t)$  повинні бути отримані шляхом рішення цього рівняння при заданих початкових умовах. Конкретні особливості привода відіб'ються у вигляді залежностей  $M(\omega)$  і  $M_c(\omega)$ , що входять у рівняння (5.1).

### а) $M = \text{const}$ , $M_c = \text{const}$

Почнемо розгляд завдань першої групи з найпростішого випадку, коли в перехідному процесі  $M = \text{const}$ , і  $M_c = \text{const}$ .

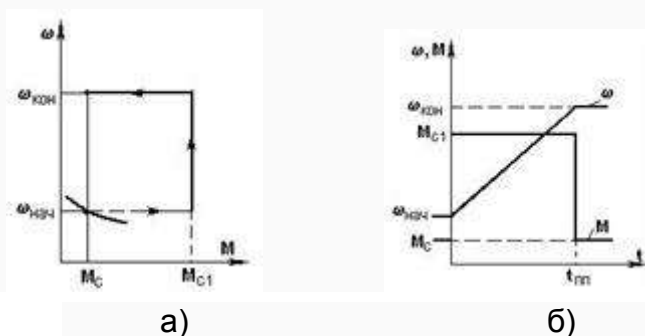


Рис. 5.2. Механічні характеристики (а) і часові залежності (б) при  $M = \text{const}$  і  $M_c = \text{const}$

Нехай привод (рис. 5.1) працював у точці  $\omega_{\text{поч}}$ ,  $M_{\text{поч}} = M_c$  (рис. 5.2) деякої характеристики (вона нас не цікавить) і в момент часу  $t = 0$  був миттєво переведений на нову характеристику, показану на рис. 5.2,а жирною лінією.

Рівняння (5.1) у цьому випадку - диференціальне рівняння з роздільними змінними і його рішення має вигляд:

$$\omega = \int \frac{M_1 - M_c}{J} dt = \frac{M_1 - M_c}{J} t + C$$

Постійну інтегрування  $C$  знайдемо з початкової умови - при  $t = 0$ ,  $\omega = \omega_{\text{поч}}$ :

$$\omega_{\text{поч}} = C.$$

Остаточно будемо мати:

$$\omega = \omega_{\text{поч}} + \frac{M_1 - M_c}{J} t \quad (5.2)$$

Це рішення діє на інтервалі  $\omega_{\text{поч}} < \omega < \omega_{\text{кін}}$ , тому що за умовою при  $\omega = \omega_{\text{кін}}$  функція  $\omega(M)$  терпить злам. На цьому інтервалі  $M = M_1$ .

Графіки перехідного процесу наведені на рис. 5.2,б. Час перехідного процесу  $t_{\text{пр}}$  можна знайти, підставивши в (5.2)  $\omega = \omega_{\text{кін}}$  і вирішивши відносно  $t$ :

$$t_{\text{пр}} = \frac{J(\omega_{\text{кін}} - \omega_{\text{поч}})}{M_1 - M_c} \quad (5.3)$$

Цей же результат, звичайно, можна отримати, вирішивши (5.1) відносно  $dt$  і взявши певний інтеграл:

$$t_{zm} = \int_{\omega_{zmv}}^{\omega_{zmk}} \frac{J}{M_1 - M_c} d\omega = \frac{J(\omega_{zmk} - \omega_{zmv})}{M_1 - M_c}$$

Розглянутий найпростіший випадок має дуже велике практичне значення, тому що до нього може бути зведене з метою оцінки часу й характеру перехідного процесу велика кількість конкретних завдань.

**Приклад** . Оцінити час пуску  $t_n$  і побудувати наближений графік перехідного процесу пуску короткозамкненого асинхронного двигуна з відомими механічною характеристикою,  $M_c$  і  $J$  (рис. 5.3,а). Замінімо реальну характеристику (суцільна лінія) наближеною (пунктирна лінія) і застосувавши (5.3), отримаємо:

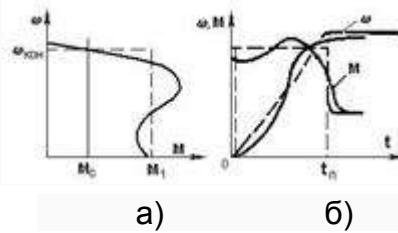


Рис. 5.3. Механічні характеристики (а) і графіки перехідних процесів  $\omega(t)$  і  $M(t)$  при пуску асинхронного двигуна

$$t_n \approx \frac{J\omega_{zmk}}{M_1 - M_c}$$

Знаючи  $t_n$ , можна побудувати наближені графіки перехідного процесу (пунктир на рис. 5.3,б). Ці графіки будуть відрізнятися від дійсних (суцільні лінії на рис. 5.3,б), однак у багатьох випадках отримана оцінка може бути досить корисною.

**б)  $M_c = \text{const}$ ,  $M$  лінійно залежить від  $\omega$ ,  $\beta < 0$ .**

Нехай характеристики двигуна й механізму мають вигляд, представлений на рис. 5.4. Рівняння лінійної механічної характеристики двигуна з негативною жорсткістю може бути записане як

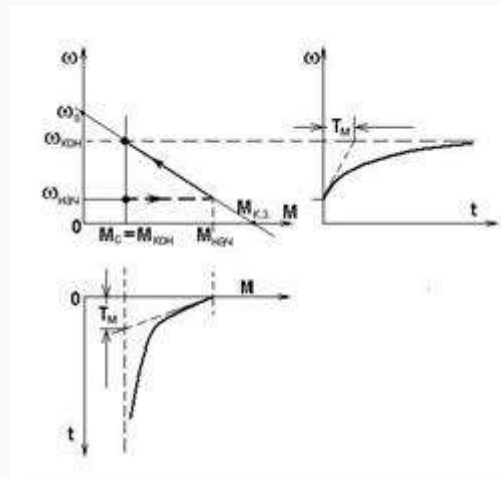


Рис. 5.4. Механічні характеристики й графіки перехідних процесів  $\omega(t)$  і  $M(t)$  при лінійній залежності  $\omega(M)$

$$\omega = \omega_0 - \frac{\omega_0}{M_{x,1}} M = \omega_0 - \frac{M}{|\beta|} \quad (5.4)$$

або

$$M = M_{x,1} - \frac{M_{x,1}}{\omega_0} \omega = M_{x,1} - |\beta| \omega \quad (5.5)$$

де  $\beta = \frac{dM}{d\omega}$  - твердість механічної характеристики; для лінійної характеристики - твердість механічної характеристики; для лінійної характеристики  $\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}$ . Підставивши (5.5) в (5.1), після простих перетворень отримаємо:

$$\omega + \frac{J}{|\beta|} \frac{d\omega}{dt} = \omega_0 - \frac{M_c}{|\beta|}.$$

Вираження в правій частині, як треба з (5.4), представляє собою  $\omega_{\text{кін}}$ . Позначивши коефіцієнт перед похідною через  $T_m$ , запишемо:

$$\omega + T_m \frac{d\omega}{dt} = \omega_{\text{кін}} \quad (5.6)$$

Тепер підставимо в (5.1) замість  $\frac{d\omega}{dt}$  її вираз, отриманий з (5.4):

$$M - M_c = J \left( -\frac{1}{|\beta|} \right) \frac{dM}{dt}$$

або, використовуючи прийняті вище позначення,

$$M + T_m \frac{dM}{dt} = M_{\text{кін}} \quad (5.7)$$

Отже, ми виявили, що в розглянутому перехідному процесі як для швидкості, так і для моменту справедливо однакове рівняння виду

$$x + T_m \frac{dx}{dt} = x_{\text{кін}} \quad (5.8)$$

тобто лінійне неоднорідне диференціальне рівняння з постійною правою частиною. Коефіцієнт при похідній

$$T_m = \frac{J\omega_0}{M_{\text{к.з.}}} = \frac{J}{|\beta|} = \frac{J\Delta\omega}{\Delta M} \quad (5.9)$$

називають *електромеханічною постійною часу*.

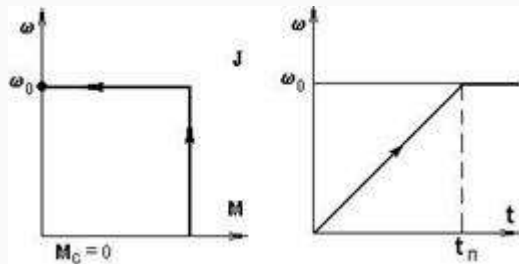


Рис. 5.5. До визначення електромеханічної постійної часу  $T_m$

Для з'ясування змісту цієї величини розглянемо умовний привод з характеристикою, показаної на рис. 5.5. Визначивши час розгону такого привода по (5.3)

$$t_n = \frac{J\omega_0}{M_{\text{к.з.}}},$$

зауважуємо, що воно виражається так само, як  $T_m$ . У зв'язку із цим можна вважати, що електромеханічна постійна часу  $T_m$  представляє собою час, за яке привод розігнався б вхолосту до  $\omega = \omega_0$  під дією моменту короткого замикання. Інші вирази для  $T_m$  наведені в (5.9). У деяких окремих випадках виявляється зручним виражати  $T_m$  через параметри привода. Так, для двигуна постійного струму незалежного збудження можна виразити твердість характеристики як (див. п. 3.2)

$$\beta = -\frac{c^2}{R}$$

Підставивши це вираз в (5.9), одержимо

$$T_m = \frac{JR}{c^2} \quad (5.9,a)$$

Права частина рівняння (5.8) представляє собою кінцеве значень перемінної, тобто сталої величину, що буде досягнута після закінчення перехідного процесу.

Розв'язання (5.8), як відомо, має вигляд

$$x = x_{\text{віл}} + x_{\text{пр}} = Ae^{pt} + x_{\text{кін}},$$

де  $p$  - корінь характеристичного рівняння

$$1 + pT_m = 0,$$

тобто

$$p = -\frac{1}{T_m};$$

$A$  - постійна, обумовлена з початкової умови:

$$t = 0, x = x_{\text{поч}},$$

тобто

$$A = x_{\text{поч}} - x_{\text{кін}}.$$

Отже, остаточно маємо:

$$x = (x_{\text{поч}} - x_{\text{кін}})e^{-\frac{t}{T_m}} + x_{\text{кін}}, \quad (5.10)$$

тобто швидкість і момент змінюються в перехідному процесі від початкових до кінцевих значень за експонентним законом з постійної часу  $T_m$  (див. мал. 5.4).

Нагадаємо деякі важливі властивості експоненти.

1. Дотична в будь-якій точці відтинає на лінії сталого стану відрізок, рівний  $T_m$ .
2. За час  $t = T_m$  зміна величини становить 0,632 від повної зміни.
3. За час  $t = 3T_m$  зміна становить 0,95 від повного. Надалі ми будемо вважати, що процес установлюється за  $t = 3T_m$ .

Урівняння (5.10) дозволяє вирішувати будь-які завдання, що ставляться до розглянутого типу.

**Приклад 1.** Розрахувати перехідний процес миттєвого набросу навантаження від  $M_{c1}$  до  $M_{c2}$  на асинхронний короткозамкнений двигун з механічною характеристикою, лінійною на робочій ділянці (рис. 5.6).

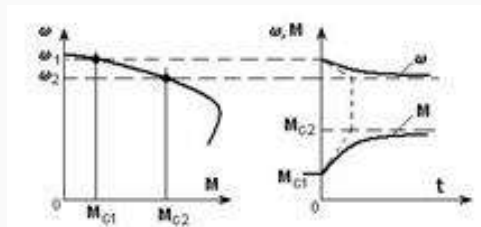


Рис.5.6. Перехідний процес набросу навантаження

Обчислимо  $T_m$ :

$$T_m = \frac{J(\omega_1 - \omega_2)}{M_{c2} - M_{c1}}$$

Визначимо початкові й кінцеві значення  $\omega$  і  $M$ :

$$\omega_{\text{поч}} = \omega_1, \omega_{\text{кін}} = \omega_2;$$

$$M_{\text{поч}} = M_{c1}, M_{\text{кін}} = M_{c2}$$

Запишемо по (5.10) рівняння перехідного процесу

$$\omega = (\omega_1 - \omega_2)e^{-\frac{t}{T_r}} + \omega_2,$$

$$M = (M_{c1} - M_{c2})e^{-\frac{t}{T_r}} + M_{c2}$$

і побудуємо графіки (рим. 5.6).

**Приклад 2.** Розрахувати перехідний процес пуску з одним щаблем пускового реостата й динамічного гальмування із самозбудженням двигуна постійного струму послідовного порушення;  $M_c$  - реактивний.

Побудуємо спочатку пускову діаграму й гальмову характеристику (рис. 5.7,а) - див. п. 3.2, 3.4. Якщо на робочих ділянках характеристики близькі до прямих, можна скористатися аналітичним розв'язанням завдання. У цьому випадку механічні характеристики мають розриви (при  $\omega_3, \omega_1$ ) і злами (при  $\omega_4$ ), тому необхідно розділити весь процес на ділянки таким чином, щоб у межах кожної ділянки функції  $\omega(M)$  і  $\omega(M_c)$  були лінійними й не мали зламів і розривів.

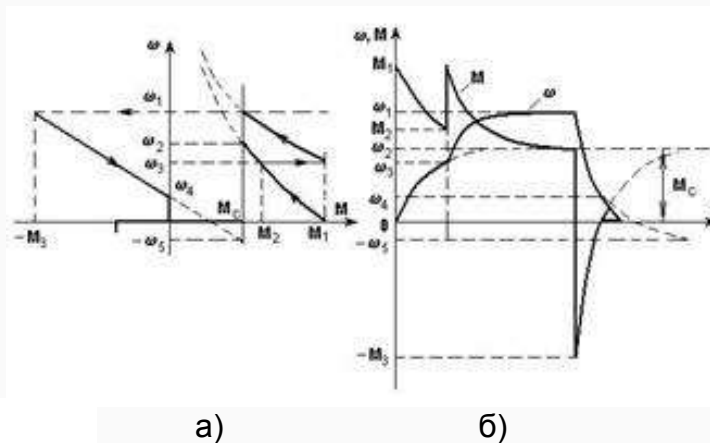


Рис. 5.7. Механічні характеристики (а) і криві перехідних процесів (б) при реостатному пуску й динамічному гальмуванні двигуна послідовного збудження

У нашому випадку таких ділянок буде чотири:

- I -  $0 < \omega < \omega_3$  (пуск на реостатній характеристиці);
- II -  $\omega_3 < \omega < \omega_1$  (пуск на природній характеристиці);
- III -  $\omega_1 > \omega > \omega_4$  (гальмування із самозбудженням);
- IV -  $\omega_4 < \omega < 0$  (гальмування під дією  $M_c$ ).

До першого трьох ділянок може бути застосована формула (5.10), тому що в межах цих ділянок  $M(\omega)$  - лінійні функції; до IV ділянки, де  $M = 0$  і  $M_c = \text{const}$ , варто застосувати рішення, отримане в п. а), тобто формулу (5.2).

Звернемо увагу на те, що відлік часу в рівняннях (5.10) і (5.2), якими ми будемо користуватися, ведеться від моменту  $t = 0$ , у який відбулася зміна, що викликала перехідний процес. Тому, вирішуючи завдання по етапах, треба на кожному етапі відлік часу вести від свого початку; загальний час перехідного процесу визначиться звичайно, як сума часу на етапах.

Для того, щоб скористатися рівняннями (5.10) і (5.2), варто визначити вхідні в них початкові й кінцеві значення величин і постійні часу.

Початкові значення швидкості очевидні із графіка  $\omega(M)$  - це фактичні значення швидкості на початку відповідного етапу. При визначенні початкових значень моменту варто пам'ятати, що в розглянутих завданнях ми зневажаємо інерційністю електричних ланцюгів і вважаємо, що струм, а отже, і момент змінюються миттєво при зміні параметрів привода, тобто при переході з характеристики на характеристику. На графіку  $\omega(M)$  це відповідає горизонтальним лініям - момент змінюється стрибком при  $\omega = \text{const}$ . Тому як початкові значення моменту варто брати величини із графіка  $\omega(M)$ , що вийшли після відповідної миттєвої зміни характеристики.

В якості кінцевих значень  $\omega$  і  $M$  при використанні рівняння (5.10) варто завжди брати координати точки перетинання двох прямих  $\omega(M)$  і  $\omega(M_c)$ , тобто крапки сталого режиму, незалежно від того буде досягнутий цей режим чи фактично ні. Це важливе правило випливає з того, що рівняння (5.10) є розв'язанням рівняння (5.8) саме при зазначених умовах. Постійні часу визначаються для кожного етапу по (5.9).

Для розглянутого завдання початкові й кінцеві значення наведені в табл. 5.1 (варто звернути увагу на підкреслені величини).

Таблиця 5.1

№ етапів	$\omega_{\text{поч}}$	$\omega_{\text{кін}}$	$M_{\text{поч}}$	$M_{\text{кін}}$	$T_m$	Примітки
I	0		$M_1$		$\frac{J\omega_3}{M_1 - M_2}$	Рівняння (5.10)
II	$\omega_3$	$\omega_1$	$M_1$	$M_c$	$\frac{J(\omega_1 - \omega_3)}{M_1 - M_2}$	Рівняння (5.10)
III	$\omega_1$		$-M_3$		$\frac{J(\omega_1 - \omega_4)}{M_3}$	Рівняння (5.10)
IV	$\omega_4$	0	0	0	-	

Дані табл. 5.1 дозволяють записати рівняння для кожного із чотирьох етапів і побудувати графіки - рис. 5.7,б.

**Приклад 3** . Розрахувати й побудувати криві перехідного процесу реверса двигуна постійного струму незалежного збудження, що живиться від мережі  $U = \text{const}$ , при активному й реактивному характері  $M_c$ .

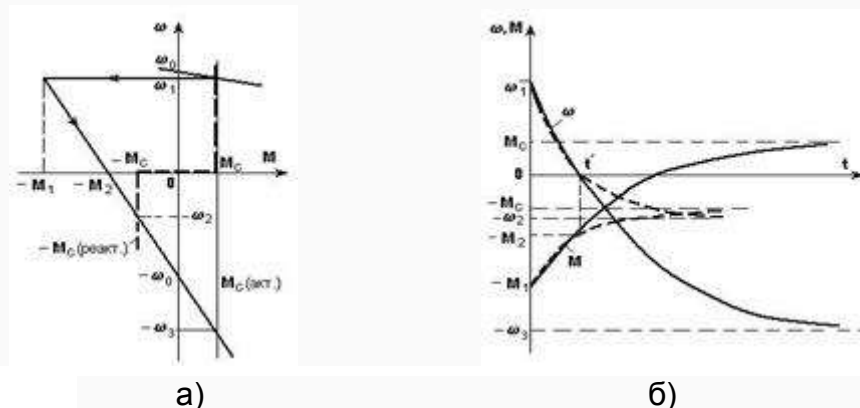


Рис. 5.8. Механічні характеристики (а) і криві перехідних процесів (б)

при реверсі електропривода

Розв'язання, як завжди, почнемо з побудови графіків  $\omega(M)$  (рис. 5.8,а); графік реактивного  $M_c$  побудований жирними пунктирними лініями.

Розглянемо спочатку випадок, коли  $M_c$  активний. При цьому, мабуть, перехідний процес протікає в один етап, а його рівняння, отримані з (5.10), мають вигляд:

$$\omega = [\omega_1 - (-\omega_2)]e^{-\frac{t}{T_*}} + (-\omega_2) = (\omega_1 + \omega_2)e^{-\frac{t}{T_*}} - \omega_2,$$

$$M = (-M_1 - M_c)e^{-\frac{t}{T_*}} + M_c,$$

де

$$T_* = \frac{J\omega_2}{M_1}$$

Відповідні графіки побудовані на рис. 5.8,б суцільними лініями.

При реактивному  $M_c$ , що змінює знак при  $\omega = 0$ , необхідно розглядати два етапи: I від  $\omega_1$  до  $\omega = 0$  і II від  $\omega = 0$  до  $\omega = -\omega_2$ . На I етапі рівняння не будуть відрізнятися від отриманих раніше. Дійсно, на цьому етапі реактивний характер  $M_c$  не проявляється й він, як і в першому випадку, сприяє гальмуванню привода. Цей результат відповідає правилу, викладеному в попередньому прикладі.

На II етапі змінюється знак  $M_c$  і, на протигагу попередньому випадку,  $M_c$  робить гальмуючу дію при розгоні привода в протилежну сторону. Рівняння для цього етапу мають вигляд:

$$\omega = [0 - (-\omega_2)]e^{-\frac{t}{T_*}} + (-\omega_2) = -\omega_2(1 - e^{-\frac{t}{T_*}}),$$

$$M = [-M_2 - (-M_c)]e^{-\frac{t}{T_*}} + (-M_c) = (-M_2 + M_c)e^{-\frac{t}{T_*}} - M_c.$$

Графіки перехідних процесів при реактивному  $M_c$  побудовані на рис. 5.8,б пунктирними лініями. У момент часу  $t$  (криві терплять злам, темп процесу сповільнюється, що зв'язано зі стрибкоподібним зменшенням динамічного моменту, обумовленим зміною знака  $M_c$ ).

Якщо потрібно знайти залежність  $i(t)$ , варто скористатися відомим співвідношенням

$$i = \frac{M}{k\Phi} = \frac{M}{c}$$

### в) $M_c = \text{const}$ , $M$ - лінійно залежить від $\omega$ , $\beta > 0$

Розглянуті вище перехідні процеси при  $\beta < 0$  відповідали стійкій точці сталого режиму  $\omega_{\text{кін}}$ ,  $M_{\text{кін}}$ , тобто  $\omega$  і  $M$ , змінюючись, прагнули до цієї точки. Разом з тим, іноді потрібно розраховувати перехідні процеси при  $\beta > 0$ , що відповідає нестійкій точці сталого режиму (див. п. 1.3) - рис. 5.9,а.

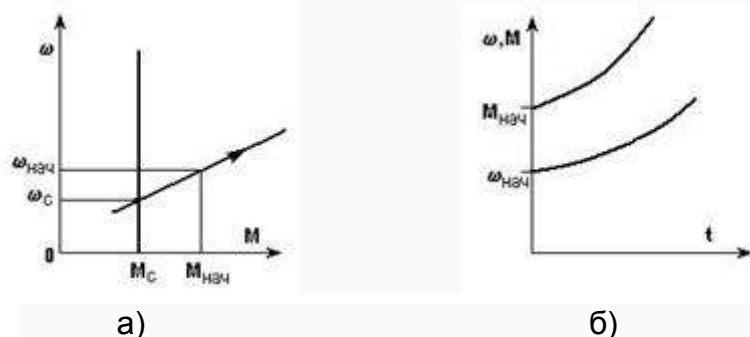


Рис. 5.9. Механічні характеристики (а) і криві перехідного процесу (б) при  $\beta > 0$

У цьому випадку рівняння механічної характеристики привода запишеться як



$$\omega = \omega_0 + \frac{M}{|\beta|}$$

або

$$M = M_{x.c.} + |\beta|\omega$$

що приведе після підстановки цих виражень в (5.1) і виконання перетворень до рівняння

$$x - T_n \frac{dx}{dt} = x_{c.}, \quad (5.11)$$

де  $x$  - швидкість або момент;

$x_{c.}$  - швидкість або момент, що відповідають точці сталого режиму (див. рис. 5.9,а).

У порівнянні з (5.8) у цьому рівнянні змінився знак перед похідною, а в правій частині коштує величина  $x_{c.}$ , що не має тепер змісту кінцевого значення змінної.

Вирішимо рівняння (5.11), як рівняння з роздільними змінними; до речі, ми могли б вирішити цим прийомом і рівняння (5.8):

$$\frac{dx}{x - x_{c.}} = \frac{dt}{T_n};$$

$$\int \frac{dx}{x - x_{c.}} = \int \frac{dt}{T_n};$$

$$\ln(x - x_{c.}) = \ln e^{\frac{t}{T_n}} + \ln A;$$

$$x = x_{c.} + A e^{\frac{t}{T_n}}.$$

Використавши початкові умови  $t = 0$ ,  $x = x_{\text{поч.}}$ , отримаємо

$$x = (x_{\text{поч.}} - x_{c.}) e^{\frac{t}{T_n}} + x_{c.}, \quad (5.12)$$

Графіки  $\omega(t)$  і  $M(t)$ , що відповідають (5.12), показані на рис. 5.9,б.

### г) $M_c$ і $M$ - лінійні функції $\omega$ .

Отримані в п. п. б) і в) результати можна поширити на випадок, коли  $M$  і  $M_c$  - лінійні функції швидкості.

Розглянемо цю можливість на простому прикладі. Нехай потрібно розрахувати перехідний процес пуску привода, якщо характеристики двигуна й навантаження задані, як показано на рис. 5.10,а пунктиром.

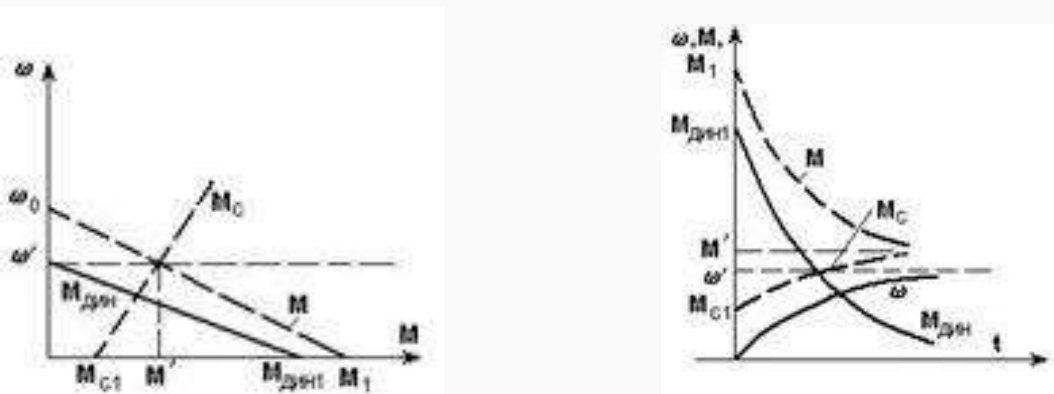


Рис. 5.10. Механічні характеристики (а) і криві перехідних процесів (б) при лінійних залежностях  $M(\omega)$  і  $M_c(\omega)$

Замінімо ці характеристики однієї - залежністю динамічного моменту  $M_{\text{дин}} = M - M_c$  від швидкості. Ця залежність лінійна, тому що лінійні  $M(\omega)$  і  $M_c(\omega)$  - суцільна лінія на рис. 5.10,а. Тепер, скориставшись отриманими раніше результатами, можна одержати залежності  $\omega(t)$  і  $M_{\text{дин}}(t)$ . При цьому  $\omega_{\text{поч}} = 0$ ,  $\omega_{\text{кін}} = \omega$ ,  $M_{\text{дин поч}} = M_{\text{дин1}}$ ,  $M_{\text{дин кін}} = 0$ ,

$T_x = \frac{J\omega'}{M_{\text{дин}}}$ ; криві побудовані на рис. 5.10,б суцільними лініями. Якщо необхідно, можна побудувати й графіки  $M(t)$  і  $M_c(t)$ , тому що відомі початкові й скінченні величини (рис. 5.10,а) і визначена  $T_m$ . Ці графіки показані на рис. 5.10,б пунктиром.

### 3. Перехідні процеси при $L=0$ і “повільних” змінах фактора, що впливає

До завдань даної групи раніше були віднесені перехідні процеси в системі перетворювач - двигун (П-Д). Фактор, що викликає перехідний процес, змінюється не миттєво (темп його зміни порівнюємо з темпом зміни швидкості привода в перехідному процесі); ураховується тільки механічна інерція в приводі (J), індуктивності в ланцюгах двигуна малі або не проявляються.

Типові структури системи П-Д і відповідні механічні характеристики показані на рис. 5.11 і 5.12.

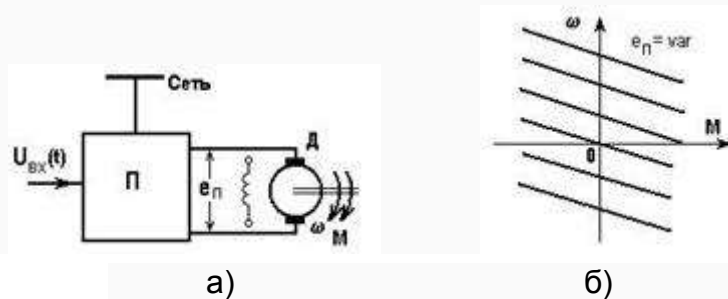


Рис. 5.11. Система ПН-ДПС і її механічні характеристики

Роль перетворювача П у схемі на рис. 5.11, як відзначалося, може грати генератор (система Г-Д) або тиристорний перетворювач (ТП-Д). Фактор, що викликає перехідний процес у цих системах, - зміна вхідного сигналу  $U_{\text{вх}}$ , що приводить до зміни ЕРДС перетворювача  $e_n$ .

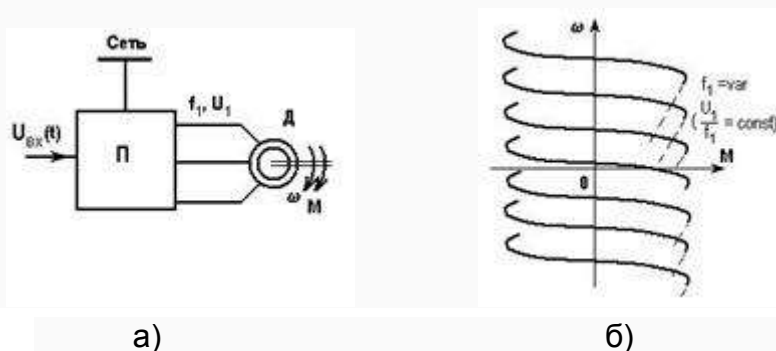


Рис. 5.12. Система ПЧ-АД і її механічні характеристики

Роль перетворювача П у схемі на рис. 5.12 грає статичний перетворювач частоти. Фактор, що викликає перехідний процес у цих системах, - зміна вхідного сигналу  $U_{\text{вх}}$ , що приводить до зміни частоти й напруги на виході перетворювача.

Як і колись, метою вивчення перехідних процесів у системі П-Д буде визначення залежностей  $\omega(t)$ ,  $M(t)$  і іноді  $i(t)$  при відомих умовах перехідного процесу й параметрах привода.

Уведемо ряд умов і допущень.

1. Механічні характеристики привода  $\omega(M)$  відомі, лінійні (принаймні, на робочих ділянках) і паралельні одна одній, тобто виражаються рівнянням (5.4):

$$\omega = \omega_0 - \frac{M}{\beta},$$

де  $\beta = \frac{dM}{d\omega} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}$  - жорсткість характеристик.

2. Відомі або можуть бути визначені залежності  $e_n(t)$  або  $f_1(t)$ , тобто закон зміни в часі фактора, що викликає перехідний процес. Тому що  $e_n$  або  $f_1$  однозначно зв'язані зі швидкістю ідеального холостого ходу привода  $\omega_0$

$$\omega_0 = \frac{e_n}{c} \quad - \text{для схеми на рис. 5.11,}$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{P} \quad - \text{для схеми на рис. 5.12,}$$

те відомий закон зміни в часі  $\omega_0$ .

3. Відомо початковий ( $\omega_{\text{поч}}, M_{\text{поч}}$ ) і кінцеве ( $\omega_{\text{кін}}, M_{\text{кін}}$ ) стан привода, момент інерції  $J$  і момент опору  $M_c = \text{const}$ .

4. Перетворювач  $\Pi$  має двосторонню провідність, тобто характеристики  $\omega(M)$  можуть розташовуватися у всіх квадрантах площини  $\omega, M$ .

Розглянемо насамперед якісні відмінності перехідних процесів у системі П-Д від вивчених раніше випадків, коли  $e_n$  або  $f_1$  змінювалися миттєво, тобто миттєво встановлювалася відповідна нова механічна характеристика, а зміна швидкості  $\omega$  і моменту  $M$  у перехідному процесі відбувалося відповідно до саме цієї характеристики. Перехідний процес визначався статичною механічною характеристикою привода.

В розглянутих далі завданнях  $e_n$  або  $f_1$  змінюються, як указувався, не миттєво, тобто перехід привода з однієї характеристики на іншу відбувається поступово, одночасно зі зміною швидкості, у результаті чого відповідність між швидкістю  $\omega$  і моментом  $M$  у кожний момент часу визначається не статичною механічною характеристикою, а інший, відмінної від її характеристикою, що ми далі будемо називати динамічною механічною характеристикою або просто динамічною характеристикою.

Як приклад на рис. 5.13 показана статична характеристика асинхронного двигуна при номінальній частоті  $1$ , по якій буде відбуватися пуск при миттєвому додатку до двигуна напруги такої частоти, і динамічна характеристика  $2$ , що відповідає пуску двигуна шляхом плавної зміни частоти від нуля до номінальної за деяким законом.

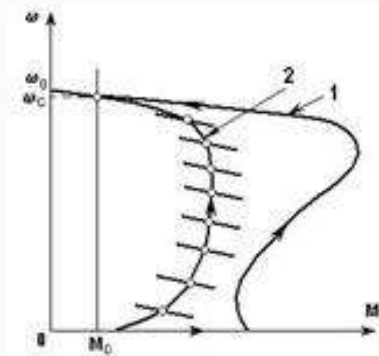


Рис. 5.13. Статична 1 і динамічна 2 механічні характеристики

Динамічні характеристики визначаються темпом зміни фактора, що викликає перехідний процес, і параметрами привода, можуть дуже сильно відрізнятися від статичних характеристик і навіть мати зовсім іншу форму.

Легко виявити зв'язок залежностей  $\omega(t)$  і  $M(t)$  з динамічною характеристикою привода: виключивши час  $t$  з рівнянь  $\omega(t)$  і  $M(t)$ , ми одержимо динамічну характеристику.

#### а) Рівняння, що описують перехідні процеси.

З рівняння механічної характеристики (5.4) отримаємо:

$$M = (\beta(\omega_0) + \beta(\omega)) \quad (5.5,а)$$

Підставивши (5.5,а) у рівняння руху (5.1), після елементарних перетворень будемо мати:

$$\omega + \frac{J}{\beta} \frac{d\omega}{dt} = \omega_0 - \frac{M_c}{\beta} = \omega_c. \quad (5.13)$$

Коефіцієнт при похідній  $\frac{J}{\beta}$ , як і раніше, - електромеханічна постійна часу  $T_m$ . Права частина рівняння представляє собою швидкість  $\omega_c$ , що відповідає моменту опору  $M_c$ , однак, у розглянутому випадку  $\omega_0$ , а значить і  $\omega_c$  не постійні величини, а відомі функції часу  $\omega_0(t)$  і  $\omega_c(t)$ . Таким чином, рівняння (5.13) має вигляд:

$$\omega + T_m \frac{d\omega}{dt} = \omega_c(t). \quad (5.14)$$

Рішення цього диференціального рівняння визначить шукану залежність  $\omega(t)$ .

Для одержання залежності  $M(t)$  зручно скористатися безпосередньо рівнянням руху (5.1), підставивши в нього похідну знайденої функції  $\omega(t)$ :

$$M = M_c + J \frac{d\omega(t)}{dt}. \quad (5.15)$$

Права частина рівняння (5.14), загалом кажучи, може мати будь-який вид. Закон  $\omega_0(t)$  у випадку безінерційного перетворювача формується на його вході; при інерційному перетворювачі закон  $\omega_0(t)$  зв'язаний із властивостями перетворювача. У ряді випадків закон  $\omega_0(t)$  формується таким чином, щоб отримати необхідний закон  $\omega(t)$ .

#### б) Рівняння перехідних процесів при лінійному законі $\omega_c(t)$

Отримаємо рішення рівняння (5.14) для одного поважного вигляду функції  $\omega_c(t)$  - для лінійної зміни  $\omega_c$  у часі:

$$\omega_c(t) = a + kt. \quad (5.16)$$

Такий закон може бути сформований при безінерційному перетворювачі за допомогою задатчика інтенсивності.

Ми використаємо тут загальне рівняння прямої, не накладаючи поки ніяких обмежень на величини  $a$  й  $k$  для того, щоб, розглядаючи частки випадки, можна було користуватися отриманим загальним результатом.

Рівняння (5.14) з урахуванням (5.16) має вигляд:

$$\omega + T_m \frac{d\omega}{dt} = a + kt. \quad (5.17)$$

Рішення будемо шукати, як і колись, у вигляді суми вільної  $\omega_{віль}$  і примушеної  $\omega_{пр}$  складових:

$$\omega = \omega_{віль} + \omega_{пр}. \quad (*)$$

Вільна складова, тобто рішення однорідного рівняння, отриманого з (5.17) має вигляд:

$$\omega_{\text{віль}} = A e^{-\frac{t}{T_m}}$$

Примушену складову будемо шукати, з огляду на (5.16), у вигляді:

$$\omega_{\text{пр}} = B + kt,$$

тому що в сталому режимі швидкість буде лінійно змінюватися в часі. Підставивши  $\omega_{\text{пр}}$  в (5.17) одержимо:

$$B + kt + kT_m = a + kt$$

або

$$B = a - kT_m.$$

Підставимо тепер  $\omega_{\text{віль}}$  і  $\omega_{\text{пр}}$  в (\*):

$$\omega = A e^{-\frac{t}{T_m}} + a - kT_m + kt.$$

Постійну  $A$  знайдемо, використовуючи початкові умови: при  $t = 0$   $\omega = \omega_{\text{поч}}$ :

$$\omega_{\text{поч}} = A + a - kT_m,$$

звідки

$$A = \omega_{\text{поч}} - a + kT_m$$

Остаточно будемо мати:

$$\omega = (\omega_{\text{поч}} - a + kT_m) e^{-\frac{t}{T_m}} + a - kT_m + kt. \quad (5.18)$$

Перейдемо тепер до розгляду деяких конкретних перехідних процесів у системі П-Д.

### в) Пуск вхолосту.

Будемо думати, що закон зміни в часі фактора, що викликає перехідний процес,  $\epsilon_n$  або  $f_1$  або в загальному випадку  $\omega_0$  має вигляд, представлений на рис. 5.14 праворуч угорі. Тому що  $M_c = 0$  (пуск вхолосту), те  $\omega_3 = (t)$  буде збігатися з  $\omega_0(t)$  - див. рівняння (5.13), тобто  $a=0$  і

$$k = \frac{\omega_{01}}{t_1} = \epsilon,$$

де  $\epsilon$  - прискорення, що характеризує темп зміни  $\omega_0$ ;

при  $0 < t < t_1$   $\omega_3(t) = \epsilon t$ ;

при  $t > t_1$   $\omega_3(t) = \omega_{01} = \text{const}$ .

Злам функції  $\omega_3(t)$  при  $t = t_1$  свідчить про те, що перехідний процес складається із двох етапів, і його необхідно розрахувати окремо для кожної ділянки.

I етап ( $0 < t < t_1$ ).

Прийнявши, що при  $t = 0$   $\omega_{\text{поч}} = 0$  і підставивши в (5.18)  $a=0$ ,  $k=\epsilon$ , отримаємо

$$\omega = \epsilon T_m e^{-\frac{t}{T_m}} - \epsilon T_m + \epsilon t = \epsilon t - \epsilon T_m (1 - e^{-\frac{t}{T_m}}). \quad (5.19)$$

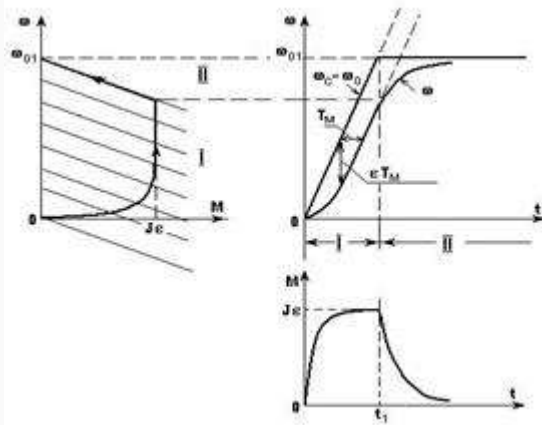


Рис. 5.14. Механічні характеристики й графіки перехідного процесу при пуску вхолосту з  $\omega_0(t) = \varepsilon t$

Скориставшись рівнянням (5.15), знайдемо закон зміни моменту в часі:

$$M = J\varepsilon(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}). \quad (5.20)$$

Проаналізуємо отримані рівняння.

Прискорення привода визначиться як

$$\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon(1 - e^{-\frac{t}{T_M}})$$

і при  $t = 0$   $\left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{t=0} = 0$ . Цей результат очевидний: при  $t = 0$   $\omega_3 = \omega_0 = 0$  т.е.  $e_n = 0$  або  $f_1 = 0$ , привод не розвиває моменту й відповідно до рівняння руху (5.1) Цей результат очевидний: при  $t = 0$   $\omega_3 = \omega_0 = 0$  т.е.  $e_n = 0$  або  $f_1 = 0$ , привод не розвиває моменту й

відповідно до рівняння руху (5.1)  $J \frac{d\omega}{dt} = 0$  і  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ .

При  $t > 3T_M$   $\left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{t > 3T_M} \approx \varepsilon$ , тобто швидкість змінюється в тім же темпі, що й фактор, що викликає перехідний процес. З рівняння (5.19) треба, що при  $t > 3T_M$

$$\omega = \varepsilon(t - T_M) = \omega_3(t) - \varepsilon T_M. \quad (5.19, a)$$

Графіки  $\omega_3(t)$  і  $\omega(t)$  представлені на рис. 5.14. Крива  $\omega(t)$  зсунута вправо відносно кривої  $\omega_3(t)$  на величину  $T_M$ ; у кожний момент часу при  $t > 3T_M$  різниця між  $\omega_3$  і  $\omega$  становить  $\varepsilon T_M$ .

Момент відповідно до (5.20) зростає за експонентним законом (див. рис. 5.14) і при  $t > 3T_M$  досягає величини

$$M_{\max} = J\varepsilon. \quad (5.20, a)$$

Це співвідношення дозволяє оцінити припустиму величину  $\varepsilon$ . Дійсно, якщо вважати, що в перехідному процесі  $M_{\max} = M_{\text{прип}}$ , те

$$\varepsilon_{\text{прип}} = \frac{M_{\text{прип}}}{J}.$$

Зокрема, можна знайти мінімальний час пуску привода при якому момент не перевищить припустимого значення:

$$t_{\text{мин}} = \frac{\omega_{01}}{\varepsilon_{\text{прип}}} = \frac{J\omega_{01}}{M_{\text{прип}}}.$$

Якщо покласти, що  $M_{\text{прип}} = 2M_n$ , а  $|\beta| = \frac{20M_n}{\omega_{01}}$ , що справедливо для нормальної електричної машини середньої потужності, то отримуємо

$$t_{\text{інт}} = \frac{J}{|\beta|} \cdot 10 = 10T_m.$$

II етап ( $t > t_1$ ).

На II етапі  $\omega_3 = \omega_{01}$ , а виходить, і  $e_n$  або  $f_1$  мають постійну величину. Перехідний процес у цьому випадку нічим не відрізняється від розглянутих раніше перехідних процесів, віднесених до першої групи завдань. Якщо відраховувати час від  $t_1$ , (точка 0'), то швидкість  $\omega$  і момент  $M$  будуть змінюватися відповідно до рівняння (5.10); у якості  $x_{\text{поч}}$  варто прийняти значення  $\omega$  і  $M$  у момент часу  $t_1$ . Якщо  $t_1 < 3T_m$ , початкові значення повинні бути визначені по (5.19) і (5.20) при підстановці в ці рівняння  $t = t_1$ .

В якості  $x_{\text{кін}}$ , мабуть, варто взяти  $\omega_{01}$  і 0.

Графіки  $\omega(t)$  і  $M(t)$  на II етапі показані на рис. 5.14. Там же ліворуч наведена динамічна механічна характеристика для випадку пуску вхолосту.

Всі розглянуті вище величини й залежності мають очевидний фізичний зміст для системи П-Д із двигуном постійного струму. Дійсно,

$$\omega_0(t) = \frac{E_n(t)}{c}; \quad \alpha(t) = \frac{e(t)}{c},$$

т. є. крива  $\omega_0(t)$  представляє собою в деякому масштабі закон зміни в часі  $e_n$ , а крива  $\omega(t)$  - закон зміни  $e$  в тім же масштабі. Різниця цих величин відповідно до другого закону Кирхгофа визначить струм, що протікає в якірному ланцюзі:

$$i(t) = \frac{e_n(t) - e(t)}{R_\Sigma},$$

а виходить, і момент, що розвиває двигуном

$$M(t) = ci(t).$$

### г) Реверс (гальмування) вхолосту.

Для здійснення реверса  $\omega_0$  повинна змінити напрямок. Це значить, що  $e_n$  зменшується до 0, потім змінює полярність і зростає до заданої величини, або  $f_1$  зменшується до 0, міняється чергування фаз і  $f_1$  зростає до заданої величини.

Як і колись, будемо вважати, що зміна  $\omega_0$  у часі здійснюється за лінійним законом при ( $0 < t < t_1$ ), потім при  $t > t_1$   $\omega_0 = \omega_{01}$ . Таким чином, перехідний процес складається із двох ділянок, які варто розглядати окремо. Тому що перехідний процес здійснюється вхолосту ( $M_c = 0$ ), те  $\omega_3(t) = \omega_0(t)$ .

I етап ( $0 < t < t_1$ ).

На I етапі зміна  $\omega_3(t)$  можна представити рівнянням (5.16), підставивши в нього  $a = \omega_{01}$ ,  $k = -\varepsilon$ . Тоді, скориставшись рівнянням (5.18), у якому  $\omega_{\text{поч}} = \omega_{01}$ , отримуємо

$$\omega = -\varepsilon T_m e^{-\frac{t}{T_m}} + \omega_{01} + \varepsilon T_m - \varepsilon t$$

або

$$\omega = \omega_{01} - \varepsilon t + \varepsilon T_m (1 - e^{-\frac{t}{T_m}}). \quad (5.21)$$

Рівняння (5.16) визначає закон зміни  $M$  у часі:

$$M = J \frac{d\omega}{dt} = -J\varepsilon (1 - e^{-\frac{t}{T_m}}). \quad (5.22)$$

Проаналізуємо отримані рівняння.

Прискорення привода

$$\frac{d\omega}{dt} = -\varepsilon(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}).$$

При  $t = 0 \quad \left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{t=0} = 0$ ,

що очевидно й з фізичної точки зору: при  $t = 0 \quad M = 0$  т.е. , що

очевидно й з фізичної точки зору: при  $t = 0 \quad M = 0$  т.е.  $J \frac{d\omega}{dt} = 0$  і  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ .

При  $t > 3T_M \quad \left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{t > 3T_M} \approx -\varepsilon$ ,

тобто як і при пуску, швидкість змінюється в тім же темпі, що й фактор, що викликав перехідний процес. При  $t > 3T_M$

$$\omega = \omega_{01} - \varepsilon(t - T_M) = \omega_3(t) + \varepsilon T_M,$$

т. є як і при пуску, крива  $\omega(t)$  розташовується правее кривій  $\omega_3(t)$ , причому зрушення по осі  $t$  становить величину  $T_M$ , а в кожний момент часу при  $t > 3T_M$  різниця між  $\omega_3$  і  $\omega$  становить  $\varepsilon T_M$ .

Момент негативний і змінюється за експонентним законом до величини

$$M_{\text{макс}} = -J\varepsilon.$$

II етап ( $t > t_1$ ).

Перехідні процеси на II етапі підкоряються рівнянню (5.10) і розраховується очевидним образом.

Криві  $\omega_3(t)$ ,  $\omega(t)$  і  $M(t)$  і динамічна характеристика показані на рис. 5.15.

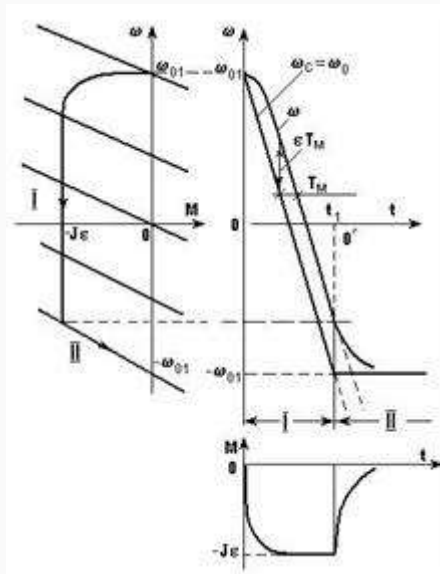


Рис. 5.15. Механічні характеристики й графіки перехідного процесу при реверсі вхолосту з  $\omega_0(t) = -\varepsilon t$

При гальмуванні вхолосту  $\omega_0$  змінюється від значення  $\omega_{01}$  до нуля. Як і при реверсі, процес складається із двох етапів, причому на I етапі ( $0 < t < t_1$ ) криві  $\omega(t)$  і  $M(t)$  не відрізняються від аналогічних кривих при реверсі, а на II етапі - підкоряються рівнянню (5.10) з відповідними  $X_{\text{поч}}$  і  $X_{\text{кін}}$ .

Криві  $\omega(t)$  і  $M(t)$ , а також динамічна характеристика показана на рис. 5.16.



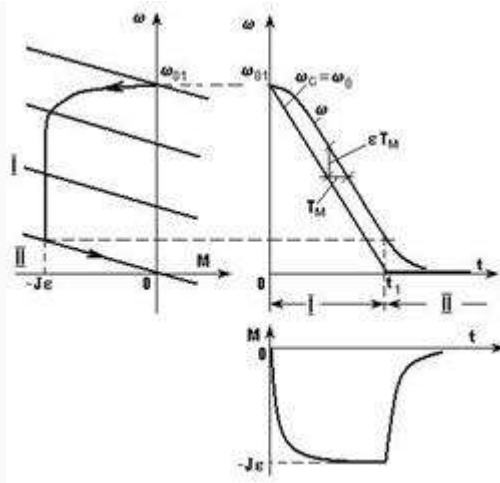


Рис. 5.16. Механічні характеристики й графіки перехідного процесу при гальмуванні вхолосту з  $\omega_0(t) = -\epsilon t$

Розглянемо коротко порядок операцій при побудові кривих перехідного процесу в розглянутих випадках.

1. Зображується  $\omega_3(t)$ , у розглянутих випадках  $\omega_3(t) = \omega_0(t)$ ; відзначаються етапи й визначається  $\epsilon$  на етапі, де  $\omega_3(t)$  змінюється.
2. Проводиться лінія, паралельна  $\omega_3(t)$  і зрушена вправо на  $T_m$ , - це й буде основа графіка  $\omega(t)$ .
3. Коректується графік  $\omega(t)$  на початкових і кінцевому (II) ділянках, введенням експонент із постійної часу  $T_m$ .
4. Будується основа графіка  $M(t)$  - прямокутник зі сторонами  $0 - t_1$  і  $J\epsilon$ ; у випадку реверса й гальмування  $\epsilon$  має негативний знак.
5. Коректується графік  $M(t)$  на початковій і кінцевій ділянках, введенням експонент із постійної часу  $T_m$ .

#### Перехідні процеси під навантаженням.

Загальні формули (5.15) і (5.18) справедливі й для цього випадку, разом з тим розходження в характері навантаження -  $M_c$  може бути як активним, так і реактивним - і в початкових умовах роблять завдання різноманітними й іноді не дуже простими.

З'ясуємо насамперед, як буде змінюватися права частина (5.13), тобто  $\omega_3(t) = \omega_0(t) - M_c / (\beta)$ , при тих же, що й колись, змінах  $\omega_0(t)$ , але різному характері  $M_c$ .

Як показано на рис. 5.17, при активному моменті опору  $\omega_3(t)$  розташовується нижче  $\omega_0(t)$  на  $\Delta\omega$  і ніяких істотних відмінностей в алгоритмі рішення завдання немає. Єдине, мабуть, про що варто подбати, - про правильний облік початкових умов при пуску. Можливі два випадки - перший, коли при  $t = 0$   $\omega = 0$ , тобто коли розгальмовування привода з активним моментом і початок росту  $\omega_0(t)$  збігаються, і другий, коли до початку пуску привод обертався під дією активного  $M_c$  із невеликою швидкістю  $-\Delta\omega$  - пунктир на рис. 5.17.

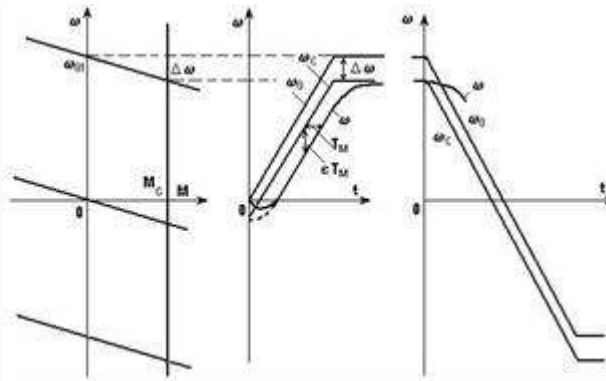


Рис. 5.17. Перехідний процес пуску при активному  $M_c$

При пуску з реактивним  $M_c$  (рис. 5.18) швидкість починає змінюватися через якийсь час  $t_3$ , за яке момент двигуна виросте до значення  $M_c$ . Як приклад на рис. 5.18 показані всі криві, що відповідають цьому випадку.

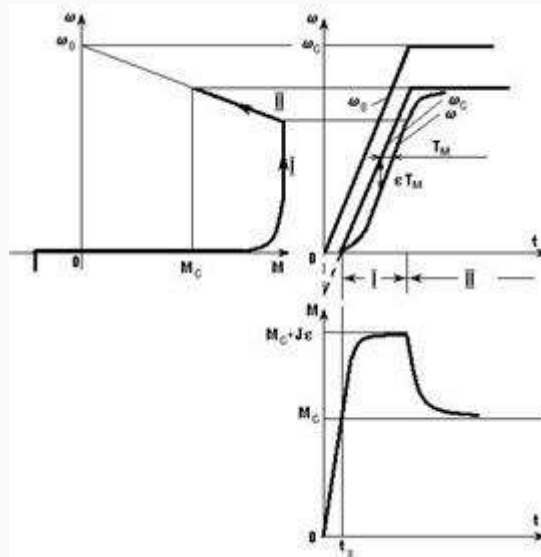


Рис. 5.18. Перехідний процес пуску при реактивному  $M_c$

При реверсі з реактивним  $M_c$  є дві гілки  $\omega_z(t)$ , причому перехід з однієї на іншу здійснюється в момент часу, коли швидкість, досягши нульового значення, змінить знак.

Таким чином, як треба з викладеного в системі перетворювач - двигун можна формувати будь-які необхідні динамічні характеристики.

## Лекція №6

### Тема 6. Механічні властивості та режими роботи асинхронного двигуна.

#### План

1. Загальні відомості
2. Оцінка енергетичної ефективності при неодиоспрямованих потоках енергії

## 1. Загальні відомості

Основне призначення електропривода - перетворювати електричну енергію в механічну й управляти цим процесом. У зв'язку із цим енергетичні показники й характеристики електропривода мають першорядне значення, тим більше, що електропривод споживає близько 60-65% електроенергії, виробленої в країні.

Любою процес передачі й перетворення енергії супроводжується її втратами, тобто вхідна потужність  $P_{вх}$  завжди більше вихідної  $P_{вих}$  на величину втрат  $\Delta P$ , і дуже важливо, як великі ці втрати.

Енергетичну ефективність процесу в цей момент звичайно оцінюють за допомогою коефіцієнта корисної дії (ККД), обумовленого як

$$\eta = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} = \frac{P_{ек}}{P_{ек} + \Delta P} = \frac{P_{ек} - \Delta P}{P_{ек}} = 1 - \frac{\Delta P}{P_{ек}} \quad (6.1)$$

Важливими енергетичними характеристиками виробу - двигуна, перетворювача, редуктора або електропривода в цілому - служить номінальний ККД

$$\eta_n = \frac{P_n}{P_n + \Delta P_n} \quad (6.2)$$

де  $P_n$ ,  $\Delta P_n$  – номінальна вихідна потужність і номінальні втрати, і залежність ККД від відносного навантаження  $\eta = f(P/P_n)$ ; для регульованого електропривода часто зручно використовувати залежності  $\eta = f(\omega)$  при заданому моменті.

У випадках, коли в лінії, що харчує електропривод, напругу й струм не збігаються по фазі й мають несинусоїдальну форму, використовується ще одна енергетична характеристика - коефіцієнт потужності, обумовлений як

$$\chi = \frac{P}{UI} = v \cos \varphi_{(1)} \quad (6.3)$$

де  $P$  – активна потужність;

$v = I/I_{(1)}$  – коефіцієнт перекручувань;

$U$ ,  $I$ ,  $I_{(1)}$  – діючі значення напруги, струму, першої гармоніки струму;

$\varphi_{(1)}$  – кут зрушення між першими гармоніками напруги й струму.

При невеликих перекручуваннях  $v \approx 1$ , тобто

$$\chi \approx \cos \varphi \quad (6.4)$$

При передачі по лінії з деяким активним опором  $R_l$  активної потужності  $P$  при  $\cos \varphi \neq 1$  втрати  $\Delta P$  виростуть у порівнянні із втратами при передачі тієї ж потужності постійним струмом  $\Delta P_{\Sigma}$  у відношенні

$$\frac{\Delta P_{\Sigma}}{\Delta P_{\Sigma}} = \frac{1}{\cos^2 \varphi}$$

Оцінки енергетичної ефективності електропривода виду (6.1) справедливі, як відзначалося, лише, якщо процес незмінний у часі. Якщо ж навантаження помітно міняється в часі, варто користуватися оцінками, обумовленими по енергіях за час  $t$ :

$$W = \int_0^t P(t) dt$$

і

$$\Delta W = \int_0^t \Delta P(t) dt$$

Для циклічних процесів з односпрямованим потоком енергії й часом циклу  $t_{\text{ц}}$  зручним і інформативним показником служить цикловий ККД, обумовлений як

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{W_{\text{ц}}}{W_{\text{ц}} + \Delta W_{\text{ц}}} = \frac{\int_0^{t_{\text{ц}}} P(t) dt}{\int_0^{t_{\text{ц}}} P(t) dt + \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P(t) dt} \quad (6.5)$$

де  $W_{\text{ц}}$  і  $\Delta W_{\text{ц}}$  – корисна енергія й втрати енергії за цикл.

## 2. Оцінка енергетичної ефективності при неодностороннім потокам енергії

Викладене вище ставилося до односпрямованих потоків енергії, коли потужність не міняє знак. Разом з тим, часто зустрічаються випадки, коли напрямок потоку енергії в циклі змінюється: підйом - спуск, розгін - гальмування й т.п. Тут наведена вище формула ККД (6.5) стає недостатньою - очевидно поняття «корисної енергії», інтегрування знакозмінних потужностей позбавлено змісту. Усунути невизначеність можна, умовившись про рівноправність всіх режимів у циклі, якщо вони необхідні для здійснення технологічного процесу й, отже, корисні. Так, гальмовий режим у транспортному засобі нічим не гірше режиму розгону. Утримання руки робота в потрібному місці який-небудь час - теж дуже корисна дія.

Якщо прийняти, що різнополярний графік  $P(t)$  корисний, то природно перейти до визначення корисної енергії  $W$  в (6.5) по наступному вираженню:

$$W = \int_0^t |P(t)| dt \quad (6.6)$$

Для енергетичного каналу (рис. 6.1), що складається із джерела електроенергії, передавальних і перетворювальних ланок, робочого органа, указується місце оцінки – між  $i$ -ою і  $(i+1)$ -ою ланками, а також ті ланки – від  $k$ -ої до  $l$ -ої, у яких ураховуються втрати. Тоді з урахуванням (6.5) показник енергетичної ефективності - узагальнений ККД - має вигляд:

$$H_{\text{цк-1}}^{b,\tau} = \frac{W_{i,i+1}^{b,\tau}}{W_{i,i+1}^{b,\tau} + \sum_{j=k}^l \Delta W_j^{b,\tau}} \quad (6.7)$$

$$\text{де } W_{i,i+1}^{b,\tau} = \int_i^{i+\tau} |P_{i,i+1}(t)| dt;$$

$$\Delta W_j^{b,\tau} = \int_i^{i+\tau} \Delta P_j(t) dt.$$

Верхній індекс указує часовий інтервал – від  $t_1$  до  $t$ , на якому провадиться оцінка.

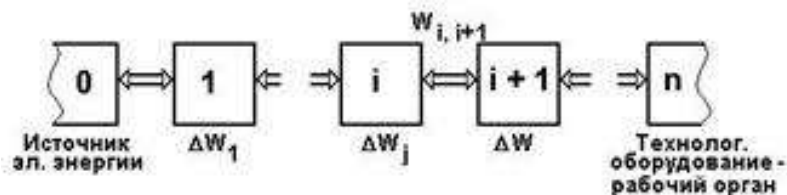


Рис. 6.1. Енергетичний канал електропривода

З (6.7) утворюються вирази (6.1) і (6.5), однак узагальнений показник може дати значно більшу інформацію. Наприклад, якщо вибрати місцем оцінки перетин 0,1 і врахувати втрати у всіх елементах від 1 до  $n$ , те при  $P_{0,1} > 0$  одержимо оцінку

ефективності споживання енергії на інтервалі  $t$ . Оцінка буде працювати й при  $W_{n-1,n} = 0$ , тобто при відсутності електромеханічного перетворення енергії. При оцінці в перетині  $n-1$ ,  $n$  відіб'є ефективність перетворення енергії, тобто міру втрат, якими супроводжується корисна механічна робота, і т.п.

Узагальнений показник зручний для порівняння за енергетичним критерієм різних систем, що виконують однакові функції при відносно складних режимах роботи.

## Лекція №7

### Тема 7. Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна.

#### План

1. Загальні відомості
2. Навантажувальні діаграми механізму й двигуна.

#### 1. Загальні відомості

Звичайно прості задачі проектування мають приблизно наступні формулювання: замість застарілого електропривода даної установки розробити сучасний, із кращими технічними й економічними показниками; замість нерегульованого електропривода агрегату застосувати регульований; розробити електропривод, яким можна замінити імпортований, не забезпечений запасними елементами; розробити електропривод якої-небудь унікальної установки - іспитового стенда, спеціального транспортера й т.п.

Всі завдання проектування зовсім не прості, оскільки можуть бути вирішені різними, у загальному випадку зовсім не рівноцінними способами, а вибір одного рішення, що і буде потім реалізовуватися, повинен бути зроблений на основі ряду критеріїв при обліку системи конкретних обмежень. Назвемо основні етапи інженерного проектування.

Формулювання завдання – перший етап проектування. Це точна вказівка того, що є й чим це не влаштовує й що й у якому смислі повинне стати краще після реалізації проекту. На цьому етапі не потрібні деталі, потрібні лише самі головні риси об'єкта до й після проектування. Якщо цей етап виконаний погано, дуже велика небезпека, що вся подальша праця буде витрачений даремно.

Аналіз завдання – другий етап проектування – виявлення всіх істотних якісних і кількісних ознак створюваного об'єкта у вихідному (до проектування) і кінцевому (після проектування) станах, визначення обмежень і призначення критеріїв, по яких буде оцінюватися якість спроектованого об'єкта.

Пошук можливих рішень – це третій етап проектування. Тут у першу чергу необхідні знання, але крім знань потрібно нестандартне мислення, уміння уникати як консерватизму, так і поспішності; дуже корисні аналоги, зрозуміло, при критичному до них відношенні, відвідування виставок, читання літератури, консультації й т.п.

Навіть у простому випадку доречно запропонувати трохи (багато) рішень, які в принципі відповідають завданню. Коли пропонується багато рішень, зрозуміло, не свідомо негідних, менше шансів пропустити гарне.

Вибір рішення з безлічі можливих на основі критеріїв і з урахуванням обмежень. Це четвертий, дуже відповідальний етап. Тут знову не потрібні надлишкові деталі, крім тих, що дозволяють цілеспрямовано, за критеріями, порівнювати рішення. Тут дуже важливі вірні великі оцінки.

У теорії проектування вводиться поняття негірших рішень, тобто рішень, що попадають у деяку припустиму область по сукупності ознак, і формулюються алгоритми їхнього пошуку.

Детальна розробка обраного технічного рішення. Це п'ятий етап - етап остаточного вибору встаткування, розрахунку характеристик, складання алгоритмів керування, конструктивного компонування вузлів, оцінки основних показників і т.п. П'ятий етап виконується завжди - і в серйозних, і в навчальних проектах. Однак якщо йому не передують перші чотири або якщо вони виконані неякісно, нетворчо, підсумки можуть бути сумними.

Підкреслимо, що, як і всякий творчий процес, конкретне проектування, навіть при дуже жорстких обмеженнях у часі, не розвивається по рівномірній висхідній лінії - неминучі повернення, повтори й т.п. Характерний графік процесу представлений на рис. 7.1. У гарних проектах перші чотири етапи займають не менш 50 % усього часу - при цьому створюється або, точніше, може створюватися дійсно нове й дійсно гарне, краще, чим було, рішення.

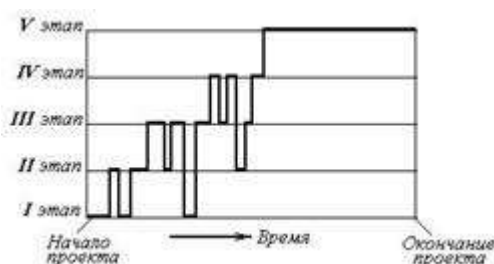


Рис. 7.1. Типовий графік процесу проектування

Вибір двигуна – один з відповідальних етапів проектування привода, тому що саме двигун здійснює електромеханічне перетворення енергії й значною мірою визначає технічні й економічні якості привода в цілому.

Ограничимо завдання розглядом лише вибору потужності двигуна, тобто будемо вважати, що тип двигуна й спосіб керування їм обрані заздалегідь.

Одним з основних вимог до двигуна є надійність його роботи при мінімумі капітальних витрат і експлуатаційних витрат. Ця вимога може бути задоволена лише при виборі двигуна відповідної потужності. Застосування двигуна завищеної потужності спричиняє невиправдане підвищення капітальних вкладень, зниження ККД, а для асинхронних двигунів - погіршення коефіцієнта потужності. Застосування двигунів недостатньої потужності може привести до порушення нормальної роботи механізму, виникненню аварій і скороченню нормального терміну служби двигуна.

Навантаження на двигун при тривалому її впливі обмежується нагріванням, а при короткочасному – його перевантажувальною здібністю.

Перевантажувальна здібність являє собою відношення максимального моменту, що здатний розвинути двигун хоча б короткочасно, до його номінального

$$\lambda = \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}}$$

моменту  $M_{\text{н}}$ . Для асинхронних двигунів максимальний момент обмежений критичним значенням моменту; для синхронних - значенням моменту, при якому можлива усталена робота двигуна в синхронному режимі, для двигунів постійного струму максимальний момент обмежений значенням, при якому комутація струму протікає без небезпечного іскріння на колекторі.

Обмеження по нагріванню двигунів визначається теплостійкістю їхньої ізоляції. При дотриманні встановлених заводом обмежень по температурі термін служби ізоляції

електричних машин становить близько 10 років, що і є нормальним строком їхньої експлуатації. Нагрівання ізоляції вище граничних значень неприпустиме, тому що викликає скорочення терміну служби електричних машин. Граничні температури обмоток двигунів з різними класами ізоляції відповідають номінальному навантаженню двигунів і температурі навколишнього середовища  $+40^{\circ}\text{C}$ . Якщо дійсне значення температури  $t_{\text{нав}} < +40^{\circ}\text{C}$ , те двигун без небезпеки перегріву може бути навантажений трохи вище номінального навантаження; при  $t_{\text{нав}} > +40^{\circ}\text{C}$  навантаження двигуна повинна бути знижена проти номінальної. Граничні температури обмоток двигунів з різними класами ізоляції відповідають номінальному навантаженню двигунів і температурі навколишнього середовища  $+40^{\circ}\text{C}$ . Якщо дійсне значення температури  $t_{\text{нав}} < +40^{\circ}\text{C}$ , те двигун без небезпеки перегріву може бути навантажений трохи вище номінального навантаження; при  $t_{\text{нав}} > +40^{\circ}\text{C}$  навантаження двигуна повинна бути знижена проти номінальної.

При виборі потужності двигуна основними вихідними даними є необхідні моменти, які повинні бути прикладені до вала механізму, необхідні швидкості й прискорення робочого органа механізму. Ці величини повинні бути відомі з вимог технологічного процесу.

Завдання вибору потужності двигуна ускладнюється тим, що в динамічному режимі момент, що розвиває двигуном, не дорівнює моменту статичного

навантаження, а різниця – динамічний момент  $J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}$  – залежить від сумарного моменту інерції приводу, у який входить і момент інерції двигуна. У зв'язку із цим у тих випадках, коли динамічні режими відіграють помітну роль, завдання вирішується у два етапи: попередній вибір двигуна і його перевірка за перевантажувальною здатністю й по нагріванню. В окремому випадку, коли двигун працює переважно в сталих режимах ( $M=M_c$ ), вибір двигуна може бути зроблений безпосередньо по необхідним  $M_c$  і  $\omega$ .

Далі ми будемо розглядати, в основному, загальний випадок.

## 2. Навантажувальні діаграми механізму й двигуна.

Вихідні дані для вибору двигуна звичайно представляються у вигляді навантажувальних діаграм механізму, тобто залежностей  $M_c(t)$  і  $\omega(t)$  і наведеного моменту інерції  $J_m$  (див. п. 2.2). Залежність  $\omega(t)$  іноді називають тахограмою. Іноді  $M_c(t)$  залежить від шляху, у цьому випадку при відомій швидкості можна перебудувати заданий графік  $M_c(\varphi)$ , отримавши його у вигляді  $M_c(t)$ .

Навантажувальні діаграми механізму, взагалі кажучи, можуть мати будь-який вид, однак завжди можна виділити цикл, тобто проміжок часу  $t_{\text{ц}}$ , через який діаграма повторюється. Якщо характер роботи такий, що режими відтворюються погано (ліфт, піднімальний кран і т.п.), будують навантажувальні діаграми для найбільш імовірного або найбільш важкого циклу.

Варто особливо підкреслити, що для обґрунтованого вибору двигуна необхідна навантажувальна діаграма механізму повинна бути відома. На рис. 7.2 як приклад наведені необхідні навантажувальна діаграма й тахограма деякого механізму (верхні для графіка).

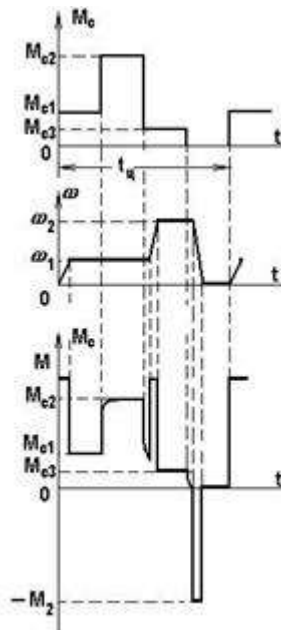


Рис. 7.2. Навантажувальні діаграми механізму й двигуна

Для попереднього вибору двигуна по відомій навантажувальній діаграмі механізму можна знайти середній момент статичного навантаження

$$M_{\text{сєєр}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{c_i} t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}$$

де  $M_{c_i}$  – момент статичного навантаження на  $i$ -ому інтервалі;

$t_i$  – тривалість  $i$ -ого інтервалу;

$n$  – число інтервалів, де  $M_c = \text{const}$ .

Номінальний момент шуканого двигуна з урахуванням динамічних навантажень може бути оцінений як

$$M_n = (1,1 - 1,3) M_{\text{сєєр}}$$

Як номінальну швидкість варто взяти  $\omega_{\text{макс}}$ , якщо регулювання однозонне вниз від основної швидкості, або  $\omega_{\text{мін}}$ , якщо регулювання однозонне нагору від основної швидкості. По знайденим у такий спосіб величинам  $M_n$  і  $\omega_n$  можна вибрати двигун по каталогу й, отже, визначити його момент інерції, побудувати механічні характеристики, криві перехідних процесів.

Після того, як двигун попередньо обраний, можна перейти до побудови навантажувальної діаграми двигуна, тобто залежності  $M(t)$ . Ця побудова зводиться до рішення рівняння руху

$$M = M_c + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}$$

одним з описаних у гл.5 прийомів.

На рис. 7.2 унизу показана навантажувальна діаграма двигуна, побудована в припущенні, що при зміні швидкості  $M \approx \text{const}$ , а при набросі й скиданні навантаження привод працює на лінійній механічній характеристиці.



Неважко бачити, що навантажувальна діаграма двигуна істотно відрізняється від навантажувальної діаграми механізму. На рис. 7.3 - 7.5 показано ще кілька типових навантажувальних діаграм і відповідні динамічні характеристики привода.

Рис. 7.3 відповідає випадку, коли механізм із  $M_c = \text{const}$  працює у режимі швидкості, що змінюється. Ідеалізована динамічна механічна характеристика показана внизу. Слід зазначити, що при побудові навантажувальних діаграм двигуна часто прибігають до подібної ідеалізації, тому що для цілей вибору двигуна деталі діаграми, обумовлені особливостями конкретної характеристики, звичайно несуттєві.

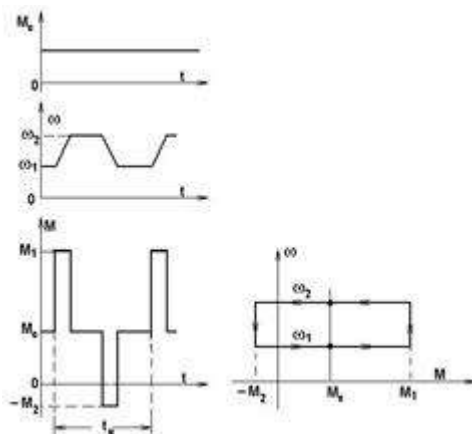


Рис. 7.3. Навантажувальна діаграма при  $M_c = \text{const}$  і  $\omega = \text{var}$

На рис. 7.4 показана навантажувальна діаграма привода, що працює в режимі частих пусків і гальмувань, здійснюваних по характеристиках, наведеним унизу. Графіки  $\omega(t)$   $M(t)$  побудовані відповідно до правил, викладеними в п. 5.2.

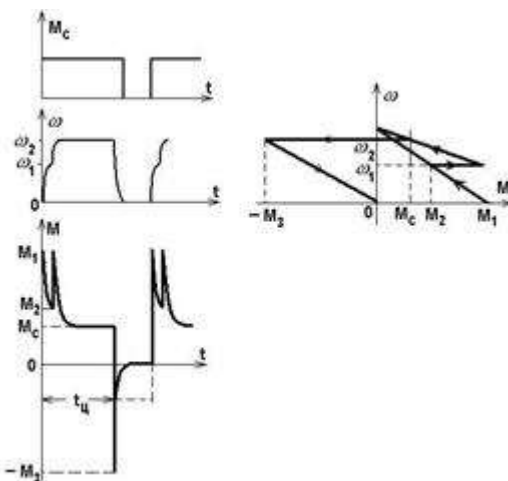


Рис. 7.4. Навантажувальна діаграма при частих пусках - гальмуваннях

На рис. 7.5 показані навантажувальні діаграми електропривода з піковим характером навантаження при лінійній механічній характеристиці двигуна. Момент статичного навантаження змінюється миттєво від  $M_{c0}$  до  $M_{c1}$ . Момент, що розвиває двигуном при додатку  $M_{c1}$  виразиться як

$$M = (M' - M_{c1})e^{-\frac{t}{T_M}} + M_{c1},$$

а при знятті навантаження

$$M = (M' - M_{c0})e^{-\frac{t}{T_M}} + M_{c1},$$

де  $T_m = \frac{J_\Sigma}{|\beta|}$ .

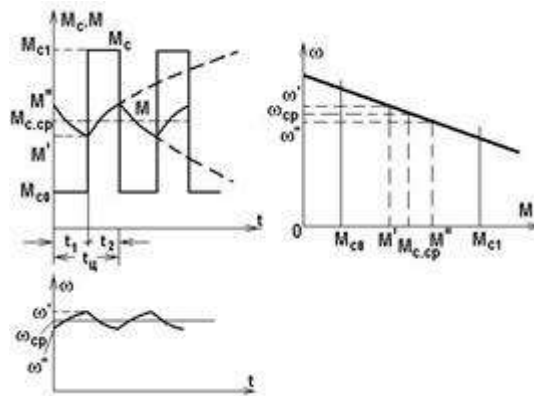


Рис. 7.5. Навантажувальна діаграма маховикового електропривода

Величини  $M(t)$ ,  $M_c(t)$  і  $\omega(t)$ ,  $\omega_c(t)$  при заданих  $t_1$  і  $t_2$  визначаються значенням  $T_m$ . Якщо  $T_m$  мала, то момент, що розвиває двигуном, буде повторювати зміну  $M_c$ . Якщо, навпроти,  $T_m$  велика, то  $M(t)$ ,  $M_c(t)$  і  $\omega(t)$ ,  $\omega_c(t)$  будуть мало відрізнятися від відповідних середніх значень  $M_{c,ср}$  і  $\omega_{ср}$  завдяки тому, що енергія, запасена в обертових частинах привода на інтервалі  $t_1$  ( $M_c=M_{c0}$ ) буде витрачатися на покриття піка навантаження на інтервалі  $t_2$  ( $M_c=M_{c1}$ ). При  $\omega \approx \omega_{ср}$  ця енергія пропорційна площам, заштрихованим на рис. 7.5. «Випрямлення» навантажувальної діаграми двигуна при піковому характері навантаження часто виявляється досить корисним, тому що дозволяє знизити вимоги до перевантажувальної здатності двигуна й зменшити втрати у двигуні.

Збільшення  $T_m$  у цих випадках досягається використанням маховика з моментом інерції  $J_{max}$  ( $J_\Sigma = J_{дв} + J_{макс} + J_{к}$ ) й вибором відповідної величини твердості механічної характеристики двигуна  $\beta$ .

Навантажувальна діаграма двигуна, як відзначалося, є основою для перевірки попередньо обраного двигуна по перевантажувальній здібності й по нагріванню.

Перевірка за перевантажувальною здатністю зводиться до перевірки виконання умови

$$M_{макс} \leq M_{прот}$$

де  $M_{макс}$  - максимальний момент із навантажувальної діаграми двигуна;

$M_{прот}$  - припустимий по перевантаженню момент двигуна.

Для двигуна постійного струму нормального виконання

$$M_{прот} = (2 - 2,5)M_{к}$$

для асинхронного двигуна з урахуванням можливого зниження напруги живлення на 10%

$$M_{прот} = 0,8M_{к}$$

для синхронного двигуна нормального виконання

$$M_{прот} = (2 - 2,5)M_{к}$$

Асинхронні короткозамкнені двигуни додатково перевіряються по пусковому моменті; для нормального пуску повинна виконуватися умова:

$$M_{\text{смакс}} < M_n,$$

де  $M_{\text{смакс}}$  - максимальний момент статичного навантаження, при якому повинен виконуватися пуск привода;

$M_n$  - пусковий момент двигуна.

Перевірка за нагріванням, що зводиться до оцінки фактичної температури ізоляції обмоток двигуна й порівняння її із припустимою, також виконується з використанням навантажувальних діаграм двигуна. Ця операція виконується з використанням теплової моделі двигуна.

## ЛЕКЦІЯ №8

### ТЕМА 8. БУДОВА ТА ПРИНЦИП ДІЇ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ.

#### План

1. Загальні відомості про синхронні машини.
2. Будова синхронного двигуна.
3. Загальні принципи роботи та характеристики електроприводів.

#### 1. Загальні відомості про синхронні машини.

Електричної називають машину, в якій відбувається перетворення механічної енергії в електричну (генератор), або електричної енергії, в механічну (двигун), або електричної енергії в електричну, іншого роду струму, іншої напруги і частоти (перетворювач).

Електричні машини володіють властивістю оборотності: вони можуть працювати як в генераторному, так і в руховому режимі. Залежно від роду струму електричні машини підрозділяють на машини змінного і постійного струму. Найпоширенішими електричними машинами змінного струму є асинхронні електродвигуни, широко вживані як привід верстатів, механізмів і різного технологічного устаткування промислових підприємств.

Асинхронними електродвигунами називають такі електричні машини змінного струму, у яких ротор обертається з частотою, меншої частоти обертання магнітного поля статора. Вони бувають з короткозамкнутим або фазним ротором. Електродвигуни з короткозамкнутим ротором застосовують за відсутності необхідності обмеження великих пускових струмів або регулювання частоти обертання ротора, а з фазним — при необхідності регулювання частоти обертання, плавного пуску і збереження високого пускового моменту електродвигуна.

Асинхронний електродвигун трифазного струму і його основні конструктивні елементи показані на мал. 1.

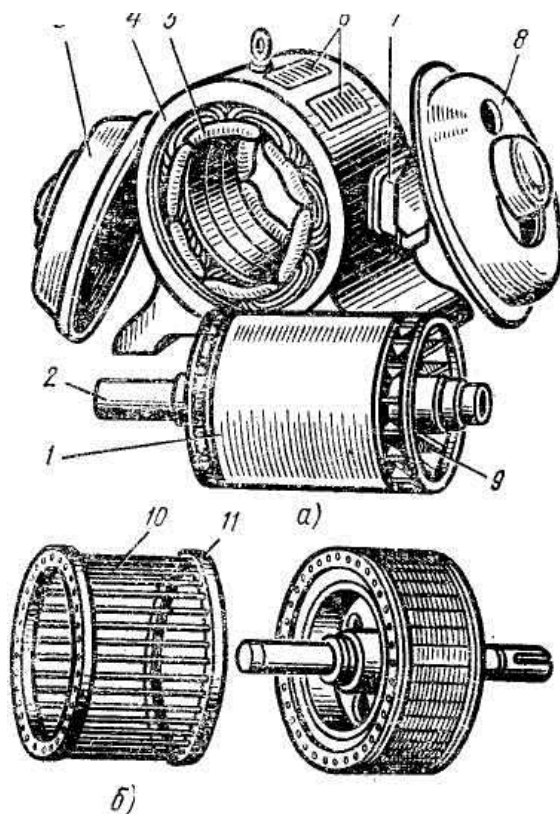


Рис. 8.1. Асинхронний електродвигун трьох фазного змінного струму:

а — розібраний двигун, б) — „біляча клітка» короткозамкнутого ротора, в — короткозамкнутий ротор в зібраному вигляді; 1 — сердечник ротора, 2 — вал, 3 і 4 — підшипникові щити, 5 — станина, 6 — обмотка статора. 7 — жалюзі вентиляційних отворі, 8 — коробка висновків, 9 — вентилятор, 10 — стрижні «білячої клітки», 11 — замикаюче кільце

На промислових підприємствах разом з асинхронними електродвигунами застосовують також електричні машини постійного струму, які служать як генератори постійного струму агрегатів електрозварювань, двигунів різних підйомно-транспортних пристроїв, джерел постійного струму, використовуюваного для антикорозійних покриттів металів гальванічним способом і ін. Перевагами електродвигунів постійного струму перед асинхронними електродвигунами є можливість регулювання в широких межах частоти обертання і великого моменту, що розвивається при пуску машини. Завдяки цим властивостям електричні машини широко використовують як і тягових двигуни кранів електрифікованого транспорту.

Основні конструктивні елементи електричної машини постійного струму показані на рис. 2.

Електричні машини розрізняють по наступних ознаках:

- роду струму (постійний і змінний);
- числу фаз (однофазні і трифазні);
- виконанню ротора (з короткозамкнутим або фазним ротором);

- способу охолодження (з природним охолодженням — двигуни, що не мають охолоджуючих пристроїв, і з самовентильацією—двигатели, що мають вентилятори, укріплені на частині, що обертається). У електродвигунів із зовнішньою самовентильацією охолоджується зовнішня поверхня, а активні частини закриті для доступу повітря;

- формі виконання (на лапах, вбудовані з фланцевим підшипниковим щитом і ін.);

способу захисту від дії навколишнього середовища (відкриті, захищені, каплезахищені, бризгозахищені, водозахищені, закриті, вибухозахищені і герметичні).

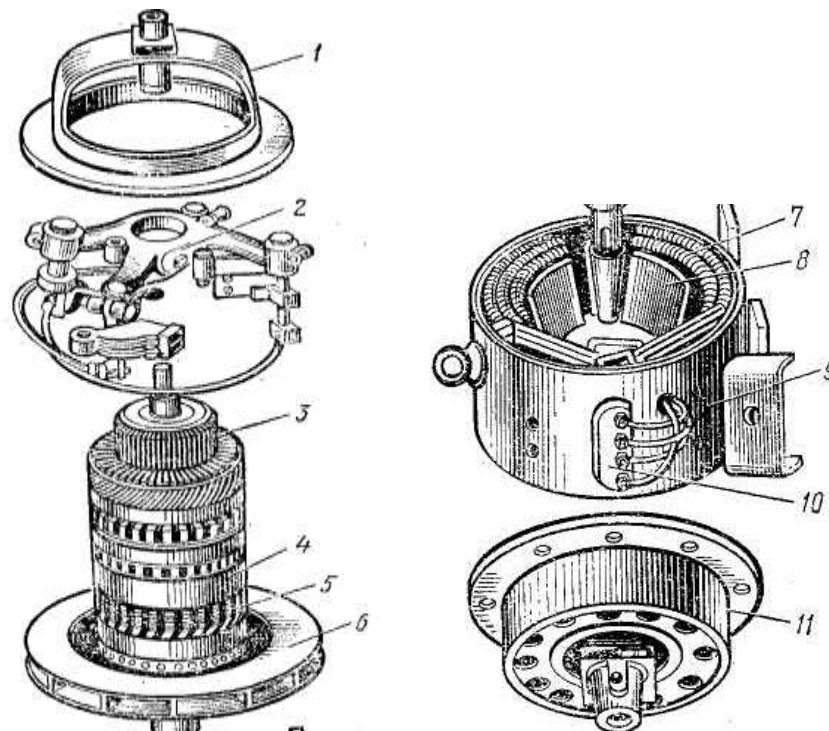


Рис. 8.2. Електрична машина постійного струму:

1 — передній підшипниковий щит, 2 — траверсу з щітковим апаратом, 3 — колектор, 4 — сердечник якоря, 5 — обмотка якоря, 6 — вентилятор, 7 — обмотка полюса, 8 — полюс, 9 — станина, 10 — дошка затисків, 11 — задній підшипниковий щит

Відкриті — електродвигуни, що не мають спеціальних пристроїв, що виключають можливість випадкового дотику до тих, що обертаються і токоведущим частинам, а також попадання сторонніх предметів всередину машини.

Захищені — електродвигуни, що мають пристрої (сітки, ґрати, ковпаки і ін.), що оберігають від випадкового дотику до тих, що обертаються і токоведущим частинам, а також попадання сторонніх предметів, що виключають можливість, всередину машини.

Капельнозахищені — електродвигуни, що мають пристрої, що захищають внутрішні частини машин від попадання в них прямовисно падаючих крапель рідин (води, масла і ін.).

Бризкозахищені — електродвигуни, що мають пристрої (жалюзі, кришки і ін.), що виключають можливість попадання в них водяних бризок, падаючих прямовисно або під кутом  $45^\circ$  з будь-якої сторони.

Водозахищені — електродвигуни, що мають пристрої (сальники, гумові прокладки і ін.), що виключають можливість проникнення води всередину машини при обливанні її струменем води з брандспойта.

Закриті — електродвигуни, внутрішній простір яких відокремлено від зовнішнього середовища.

Вибухозахищені — електродвигуни, корпус яких по міцності і конструкції здатний протистояти вибуху газу, що накопився всередині, не допускаючи при цьому запалювання газів, що містяться в навколишньому машини зовнішньому середовищі.

До 1950 р. електричні машини, що випускаються вітчизняними заводами, при одних і тих же електричних параметрах (потужності, напруги, частоти обертання) мали не тільки різні позначення типів, але відрізнялися також габаритами, масою, настановними розмірами і конструкцією окремих елементів машин, що виключало взаємозамінність окремих деталей електричних машин і тому істотно ускладнювало їх ремонт. З 1950 р. промисловість випускає електричні машини у вигляді єдиних серій, що дозволяє скоротити число різнотипних деталей, а також кількість технологічного оснащення, необхідного для їх виготовлення, уніфікувати \* деталі і складальні одиниці електричних машин, забезпечивши їх взаємозамінність. Так, наприклад, асинхронні електродвигуни з короткозамкнутими роторами і електродвигуни з фазними роторами відповідних габаритів і потужностей мають однакові статори і підшипникові щити. Електродвигуни різних виконань по захисту від дії зовнішнього середовища мають одні і ті ж настановні розміри, що дозволяє замінювати один двигун іншим без переробки фундаментів, перестановки санчат або зміни відстаней між отворами для болтів кріплення електродвигуна до підстави.

Колекторні пластини машини запресовані в пластмасі. Усередині колектора є сталева втулка для насадки його на вал якоря. Над колектором розташована траверса 6 щіткотримачів, прикріплена болтами до переднього підшипникового щита 11, що має отвори овальної форми, які дозволяють переміщати траверсу по колу і встановлювати щітки по нейтралі машини.

Якір обертається в шарикопідшипниках 9 і 21, зовнішні кільця яких вставлені в отвори підшипникових щитів 11 і 19. Підшипники закриті зсередини кришками 8 до 23, а зовні — кришками 10 і 22. Балансування якоря здійснюється за допомогою сталевого диска 7, у відповідних точках якого (в процесі балансування) просвердлюють отвори, регулюючи таким чином рівномірний розподіл маси якоря по його колу. Розташування, кількість і розміри отворів в дисках залежать від розташування і величини дисбалансу. Балансирується і сторона якоря, де розташований вентилятор.

При роботі електричних машин виникають електромагнітні коливання, що створюють перешкоди радіоприйому. Для придушення цих перешкод електрична

машина забезпечена спеціальним помехоподавляючим пристроєм, що складається з конденсаторів 15, розташованих під дошкою 14, і затисків 13.

Система вентиляції машини — аксіальна і здійснюється повітрям, засмоктуваним вентилятором 20 через жалюзі переднього підшипникового щита 11 і що викидається через ґрати заднього підшипникового щита 19. До станини машини приварені лапи, якими за допомогою болтів вона кріпиться до рами або фундаменту.

Пристрій машини П-41 характерний для машин постійного струму єдиної серії П з 1-го по 6-й габарити. Машини постійного струму цієї серії великих габаритів декілька відрізняються по своїй конструкції від машини, показаної на мал. 35, а.

Наприклад, в машині П-91 9-го габариту (мал. 35, би) сердечник якоря має відкриті пази, в які вкладені жорсткі котушки обмотки, і горизонтальні крізні вентиляційні канали, 27, поліпшуючі умови охолодження сердечника і обмотки якоря. Нажімніє шайби, що пресують листи сердечника якоря, віділлють з чавуну у вигляді трьох кілець, сполучених ребрами.

Колектор має чавунну втулку 26, що спирається на вал трьома ребрами. Сталеві нажимніє конуси 25 колектора ізольовані від пластин горячепресованими манжетами з міканіта.

Обмотка має гнуті головки тільки на стороні вільного кінця валу, оскільки виконана з одновіткових котушок. Лобові і пазові частини обмотки якоря утримуються бандажами 28, намотаними із сталевого дроту. На додаткові полюси, виконані з товстої смугової сталі, надіті котушки, які утримуються на полюсах штампованою рамкою. Котушки намотані з мідних шин прямокутного перетину.

Ротор обертається в підшипниках каченія: у кульковому — на стороні колектора і роликівому — на стороні вільного кінця валу.

Станина машини П-91 — зварна гнута з листової сталі з привареними до неї лапами для установки і кріплення болтами на фундаменті або рамі.

## 2. Будова синхронного двигуна.

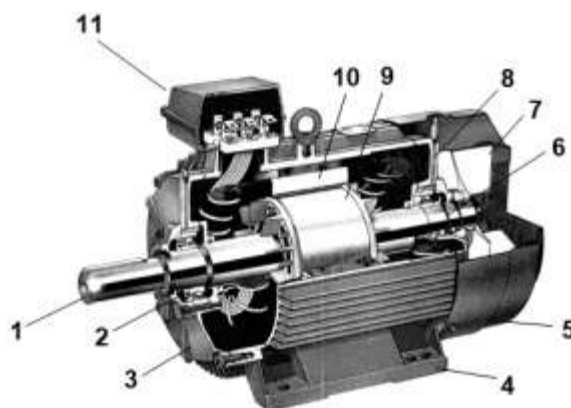


Рис. 8.3: 1 — вал; 2, 6 - підшипники; 3, 8 — підшипникові щити; 4 — лапи; 5 — кожух вентилятора; 7 — крильчатка вентилятора; 9 — короткозамкнутий ротор; 10 — статор; 11 — коробка виводів.

Основними частинами асинхронного двигуна є статор (10) і ротор (9).

Статор має циліндричну форму, і збирається з листів сталі. У пазах сердечника статора укладені обмотки статора, які виконані з обмотувального дроту. Осі обмоток зрушені в просторі один відносно одного на кут  $120^\circ$ . Залежно від напруги, що подається, кінці обмоток з'єднуються трикутником або зіркою.

**Ротори асинхронного двигуна** бувають двох видів: короткозамкнутий і фазний ротор.

Короткозамкнутий ротор є сердечником, набраним з листів сталі. У пази цього сердечника заливається розплавлений алюміній, внаслідок чого утворюються стержні, які замикаються накоротко торцевими кільцями. Ця конструкція називається «кліткою білки». У асинхронних двигунах великої потужності замість алюмінію може застосовуватися мідь. «Біляча клітина» є короткозамкнутою обмоткою ротора, звідки власне назва.

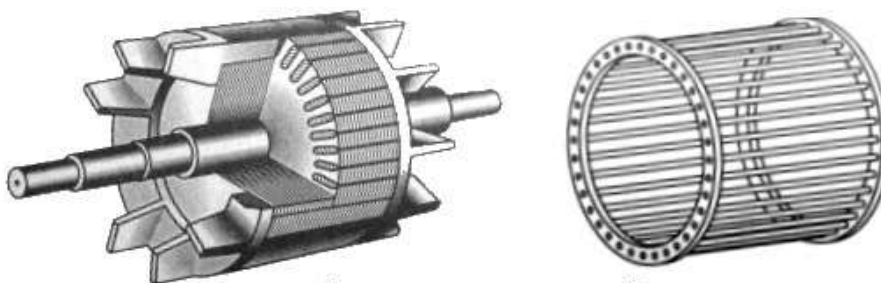


Рис. 8.4. Короткозамкнутий ротор і «біляча клітка»

Фазний ротор має трифазну обмотку, яка практично не відрізняється від обмотки статора. У більшості випадків кінці обмоток фазного ротора з'єднуються в зірку, а вільні кінці підводяться до контактних кілець. За допомогою щіток, які підключені до кілець, в ланцюг обмотки ротора можна вводити додатковий резистор. Це треба для того, щоб можна було змінювати активний опір в ланцюзі ротора, тому що це сприяє зменшенню великих пускових струмів. Детальніше про фазний ротор можна прочитати в пункті — [асинхронний двигун з фазним ротором](#).

### 3. Загальні принципи роботи та характеристики електроприводів.

При поданні до обмотки статора напруги, в кожній фазі створюється магнітний потік, який змінюється з частотою напруги, що подається. Ці магнітні потоки зрушені один відносно одного на  $120^\circ$ , як в часі, так і в просторі. Результуючий магнітний потік виявляється таким, що при цьому обертається.

Результуючий магнітний потік статора обертається і тим самим створює в провідниках ротора електрорушійну силу. Оскільки обмотка ротора, має замкнутий електричний ланцюг, в ній виникає струм, який у свою чергу взаємодіючи з магнітним потоком статора, створює пусковий момент двигуна, прагнучий повернути ротор у напрямі обертання магнітного поля статора. Коли він досягає значення, гальмівного моменту ротора, а потім перевищує його, ротор починає обертатися. При цьому виникає так зване ковзання.



Ковзання  $s$  — це величина, яка показує, наскільки синхронна частота  $n_1$  магнітного поля статора більша, ніж частота обертання ротора  $n_2$ , в процентному співвідношенні.

Для асинхронних двигунів ковзання це у край важлива величина. У початковий момент часу вона дорівнює одиниці, але у міру зростання частоти обертання  $n_2$  ротора відносна різниця частот  $n_1 - n_2$  стає менше, внаслідок чого зменшуються електрорушійна сила і струм в провідниках ротора, що спричиняє за собою зменшення обертового моменту. У режимі холостого ходу, коли двигун працює без навантаження на вал, ковзання мінімальне, але зі збільшенням статичного моменту, воно зростає до величини  $s_{кр}$  — критичного ковзання. Якщо двигун перевищить це значення, то може статися так зване перекидання двигуна, і привести надалі до його нестабільної роботи. Значення ковзання лежить в діапазоні від 0 до 1, для асинхронних двигунів загального призначення воно складає в номінальному режимі — 1-8%.

Як тільки настане рівновага між електромагнітним моментом, що викликає обертання ротора і гальмівним моментом створюваним навантаженням на вал двигуна процеси зміни величин припиняться.

Виходить, що принцип роботи асинхронного двигуна полягає у взаємодії магнітного поля статора і струмів, які наводяться цим магнітним полем в роторі, що обертається. Причому обертовий момент може виникнути тільки в тому випадку, якщо існує різниця частот обертання магнітних полів.

### Асинхронний двигун з фазним ротором

**Асинхронний двигун з фазним ротором** — це двигун, який можна регулювати за допомогою додавання в ланцюг ротора додаткових опорів. Зазвичай такі двигуни застосовуються при пуску з навантаженням на валу, оскільки збільшення опору в ланцюзі ротора, дозволяє підвищити пусковий момент і зменшити пускові струми. Цим асинхронний двигун з фазним ротором вигідно відрізняється від ПЕКЛО з короткозамкнутим ротором.

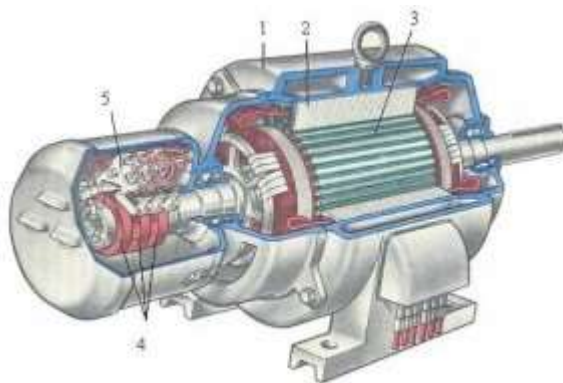


Рис. 8.5

Статор (2) виконаний, так само як і в звичайному асинхронному двигуні, він представляє з себе порожнистий циліндр, набраний з листів електротехнічної сталі, в який укладена трифазна обмотка.

Ротор (3) в порівнянні з короткозамкнутим, представляє з себе складнішу конструкцію. Він складається з сердечника в який укладена трифазна обмотка,

аналогічно обмотці статора. Звідси назва двигуна. Якщо двигун двополюсний, то обмотки ротора зміщені геометрично один відносно одної на 120. Ці обмотки з'єднуються з трьома контактними кільцями (4), розташованими на валу ротора. Контактні кільця виконані з латуні або сталі, причому одине від одного вони ізолювані. За допомогою декількох метал-графітових щіток (зазвичай двох), які розташовані на щіткотримачі (5) і притискаються пружинами до кілець, в ланцюг вводяться додаткові опори. Виводи обмоток з'єднуються за схемою «зірка».

Додатковий опір вводиться тільки при пуску двигуна. Причому ним зазвичай служить ступінчастий реостат, опір якого зменшують зі збільшенням оборотів двигуна. Таким чином пуск двигуна здійснюється теж ступінчасто. Після того, як розгін закінчився і двигун вийшов на природну механічну характеристику, обмотку ротора закорочують. Для того, щоб зберегти щітки і понизити втрати на них, в двигунах з фазним ротором існує спеціальний пристрій, який піднімає щітки і замикає кільця. Таким чином, вдається підвищити ще і ККД двигуна.

Додатковий опір дозволяє головним чином здійснити пуск двигуна під навантаженням, працювати з ним тривалий час двигун не може, оскільки механічні характеристики занадто м'які і робота двигуна на них нестабільна.

Для того, щоб автоматизувати пуск двигуна, в обмотку ротора включають індуктивність. У момент пуску, частота струму в роторі найбільша, а значить і індуктивний опір максимальний. Потім, при розгоні двигуна, частота, як і опір зменшуються, і двигун поступово починає працювати в звичайному режимі.

За рахунок ускладнення своєї конструкції, **асинхронний двигун з фазним ротором**, має хороші пускові і регульовальні характеристики. Але з тієї ж причини, його вартість зростає приблизно в 1.5 в порівнянні із звичайним асинхронним двигуном, крім того збільшується маса, розміри і як правило, зменшується надійність двигуна.

### **Синхронний двигун**

На відміну від асинхронного двигуна частота обертання синхронного двигуна постійна при різних навантаженнях. Синхронні двигуни знаходять застосування для приводу машин постійної швидкості (насоси, **компресори**, вентилятори).

#### **Будова синхронного двигуна**

В статорі синхронного двигуна розміщена обмотка, яка підключається до мережі трифазного струму і утворює магнітне поле, що обертається. Ротор двигуна побудований із сердечника з обмоткою збудження. Остання через контактні кільця підключається до джерела постійного струму. Струм проходячи через обмотку збудження породжує магнітне поле, яке намагнічує ротор.

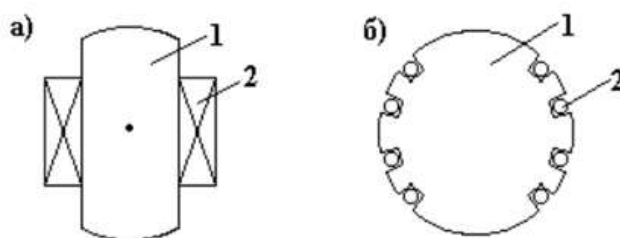


Рис. 8.6

Ротори синхронних моторів можуть бути явнополюсними (з явно вираженими полюсами) і неявнополюсними (з неявно вираженими полюсами). На зображенні вище а) показаний сердечник 1 явнополюсного ротора з полюсами, що виступають. На полюсах розміщені котушки збудження 2. На зображенні б) показаний неявнополюсний ротор, який є феромагнітним циліндром 1. На поверхні ротора в осьовому напрямі фрезерують пази, в які вкладають обмотку збудження 2.

### Принцип дії синхронного двигуна

Розглянемо принцип роботи синхронного двигуна на моделі.

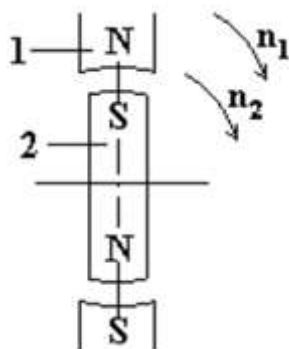


Рис. 8.7

На рисунку зліва магнітне поле статора, який обертається, зобразимо у вигляді магніта 1. Намагнічений ротор покажемо у вигляді магніта 2. Повертаємо магніт 1 на кут  $\alpha$ . Північний магнітний полюс першого магніта (1) притягне південний полюс другого магніта (2), а південний полюс першого магніта (1) – північний полюс другого магніта (2). Другий магніт (2) обернеться на такий же кут  $\alpha$ . Обертатимемо перший магніт (1). Другий магніт (2) обернеться разом з першим магнітом (1), причому частоти обертання обох магнітів будуть однаковими, синхронними,  $n_2=n_1$ .

### Синхронний реактивний двигун

Синхронний реактивний двигун — це тип синхронного двигуна, на роторі якого відсутня обмотка збудження.

В якості матеріалу для ротора синхронного реактивного двигуна використовується феромагнетик з явновираженими полюсами. Магнітне поле статора обертається та намагнічує ротор. Явнополюсний ротор володіє неоднаковими магнітними опорами по поздовжній та поперечній осях полюса. Силві лінії магнітного поля статора вигинаються і прагнуть пройти шляхом з меншим магнітним опором. Завдяки пружним властивостям силових ліній деформація магнітного поля викличе реактивний момент, котрий обертатиме ротор синхронно з полем статора.

### Пуск в хід і регулювання частоти обертання синхронного двигуна

У синхронному двигуні відсутній початковий пусковий момент. При підключенні обмотки якоря до мережі змінного струму, коли ротор нерухомий, а через обмотку збудження проходить постійний струм, то як результат за один період зміни струму електромагнітний момент двічі мінятиме свій напрям, а це означає, що середній момент за період буде рівний нулю.

Звідси випливає, що для того, аби запустити синхронний двигун потрібно розігнати його ротор з використанням зовнішнього моменту до частоти обертання, близької до синхронної. Тому синхронний двигун пускають в хід як асинхронний, для чого його забезпечують спеціальною короткозамкнутою пусковою обмоткою.

## ЛЕКЦІЯ №9

### ТЕМА 9. ОСОБЛИВОСТІ ПУСКУ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТА АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ.

План

1. Пуск двигунів постійного струму.
2. Пуск асинхронних двигунів.
3. Механічні та електромеханічні характеристики електродвигунів постійного струму, гальмівні режими, регулювання частоти обертання.

#### 1. Пуск двигунів постійного струму.

З формули (3) випливає, що в першу мить після включення двигуна в мережу постійної напруги, тобто коли  $n = 0$  і  $E = k_e \Phi n = 0$ ,

$$I_{\text{я}} = \frac{U}{r_{\text{я}}}.$$

Так як опір  $r_{\text{я}}$  невелика, то струм якоря може в 10 ... 30 разів перевищувати номінальний струм двигуна, що неприпустимо, оскільки призведе до сильного іскріння і руйнування колектора. Крім того, при такому струмі виникає неприпустимо великий момент двигуна, а при частих пусках можливий перегрів обмотки якоря.

Щоб зменшити пусковий струм в ланцюзі якоря, включають пусковий **резистор**, опір якого в міру збільшення частоти обертання двигуна зменшують до нуля. Якщо пуск двигуна автоматизований, то пусковий резистор виконують з декількох ступенів, які вимикають послідовно в міру збільшення частоти обертання.

Пусковий струм якоря

$$I_{\text{яII}} = \frac{U}{r_{\text{я}} + r_{\text{II}} + r_{\text{Д}}}.$$

У міру розгону двигуна в обмотці якоря зростає ЕРС, а як впливає з формули (3), це призводить до зменшення струму якоря  $I$  я. Тому в міру збільшення частоти обертання двигуна опір в ланцюзі якоря зменшують. Щоб при порівняно невеликому пусковому струмі отримати великий пусковий момент, пуск двигуна здійснюють з найбільшим магнітним потоком. Отже, струм порушення при пуску повинен бути максимально допустимим, тобто номінальним.

## 2. Пуск асинхронних двигунів.

Під час ввімкнення асинхронного двигуна в мережу змінного струму по обмотках його статора й ротора протікатимуть струми, сила яких у кілька разів більша від номінальної. Це пояснюється тим що обертове магнітне поле перетинає обмотку нерухомого ротора з високою частотою, яка дорівнює частоті обертання магнітного поля у просторі, й індукує в цій обмотці велику ЕРС. Ця ЕРС утворює в колі ротора струм великої сили, що обумовлює виникнення струму відповідної сили і в обмотці статора.

Зі збільшенням частоти обертання ротора ковзання зменшується, що призводить до зниження ЕРС і сили струму в роторній обмотці. Це в свою чергу обумовлює зменшення сили струму в обмотці статора.

Велика сила пускового струму небажана як для двигуна, так і для джерела, від якого двигун одержує енергію. Коли пуски здійснюються часто, то велика сила пускового струму призводить до різкого підвищення температури обмоток двигуна, а це може обумовити передчасне старіння його ізоляції. У мережі при великій силі струму знижується напруга, що впливає на роботу інших приймачів енергії, ввімкнених у цю ж мережу. Тому прямий пуск двигуна безпосереднім ввімкненням його в мережу допускається лише в тому разі, коли потужність двигуна набагато менша від потужності джерела енергії, яке живить мережу. Якщо потужність двигуна порівнянна з потужністю джерела енергії, то треба зменшити силу струму, споживаного цим двигуном під час пуску.

У двигунів із фазним ротором дуже хороші пускові характеристики. Щоб знизити, силу пускового струму, обмотку ротора замикають на активний опір, який називається пусковим реостатом (рис. 9.1).



Рис. 9.1. Пуск асинхронного двигуна з фазним ротором за допомогою пускового реостата: 1 – контактні кільця фазного ротора; 2 – обмотка статора; 3 –

резистор.

Якщо такий опір ввімкнути в коло роторної обмотки, то сила струму в ній знизиться, а отже, знизяться сила струму в статорній обмотці і сила струму, споживаного двигуном із мережі. При цьому збільшуються активна складова роторного струму і обертаючий момент, що розвивається двигуном під час пуску.

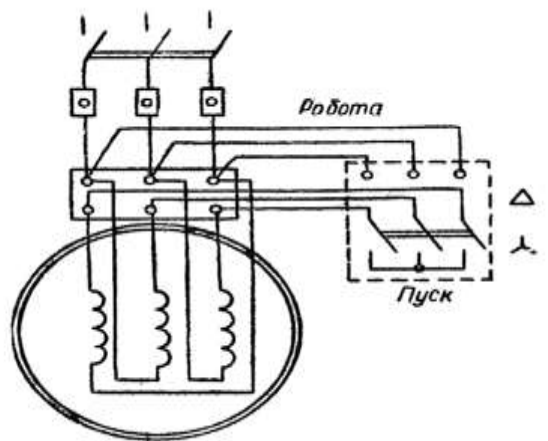
У пускових реостатів є кілька контактів, тому можна поступово зменшувати опір, введений в коло роторної обмотки. Після досягнення ротором нормальної частоти обертання реостат повністю виводиться, тобто роторну обмотку замикають накоротко. За нормальної частоти обертання ротора ковзання мале і ЕРС, що індукується в його обмотці, також незначна. Тому в колі ротора не потрібен жодний додатковий опір.

Пускові реостати працюють нетривалий час у процесі розгону двигуна і розраховуються на короточасну дію. Якщо реостат буде ввімкненим тривалий час, то він вийде з ладу.

Пуск двигуна з короткозамкненим ротором при малій потужності його порівняно з потужністю джерела енергії здійснюють безпосереднім увімкненням у мережу. У разі великої потужності двигуна силу пускового струму зменшують, знижуючи прикладену напругу. Щоб знизити напругу на час пуску, двигун вмикають у мережу через знижувальний автотрансформатор або реактори. Якщо ротор обертається з нормальною частотою, двигун перемикають на повну напругу мережі.

Недоліком такого способу пуску двигуна є різке зменшення пускового моменту. Для зниження сили пускового струму в  $n$  разів треба прикладену напругу також знизити в  $n$  разів. При цьому пусковий момент, прямо пропорційний квадратові напруги, зменшиться в  $n^2$  разів.

Отже, зниження напруги допускається під час пуску двигуна без навантаження або з малим навантаженням, коли пусковий момент може бути невеликим.



*Рис.. 9.2. Схема пуску короткозамкненого асинхронного двигуна*

*перемиканням обмотки статора з зірки на трикутник*

Часто застосовують пуск двигунів способом перемикання статорної обмотки з зірки на трикутник (рис. 9.2). В момент пуску статорну обмотку з'єднують зіркою, а після того як двигун розв'є частоту, наближену до нормальної, її перемикають трикутником. За такого способу пуску двигуна сила пускового струму в мережі знижується в три рази порівняно з силою пускового струму, який споживався б двигуном, коли б статорна обмотка під час пуску була з'єднана трикутником. Цей спосіб пуску можна застосовувати для двигуна, статорна обмотка якого, живлячись від мережі з певною напругою, має бути з'єднана трикутником.

3. Механічні та електромеханічні характеристики електродвигунів постійного струму, гальмівні режими, регулювання частоти обертання.

*Механічною характеристикою електродвигуна обертального руху називають залежність кутової швидкості його вала від електромагнітного обертового моменту  $\omega = f(M)$ .*

Механічні характеристики електродвигунів можуть бути природними і штучними. Природною механічною характеристикою електродвигуна називають залежність швидкості обертання двигуна від створюваного ним моменту при номінальних параметрах живильної мережі, номінальному магнітному потоці і при відсутності додаткових опорів у колі якоря (ротора) і статора.

Якщо природна механічна характеристика не задовольняє тих або інших вимог виробничого механізму, то використовують штучні механічні характеристики. Вони також являють собою залежність швидкості обертання двигуна від створюваного ним моменту, але при неномінальних параметрах.

*Електромеханічною характеристикою електродвигуна називають залежність його кутової швидкості від струму якоря  $\omega = f(I)$ .*

Величина зміни швидкості при зміні моменту у різних двигунів неоднакова і залежить від коефіцієнта жорсткості  $\beta$  механічної характеристики

$$\beta = dM / d\omega \quad (1.1.2)$$

Механічні характеристики електродвигунів за жорсткістю поділяють ься на абсолютно жорсткі, жорсткі та м'які.

*Абсолютно жорсткою* (рис. 3, пряма 1)  $\beta = \infty$  називають механічну характеристику, при якій із зміною обертального моменту швидкість двигуна не змінюється. Таку характеристику мають синхронні двигуни.

*Жорстка* (рис. 3, пряма 2) - механічна характеристика, коли зі зміною обертального моменту в широких межах кутова швидкість двигуна змінюється дуже мало. Таку характеристику мають електродвигуни постійного струму незалежного (паралельного) збудження та асинхронні двигуни, що працюють при ковзаннях, менших від критичного (рис. 3, крива 3).

*М'якою* (рис. 3, крива 4) називають механічну характеристику, де невелика зміна обертального моменту викликає значну зміну швидкості двигуна. Таку характеристику мають електродвигуни постійного струму послідовного збудження.

*Абсолютно м'якою* (рис. 3, пряма 5) називають механічну характеристику, коли момент двигуна при зміні швидкості залишається сталим ( $\beta = 0$ ). Таку характеристику мають електродвигуни постійного струму незалежного збудження при живленні їх від джерела струму або при роботі в замкнених системах ЕП в режимі стабілізації струму якоря.

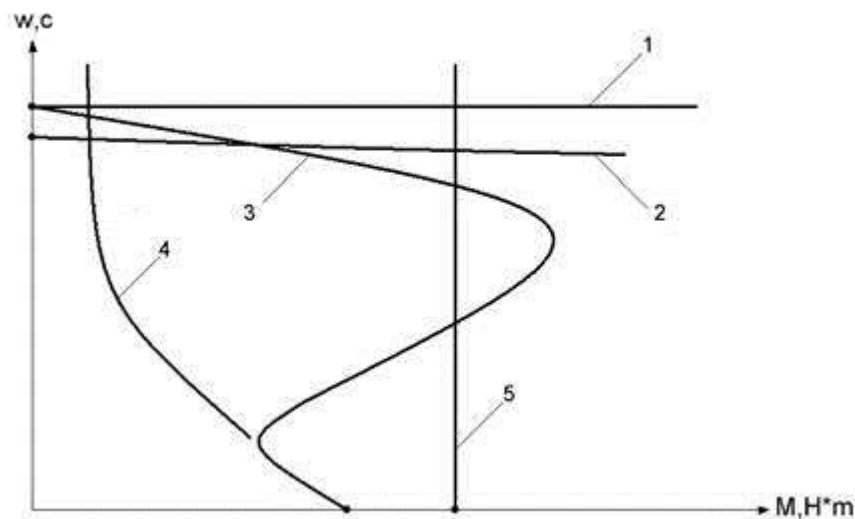


Рис. 9.3. Графіки механічних характеристик електродвигунів

### Статична стійкість системи електродвигун - робоча машина

Під статичною стійкістю системи електродвигун - робоча машина розуміють здатність електропривода повертатися в ustalений режим без допомоги регулятора, а тільки завдяки механічним характеристикам двигуна і робочої машини після того, як система під дією збурювання була виведена з цього режиму. Збурювання надходить у систему як від робочої машини у вигляді зміни навантаження, так і від електропривода при зміні напруги, частоти, опору окремих кіл.

Умову статичної стійкості електрифікованого агрегата можна записати так:

$$tgj = tgf \quad (1.1.3)$$



де  $\text{tgj}, \text{tgf}$  - відповідно тангенси кутів нахилу відносно осі механічної швидкості характеристикам двигуна і механічної характеристики робочої машини.

Таким чином, робота електрифікованого агрегата в точці усталеного режиму буде стійкою, якщо біля цієї точки тангенс кута нахилу механічної характеристики двигуна відносно осі швидкості буде меншим від тангенса кута нахилу механічної характеристики робочої машини.

Можливість стійкої роботи асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором на ділянці механічної характеристики, де ковзання понад критичне, цілком залежить від характеру змінювання статичного моменту при зміні швидкості.

Під динамічною стійкістю розуміють здатність електропривода відновлювати усталений режим роботи, порушений збурюючими діями, що змінюються швидко. У цьому випадку виникає значний динамічний момент, який при зниженні швидкості діє в напрямі обертаючого моменту двигуна і допомагає йому переборювати момент статичних опорів робочої машини, а при підвищенні швидкості - направлений проти обертаючого моменту і створює додаткове навантаження на валу двигуна

Механічні та електромеханічні характеристики двигунів постійного струму незалежного і паралельного збуджень

Аналітичні вирази механічних та електромеханічних характеристик двигуна постійного струму незалежного (паралельного) збудження можна одержати з рівняння рівноваги між напругою, прикладеною до якірного кола, та електрорушійною силою (е.р.с.) якоря і спадом напруги в якірному колі при усталеному режимі роботи двигуна.

$$U = E + I \cdot R, \quad (1.1.4)$$

де  $U$  - напруга прикладена до якірного кола, В;

$E$  - е.р.с. якоря, В;

$I \cdot R$  - спад напруги в якірному колі, В.

Опір  $R$  складається з внутрішнього опору якірного кола  $R_{\text{я}}$  та зовнішнього додаткового опору резистора  $R_{\text{д}}$

Е.р.е. якоря

$$E = K \cdot \Phi \cdot \omega \quad (1.1.5)$$

де  $K$ -коефіцієнт, який залежить від конструктивних даних двигуна (конструктивний коефіцієнт);

$\Phi$  - магнітний потік, Вб;

$\omega$  - кутова швидкість обертання вала двигуна,  $\text{с}^{-1}$ .

Конструктивний коефіцієнт

$$K = \frac{pN}{2\pi a} \quad (1.1.6)$$

де  $p$  - кількість пар полюсів;

$N$  і  $a$  - кількість активних провідників і паралельних віток обмотки якоря.

Розв'язавши спільно рівняння (1.1.4) і (1.1.5), відносно  $\omega$  одержимо аналітичний вираз електромеханічної характеристики двигуна

$$U - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} = K \cdot \Phi \cdot \omega \quad (1.1.7)$$

$$\omega = \frac{U}{K\Phi} - I \frac{R_{\text{я}}}{K\Phi} \quad (1.1.8)$$

Електромагнітний момент, який розвивається електродвигуном, пропорційний його магнітному потоку  $\Phi$  і струму в колі якоря  $I$ , тобто

$$M = K \cdot \Phi \cdot I \quad (1.1.9)$$

звідки

$$I = M / K \cdot \Phi \quad (1.1.10)$$

Підставивши у формулу (1.1.8) значення струму, визначене за формулою (1.1.10), одержимо аналітичний вираз механічної характеристики

$$\omega = \frac{U}{K\Phi} - M \frac{R_{\text{я}}}{K^2\Phi^2} \quad (1.1.11)$$

Початкові ординати (відрізки, що відтинаються прямими на осях ординат) виражають швидкість ідеального холостого ходу  $\omega_0$  двигуна, тобто

$$\omega_0 = U / K \cdot \Phi \quad (1.1.12)$$

Таку швидкість двигун мав би в тому разі, коли б на його валу не було навантаження і втрат у двигуні.

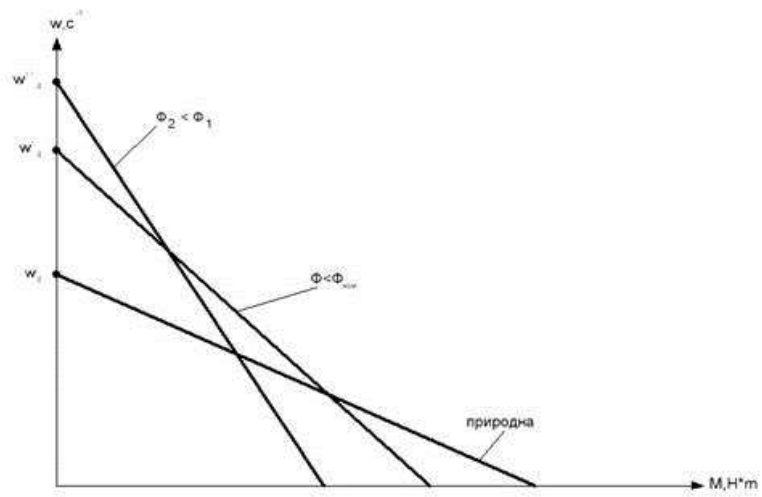
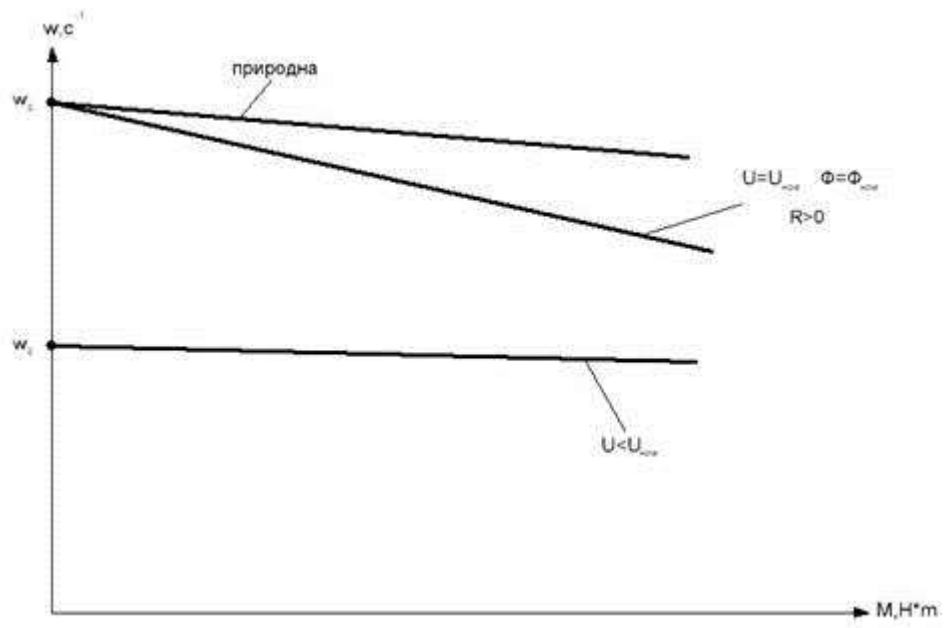


Рис. 9.4. Механічні характеристики двигунів постійного струму незалежного (паралельного) збудження

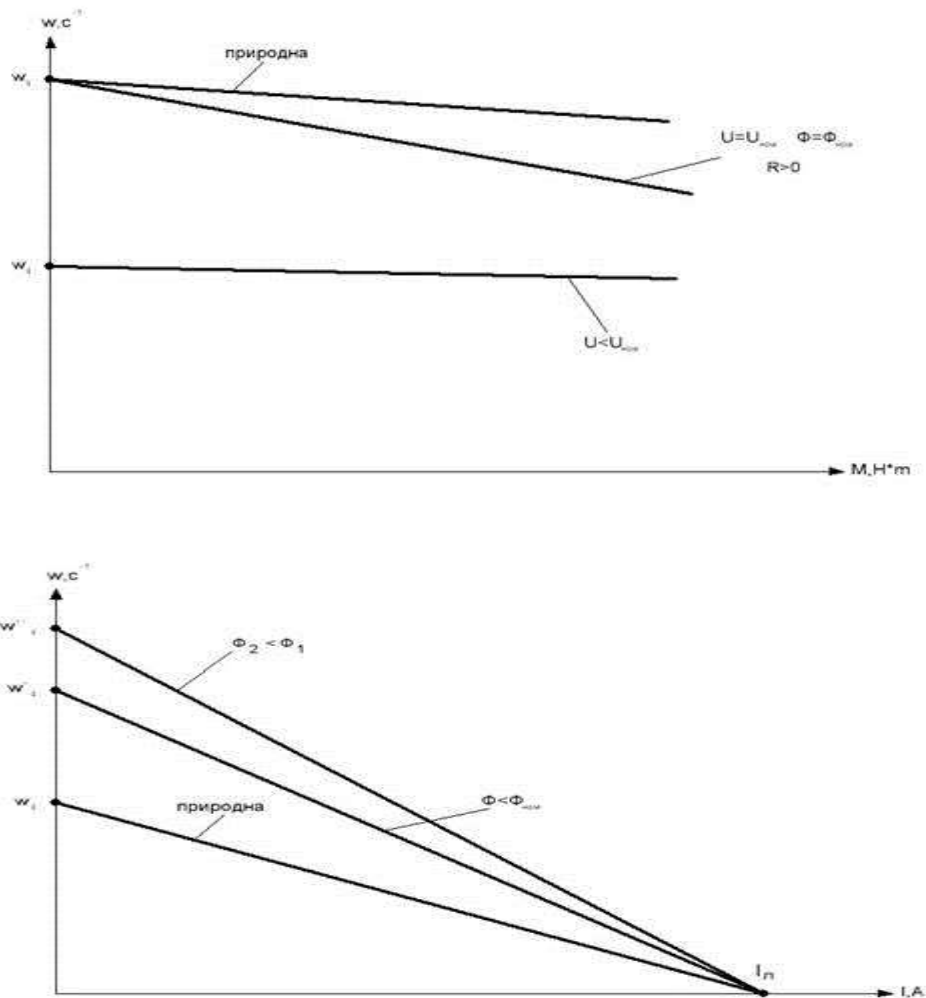


Рис. 9.5. Електромеханічні характеристики двигунів постійного струму незалежного (паралельного) збудження

### ЛЕКЦІЯ №10.

### ТЕМА 10. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МЕХАНІКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ.

План

1. Регулювання частоти обертання.
2. Однофазні асинхронні двигуни.
3. Синхронні трифазні електродвигуни.

#### 1. Регулювання частоти обертання.

Включення опору в ланцюг **ротора** приводить до збільшення втрат потужності і зниженню швидкості за рахунок збільшення ковзання, оскільки  $\omega = \omega_0(1 - S)$ ;  $u = 1 - S$ . Наприклад при наявності навантаження  $M_c$  (рис 1) крива 4 швидкість зменшення від  $\gamma_1$  до  $\gamma_2$ . Таким чином звичайно регулюють швидкість тільки при вентиляторному характері навантаження, тому що втрати в роторному ланцюзі пропорційні моменту і ковзанню, а саме  $\Delta P = M \cdot \omega_0 \cdot S$ .

Частоту обертання можна регулювати зміною напруги на зажимах статора в тому випадку, якщо застосовувати спеціальні з великим активним опором ротори

короткозамкнені електродвигуни або двигуни з контактними кільцями, у ланцюг ротора яких ввімкнений додатковий опір. В обох випадках домагаються того, щоб критичне ковзання було великим. Тоді якщо на валу є навантаження можна домогтися помітного зниження швидкості.

Регулювати частоту обертання короткозамкненого асинхронного електродвигуна зниженням напруги може тільки при вентиляторному характері навантаження. Так як всі втрати виділяються у вигляді теплоти всередині двигуна, то при постійному моменті опору двигун швидко перегрівається. Як регулятори напруги застосовують трифазні автотрансформатори з плавним або ступеневим регулюванням, тиристорні регулятори.

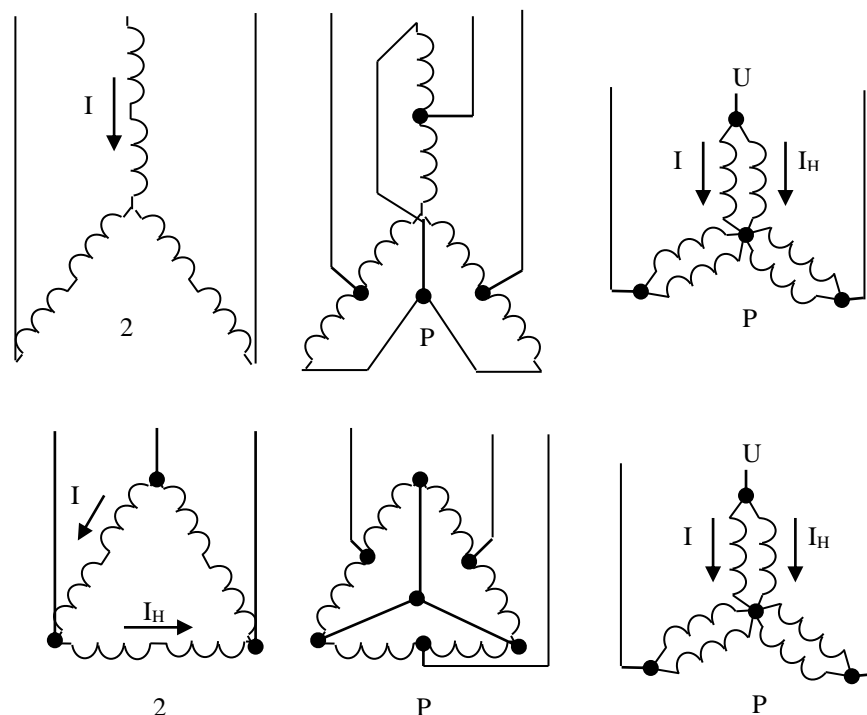
$$n = \frac{60 \cdot f}{P}$$

Оскільки  $\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{P}$ , то зміною числа пар полюсів можна ступенево регулювати частоту обертання двигуна. Виготовляють асинхронні короткозамкнені двигуни двох-, трьох-, і чотиришвидкісними.

У двошвидкісних двигунах обмотка кожної фази складається звичайно з двох однакових частин, в одній з яких напрямок струму змінюється шляхом переключення цих частин з послідовного на паралельне з'єднання.

Таке переключення приводить до зменшення числа полюсів вдвічі і, отже, до збільшення вдвічі синхронної швидкості машини.

Практично обмотка статора переключається за схемою приведеної нижче (а), де здійснений перехід від послідовної зірки до паралельної, або (б), де зроблене переключення з трикутника на подвійну зірку.



Схеми переключення обмоток статора двошвидкісного електродвигуна:  
(а) - від послідовної зірки до паралельної;

(б) - від трикутника на подвійну зірку.

Переключенням полюсів при частоті 50 Гц одержують синхронні частоти обертання 3000/1500/1000/500 або 1500/1000/750/500 об/хв ( $\text{хв}^{-1}$ ).

Регулювання швидкості обертання переключенням полюсів є не плавним, а ступеневим. Розглянутий спосіб досить економічний. Механічні характеристики володіють великою жорсткістю. Завдяки цьому двигуни з переключенням полюсів перспективні для сільськогосподарського виробництва. (ИКМ-5).

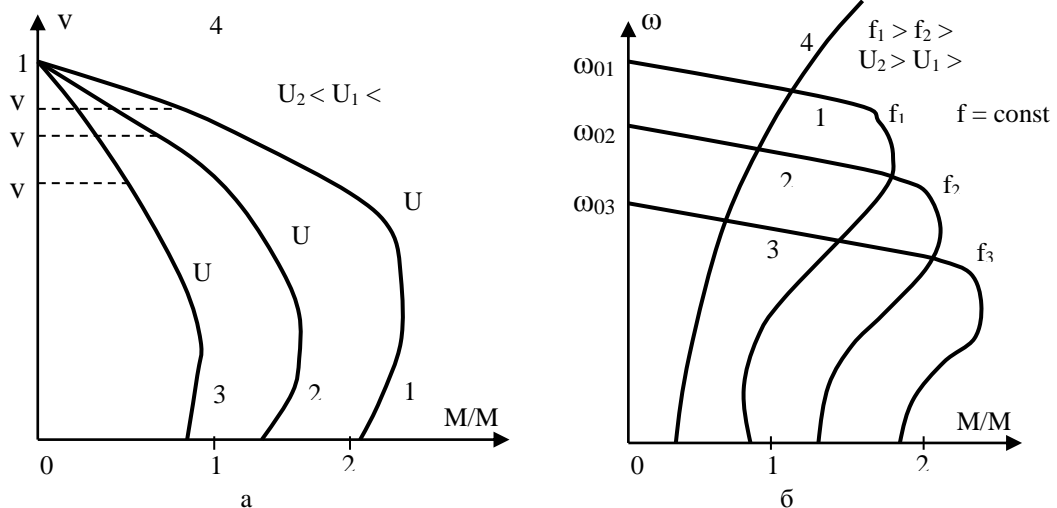


Рис. 1 Механічні характеристики асинхронного двигуна підвищеного ковзання при зміні напруги (а) і характеристики двигуна при регулюванні частоти і напруги (б): 1 - природні; 2-3 штучні; 4- механічна характеристика робочої машини.

**Кутову швидкість** магнітного поля, а з ним і швидкість ротора можна регулювати за рахунок зміни частоти струму живлення.

Для одержання регульованої частоти застосовують спеціальні генератори або перетворювачі змінної частоти, що живлять один або групу асинхронних двигунів, що знаходяться в однакових умовах роботи. Щоб забезпечити ту саму перевантажувальну здатність при регулюванні частоти необхідно прагнути до того, щоб у всіх діапазонах двигун працював з постійним магнітним потоком. Для цього треба зі зменшенням частоти пропорційно знижувати напругу, щоб не збільшувався зайво намагнічуваний струм.

Для одержання змінної частоти і напруги застосовують різні типи перетворювачів: електромашинні, електронно-іонні, напівпровідникові. Останні найбільш перспективні.

Електромашинні перетворювачі розподіляються на синхронні й асинхронні. У синхронному перетворювачі частоти швидкість синхронного генератора регулюється за допомогою двигуна постійного струму.

Від синхронного генератора подається струм змінної частоти до одного або декількох асинхронних короткозамкнених двигунів. Змінюючи плавно в широких межах частоту обертання синхронного генератора, можна регулювати також і швидкість обертання асинхронних двигунів. Якщо короткозамкнені двигуни працюють одночасно, то потужність перетворювача частоти вибирають рівній сумі потужностей усіх робочих двигунів.

Як перетворювач частоти може бути використана асинхронна машина з фазним ротором, збуджувана змінним струмом постійної частоти  $f_1$  з боку статора. Тут потрібно регулювати частоту швидкістю обертання.

Переваги: велика плавність і діапазон. Відсутність додаткових втрат в електродвигунах дозволяє застосовувати звичайні електродвигуни без завищення потужності.

## **2. Однофазні асинхронні двигуни.**

Мають короткозамкнений ротор і дві обмотки в статорі, зміщені одна щодо іншої на  $90^\circ$ . Одна обмотка робоча. При роботі електродвигуна ця обмотка постійно отримує живлення від мережі однофазного перемінного струму.

Друга обмотка пускова, вона підключається на період пуску для створення пускового моменту. Вона виконана дротом меншої площі перетину, і її активний опір більше чим у робочій обмотки.

Коли ротор розвиває достатню частоту обертання, пускову обмотку відключають. Це відбувається автоматично під дією пускового реле або спеціального пускача.

Кращі пускові властивості має електродвигун, у ланцюг пускової обмотки якого включений конденсатор. У цьому випадку струм у пусковій обмотці зрушується по фазі на кут, близький до  $90^\circ$ , чим забезпечується достатній пусковий момент.

У робочій частині механічні характеристики однофазного асинхронного електродвигуна ідентичні характеристикам трифазного асинхронного електродвигуна.

ККД однофазних електродвигунів менше, ніж трифазних, тому однофазні електродвигуни виготовляють з номінальною потужністю не більш 0,6 кВт.

На таку ж потужність виготовляють колекторні двигуни однофазного струму, які можуть працювати як від мережі перемінного струму, так і від джерела постійної напруги, тому їх називають універсальними. Власне кажучи це двигуни з послідовним збудженням, відрізняються тим, що магнітопровід їх робиться шихтованим і вони пристосовані до роботи з пульсуючим магнітним потоком.

У випадку живлення від джерела перемінної напруги в 50 Гц струм у магнітний потік одночасно змінюють напрямком, і тому момент виходить пульсуючим з частотою 100 Гц. Ці електродвигуни мають характеристики двигунів з послідовним збудженням. Їх застосовують як і асинхронні однофазні електродвигуни в електроінструментах, побутових механізмах і інших машинах невеликої потужності.

## **3. Синхронні трифазні електродвигуни.**

Відрізняються від асинхронних тим, що ротор їх являє собою електромагніт, через обмотки якого пропускають постійний струм. Такий електродвигун має властивість підтримувати строго постійну частоту обертання, рівну частоті обертання магнітного поля, створюваного трифазною обмоткою статора. Крім того синхронний електродвигун має високий коефіцієнт потужності. Регулюючи струм збудження, можна підтримувати коефіцієнт потужності який дорівнює одиниці. У синхронному електродвигуні відсутні втрати, зв'язані з ковзанням, тому ККД їх також більше, ніж в асинхронних.

Синхронний електродвигун пускають у хід як і асинхронний. Для цього в роторі крім обмотки збудження, передбачена додаткова обмотка у виді "беличей клітки".

При досягненні кутової швидкості, що складає  $(0.95...0.98)\omega_0$  електродвигун втягується в синхронізм. У момент пуску обмотка збудження замикається на резистор або збудник. Номінальний момент електродвигуна, рівний  $(0.4...0.5)M_k$ , відповідає куту  $\theta=20...25^\circ$ .

Синхронний електродвигун через складність конструкції й експлуатації застосовують тільки для приводів великих насосів зрошувальних установок. могутніх компресорів, на рем. заводах і ін., коли потужність робочої машини  $> 100$  кВт.

**ЛЕКЦІЯ №11**  
**ТЕМА 11. ВИБІР ТА ПЕРЕВІРКА ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ.**  
**ЧАСТИНА 1**

План

1. Гальмові режими електродвигунів.
2. Перехідні режими в електроприводах.

**1. Гальмові режими електродвигунів.**

Електродвигуни в електроприводі можуть швидко зупинити виробничий механізм або утримати визначену швидкість при позитивному моменті робочої машини. У цьому випадку двигун звертається в генератор і працює в одному з гальмових режимів: противовмикання, динамічному (динамо), рекуперативному в залежності від способу збудження.

1. Гальмування електропривода за допомогою перемикання обмоток Фаз електродвигуна для одержання обертаня поля в протилежному напрямку застосовують, коли необхідно швидко зупинити машинний пристрій. При цьому по інерції ротор обертається назустріч магнітному потоку, ковзання стає більше одиниці, а момент - негативним.

У двигуні постійного струму для здійснення гальмування противовмиканням змінюють підключення кінців обмоток якоря. При цьому струм якоря і момент змінюють напрямом. В обох випадках діюча напруга стає великою, тому для обмеження струму і моменту перемикання здійснюється з одночасним вмиканням резисторів у ланцюг якоря або ротора. Енергія гальмування і та що надходить з мережі - розсіюються в обмотках якоря й у резисторах.

2. **Динамічне гальмування** характеризується тим, що електрична машина працює генератором (динамо) з розсіюванням енергії гальмування в гальмових резисторах і обмотках електродвигуна.

Для динамічного гальмування якір двигуна постійного струму відключають від джерела живлення і включають на опір, а обмотка збудження залишається під напругою.

В асинхронних двигунах динамічне гальмування досягається передачею постійного струму в обмотку статора двигуна. Постійний струм створює нерухоме магнітне поле. При обертанні ротора в його обмотках наводиться Е.Р.С. і з'являється струм. Взаємодія струму ротора з нерухомим магнітним полем створює гальмовий момент.

Значення гальмового моменту залежить від струму збудження, частоти обертаня й опору ланцюга ротора (якоря).

3. У рекуперативному режимі ротор (якір) підключеного до мережі електродвигуна обертового зі швидкістю більше  $\omega_0$ - У цьому випадку струм змінює напрямом, електрична машина стає генератором, що працює паралельно з мережею, енергія гальмування за вичитом втрат віддається в електричну мережу.

Рекуперативне гальмування використовується в піднімальних кранах, для утримання швидкості при опусканні вантажів, для іспиту й обкатування під навантаженням автомобільних і тракторних двигунів редукторів і коробок зміни передач під навантаженням, а також під час переходу з більшої швидкості на меншу в багатошвидкісних електродвигунах.

**2. Перехідні режими в електроприводах.**



**Перехідним режимом електропривода** називають період роботи при переході від одного сталого стану привода до іншого, що відбувається під час пуску, гальмування, різкого прикладання навантаження. Ці режими характеризуються зміною кутової швидкості, моменту і струму. Без перехідних режимів не відбувається робота жодного електропривода.

Зовнішньою причиною, що викликає перехідний процес в електроприводі є різка зміна живильної напруги, механічного навантаження на валу, опір у ланцюгах двигуна. Реакція привода на вплив, швидкість і характер перехідного процесу залежить від механічної й експлуатаційної інерційності машинного пристрою.

Запас кінетичної енергії в механічних ланках пристрою й електричної енергії і елементах його електричних ланцюгів не може змінюватися миттєво, тому перехідні процеси вимагають визначеного часу.

Вивчення перехідних режимів необхідно для правильного вибору електродвигуна, апаратів керування і захисту, вишукування шляхів зменшення витрати енергії при пуску і гальмуванні. При розрахунку перехідних режимів визначають час пуску, будують залежності  $\omega_0=f_1(t)$ ,  $M=f_2(t)$ .

### **Рекомендована література**

1. Гончар В. Ф. Електрообладнання і автоматизація сільськогосподарських агрегатів і установок. — К.: Вища шк., 1985. — 207 с.
2. Марченко, О. В. Дацишин, Ю. М. Лавріненко та ін.; За ред. О. С. Марченка. — К.: Урожай, 1995. — 416 с.

## **ЛЕКЦІЯ №12**

### **ТЕМА 11. ВИБІР ТА ПЕРЕВІРКА ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ. ЧАСТИНА 2**

#### **План**

1. Вибір електродвигунів по частоті обертання.
2. Вибір електродвигунів по типу.
3. Вибір електродвигуна по виконанню.

#### **1. Вибір електродвигунів по частоті обертання.**

Крім потужності, електродвигуни відрізняються номінальною частотою обертання, принципом роботи і родом струму, виконанням по захисту від навколишнього середовища, способом установки.

Маса і вартість швидкохідних двигунів менше, а номінальний ККД і коефіцієнт потужності більше.

Техніко-економічні розрахунки практичний досвід показує, що в більшості випадків найбільш економічний двигун з частотою обертання  $1500 \text{ хв}^{-1}$ . Число таких двигунів у сільському господарстві перевищує 90%.

Двигуни на  $3000 \text{ хв}^{-1}$  використовуються для привода відцентрових насосів, вентиляторів великого, напору, дробарок кормів.

Двигуни на  $1000 \text{ хв}^{-1}$  використовують для поршневих компресорів, вентиляторів середнього напору великої подачі й в інших випадках, коли можливо пряме з'єднання з валом робочої машини.

Тихохідні двигуни мають технічну перевагу в порівнянні зі швидкохідними в тому випадку, коли відбуваються часті реверси і пуски. При цьому вирішальними факторами стають втрати енергії і тривалість перехідних процесів, а тихохідні двигуни, володіючи малим значенням кінетичної енергії ротора, забезпечують менші втрати енергії і тривалість перехідних процесів. По роду струму електродвигуни вибирають на підставі техніко-економічних розрахунків. Для машин

не потребує регулювання швидкості, варто застосовувати винятково приводи змінного струму, що значно дешевше постійного струму. В токарних станках (без ривків).

## **2. Вибір електродвигунів по типу.**

Можливе порівняння трьох основних типів двигунів змінного струму: асинхронного з короткозамкненим ротором, асинхронного з фазним ротором, та синхронного.

При довгочасному постійному та змінному навантаженні використовуються двигуни з короткозамкненим ротором, при навантаженні потужністю до 100 кВт, а при навантаженні >100 кВт - синхронні двигуни.

При різкозмінному навантаженні до 100 кВт використовують асинхронні двигуни з підвищеним ковзанням, при потужності більше ніж 100 кВт асинхронні двигуни з фазним ротором.

При повторно-короткочасному навантаженні та короткочасному використовуються частіше всього асинхронні двигуни з підвищеним ковзанням, асинхронні двигуни з фазним ротором.

Доводиться враховувати ряд технічних вимог. Основні вимоги: діапазон, плавність регулювання, стабільність швидкості, надійність та простота в керуванні.

В сільськогосподарському виробництві в цьому випадку застосовують асинхронні двигуни з фазним ротором, багатошвидкісні короткозамкнені двигуни, двигуни підвищеного ковзання з короткозамкненим ротором (серії 4А).

## **3. Вибір електродвигуна по виконанню.**

Для приводів призначених для роботи в різних умовах оточуючого середовища, передбачений цілий ряд спеціалізованих виконань: вологоморозостійкі, хімічностійкі, пилозахисні, тропічні, для сільського господарства та інші. Електродвигуни, як і інше електрообладнання розрізняють по кліматичному виконанню та категорії розміщення виробу. Згідно з ГОСТ 15150-69, ГОСТ 15543-70 електротехнічні вироби виготовляють в п'яти кліматичних виконаннях маркують таким чином: У-для районів з помірним кліматом, УХЛ - для районів з помірним та холодним кліматом, Т- для районів як з сухим, так і з вологим кліматом, М - для районів з помірно-холодним морським кліматом, ОМ-для районів як з помірно-холодним, так і з жарким морським кліматом.

Крім того вироби в залежності від місця встановлення виготовляють для п'яти категорій розміщення, які позначаються наступними цифрами: 1-для експлуатації на відкритому повітрі; 2- для використання під навісом та в відкритих приміщеннях; 3- для роботи в закритих приміщеннях без штучного мікроклімату; 4- для роботи в приміщеннях з штучним мікрокліматом; 5- для експлуатації в приміщеннях з підвищеною вологістю.

Для позначення ступеня захисту використовуються літери IP та слідує за ними дві цифри.

Перша цифра після IP (0...6), означає ступінь захисту персоналу від дотику з токопровідними та рухомими частинами та виробу від попадання в нього пилу, наприклад:

0 - спеціальний захист відсутній;

2 - захист від проникнення пальців всередину оболонки або предметів довжиною не більше 80 мм та від проникнення твердих тіл розміром вище 12 мм;

4 - захист від твердих тіл розміром більш 1,0 мм;

5 - захист від проникнення великої кількості пилу, достатнього для порушення роботи і т.д.

Ступінь захисту від води визначається другою цифрою (0...8), наприклад:

- 0 - захист від води відсутній;
- 3 - захист від дощу;
- 4 - захист від бризок;
- 5 - захист від водяного струменя;
- 7 - захист від занурення в воду при визначеному часі та тиску;
- 8 - вироби придатні для довгочасного занурення в воду при умовах, встановлених виробником.

Маються також відмінності по виконанню виступаючого кінця валу, способу монтажу. Всі ці відмінності шифруються в умовних позначеннях конструктивних виконань по способу монтажу, які складаються з літер Ім та 4 цифр.

Перша цифра вказує групу конструктивного виконання:

1-на лапах; 2- на лапах з фланцем; 3- без лап з фланцем. Остання цифра характеризує виконання виступаючого кінця валу, середня - спосіб монтажу.

Асинхронні двигуни серії АІ загальнопромислового застосування мають висоту осі обертання від 45 до 355мм, потужністю від 25 Вт до 315 кВт, виготовляють на U = 220/380 В; 380/660 В, частоту 50 Гц, а також на інші напруги та частоту 60 Гц. За вимогами замовника. Шкала потужностей практично така ж, як і в двигунах 4А.

По ступеню захисту передбачені два виконання: закрите обдуване ІР 54 для висот осі обертання від 45 до 132 мм, та ІР 44 для висот осі обертання від 160 до 355 мм, захищене для висот осі обертання від 200 до 355 мм.

Двигуни мають монтажні форми виконання ІМ10, ІМ20, ІМ30 згідно ГОСТ 2479-79, виготовляють їх як з чугунною станиною та щитами, так і зі станиною з алюмінієвого сплаву та чугунними або алюмінієвими щитами. Двигуни серії АІ виготовляють для тих самих кліматичних районів та категорій розміщення, що й серії 4А. Двигуни АІ відрізняються від двигунів 4А пониженим на 15-20 дБ рівнем шуму, підвищеною надійністю, покращеними пусковими властивостями, меншою на 10-15 % масою.

В серії АІ, крім загальнопромислового призначення передбачаються спеціалізовані виконання: багатшвидкісні, з підвищеним ковзанням, однофазні, з вмонтованими електромагнітними гальмами, малозумні, з вмонтованим температурним захистом, з підвищеною точністю по установочним розмірам, з фазним ротором, високоточні.

Структура умовного позначення асинхронних двигунів серії АІ їх технічні дані та значення потужностей в залежності від частоти обертання приведені в додатках 1 та 2 (стор. 460 Кудрявцева І.Ф. електрообладнання та автоматизація сільськогосподарських агрегатів та установок).

## ЛЕКЦІЯ №13

### ТЕМА 12. Енергетика електроприводу.

План

1. Втрати потужності та енергії в ЕП.
2. Коефіцієнт корисної дії електроприводу.
3. Коефіцієнт потужності ЕП.
4. Технічні засоби автоматики.

#### 1. Втрати потужності та енергії в ЕП.

Головне призначення ЕП полягає в забезпеченні руху виконавчих органів робочих машин і механізмів і керуванні цим рухом. Однак необхідно враховувати, які при цьому споживання й втрати електроенергії, як ЕП впливає на мережу та інші електроприймачі. Оцінка цих властивостей ЕП здійснюється

за допомогою так званих енергетичних показників, до яких належать коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності, втрати потужності й енергії, а іноді і споживані з мережі корисні потужність і енергія.

Енергетичні показники широко використовуються як при створенні нових, так і при оцінці роботи вже діючих ЕП. Очевидно, що кращий ЕП, забезпечуючи заданий технологічний процес робочої машини або механізму, повинен мати більш високі в порівнянні з іншими енергетичні показники. Якщо ці показники вже працюючих ЕП виявляються суттєво гірше номінальних, правочинна постановка питання про модернізацію цих ЕП. Причому капітальні витрати на модернізацію повинні зіставлятися зі скороченням експлуатаційних витрат за рахунок підвищення ККД і  $\cos\phi$ .

Підкреслимо, що забезпечення високих енергетичних показників ЕП досить актуально в цей час, коли економія енергетичних і матеріальних ресурсів перетворилася в завдання першорядної важливості.

У загальному випадку втрати потужності й енергії в ЕП складаються із втрат в електродвигуні, механічній передачі, силовому перетворювачі та системі керування, однак основними є втрати в електродвигуні, яким далі й приділяється основна увага.

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

втрати в сталі (втрати в сердечнику), які залежать від напруги й тому є постійними для електродвигуна незалежно від його навантаження;

втрати на тертя (механічні) і вентиляційні втрати. Ці втрати є постійними для заданої швидкості й не залежать від навантаження;

втрати від струму збудження або струму намагнічування АД;

втрати в міді відомі як втрати  $I^2R$ , пропорційні квадрату струму навантаження.

Втрати потужності  $\Delta P$  в електродвигуні зручно представити сумою двох складові втрат - постійних і змінних:

$$\Delta P = K + V. (1)$$

Під постійними маються на увазі втрати потужності, що не залежать від навантаження двигуна. До них ставляться втрати в сталі магнітопроводу, механічні втрати від тертя в підшипниках і вентиляційні втрати. Строго говорячи, постійні втрати в дійсності не є незмінними, а залежать від швидкості двигуна, амплітуди й частоти живильної його напруги й ряду інших факторів. Однак, оскільки ці втрати змінюються незначно, вони звичайно ухвалюються незмінними й рівними номінальним.

Під змінними маються на увазі втрати, виділювані в обмотках двигунів при протіканні по них струмів, обумовлених механічним навантаженням ЕП. Змінні втрати потужності у двигуні можуть бути в загальному випадку визначені через електричні або механічні змінні й параметри.

У двигунах постійного струму змінні втрати потужності

$$V = I^2 R, (2)$$

де  $I$ ,  $R$  - відповідно струм і опір ланцюги якоря двигуна. У трифазних асинхронних двигунах

$$V = V_1 + V_2 = 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2', (3)$$

де  $V_1$ ,  $V_2$  - втрати потужності відповідно в ланцюгах обмоток статора й ротора.

**Втрати енергії у двигуні.** За час роботи  $t$  двигуна з постійним навантаженням повні втрати енергії, обумовлені  $K$  и  $V$ ,

$$\Delta A = \Delta P t_p (4)$$

При роботі двигуна із циклічно мінливою навантаженням повні втрати енергії за весь цикл

$$\Delta A = \int_0^{t_u} \Delta P(t) dt \approx \sum_{i=1}^m \Delta P_i t_i, (5)$$

де  $\Delta P_i$ ,  $t_i$  - втрати потужності й час роботи на  $i$ -й ділянці циклу;  $m$  - число окремих ділянок циклу.

Наведені вище формули дозволяють виконати розрахунки втрат потужності й енергії по струмах і опорам ланцюгів двигунів. Ці ж втрати можуть бути розраховані й по механічних змінних і параметрах двигунів.

Змінні втрати потужності, що виділяються в якорі двигуна постійного струму й роторі асинхронного двигуна, можуть бути також визначені через механічні змінні й параметри

$$V = V_2 = M \omega_0 \delta = M \omega_0 s, (6)$$

де  $\delta = s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$  - відносна швидкість ДПТ або ковзання АД.

Змінні втрати в статорі АД:

$$V_1 = V_2 R_1 / R_2' = M \omega_0 s R_1 / R_2'. (7)$$

Повні змінні втрати в АД:

$$V = V_1 + V_2 = M \omega_0 s (1 + R_1 / R_2'). (8)$$

Формула (8) дозволяє розраховувати втрати потужності в АД по відомих моменту, швидкості ідеального холостого ходу (швидкості обертання магнітного поля), ковзанню й відношенню опорів  $R_1$ , і  $R_2'$ .

Втрати потужності в малопотужній системі керування звичайно не перевищують декількох десятків ватів і беруться до уваги тільки при виконанні точних енергетичних розрахунків.

Втрати потужності в механічній передачі визначаються головним чином тертям у частинах, що рухаються, і суттєво залежать від переданого моменту.

Втрати в механічній передачі звичайно оцінюються за допомогою ККД, значення якого для різних її видів і навантажень приводяться в довідковій літературі.

## 2. Коефіцієнт корисної дії електроприводу.

- 3. Коефіцієнт потужності ЕП.
- 4. Технічні засоби автоматики.

### ЛЕКЦІЯ №14

#### ТЕМА 13. Загальні відомості про схеми керування електроприводом.

##### План

- 1. Класифікація датчиків.
- 2. Магнітні і ємнісні датчики.
- 3. Генераторні датчики.

#### 1. Класифікація датчиків.

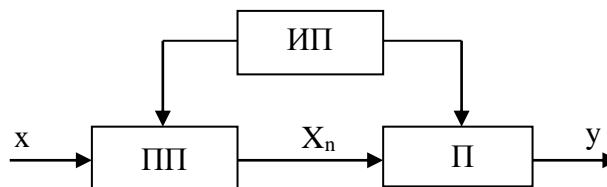
Автоматизація різних технологічних процесів можлива тільки при наявності необхідної інформації про значення величин, що характеризують хід виконання операцій.

*Інформація* в технічних системах автоматики - це кількісна міра характеристик і параметрів, режимів і технологічних процесів, що сприймаються людиною лише якісно, наприклад. Є - ні, жарко - холодно, низько - високо, сухо - волого.

У генераторних датчиків у сприймаючому органі відбувається безпосереднє перетворення контрольованого параметра  $X$  в вихідну величину  $Y$ . Ці датчики прості оскільки вони не потребують додаткового джерела живлення.



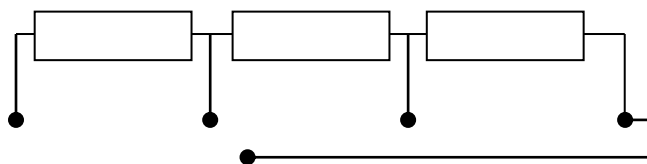
До складу параметричних датчиків крім первинного перетворювача ГШ, входять проміжний перетворювач П й допоміжне джерело живлення ИП. У цих датчиків контрольована величина  $X$  перетвориться первинним перетворювачем ПП за рахунок енергії джерела живлення ИП у проміжну величину  $X_n$ , а потім за допомогою перетворювача П доводиться до зручної форми і визначаються значення вихідного сигналу  $Y$ .



До складу параметричних датчиків крім первинного перетворювача ГШ, входять проміжний перетворювач П й допоміжне джерело живлення ИП. У цих датчиків контрольована величина  $X$  перетвориться первинним перетворювачем ПП за рахунок енергії джерела живлення ИП у проміжну величину  $X_n$ , а потім за допомогою перетворювача П доводиться до зручної форми і визначаються значення вихідного сигналу  $Y$ .

*Омічні датчики* (реостатні) використовуються в системах контролю і виміру лінійних і кутових переміщень, сил і моментів, коливань і вібрацій, прискорень і інших неелектричних величин.

До них відносять *контактні, потенціометричні, вугільні, тензометричні* та інші датчики, принцип яких заснований на зміні омичного опору спеціальних елементів під дією вимірюваної вхідної величини.



*Контактні* - замикають і розмикають контакти в наборі опорів.

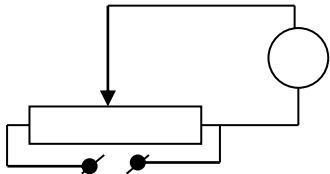
У *потенціометричних датчиках* контрольоване переміщення передається сприймаючому органу і перетвориться за рахунок зміни власного електричного опору датчика в перемінну чи постійну напругу.

*Вугільні датчики* використовують принцип зміни власного електричного опору під дією прикладених сил.

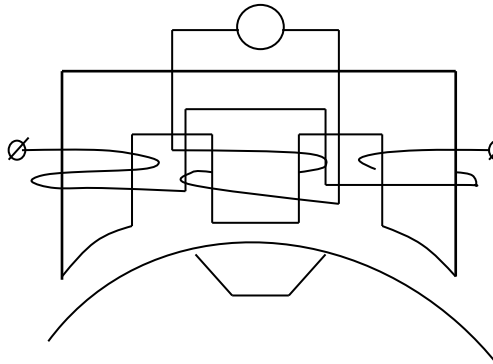
Тензометричних датчики використовують у своїй роботі залежність електричного опору матеріалу від його деформації.

## 2. Магнітні і ємнісні датчики.

Індуктивні і трансформаторні датчики використовують у своїй роботі явище зміни індуктивності котушки зі сталевим сердечником при переміщенні рухливої частини магнітної системи.



Ємнісні датчики перетворюють різноманітні вхідні впливи (механічні зусилля, лінійні і кутові переміщення) у зміну своєї електричної ємності.



Радіаційні датчики.

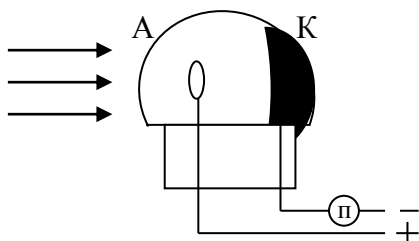
Оптичні (світлові) датчики застосовують як елемент автоматики, що реагує на появу зникнення світлового променя, на зміну освітленості чи світлового потоку на якість світлових імпульсів (включення освітлення на вулицях,

вхід у метро, проріджувач сходів).

У **фоторезистора** під дію світла збільшується кількість вільних електронів, а отже й електропровідність. Підвищення електропровідності напівпровідника під дію світлової енергії носить назву внутрішнього фотоефекта.

Вакуумний фотоелемент являє собою вакуумну чи газонаповнену лампу з катодом "К" зі світлочутливого шару, нанесеного на внутрішню поверхню скляного балона, а анод А в вигляді кільця або пластини. Існують фото діоди, фото тріоди, фото тиристри.

Радіоізотопні датчики в сільському господарстві використовуються в основному для дослідницьких цілей. З їхньою допомогою визначають швидкості і напрямки руху живильних речовин у рослинах, товщини різних матеріалів, щільності речовин, рівні рідин, тиски і температури в закритих об'єктах і багато чого іншого.



## 3. Генераторні датчики.

Термоелектричні датчики перетворюють вхідний тепловий вплив у вихідний сигнал у виді З.Р.С. Термопары призначені для дистанційного виміру і контролю температур у межах від  $-100^{\circ}$  до  $+2000^{\circ}$ С. Як матеріал використовується платина, іридій, золото і їхні сплави, а також сталь, нікель, хромель, копель, алюмель, константан.

Фотоелектричні датчики використовують у своїй роботі так називаний вентильний фотоефект, що виявляється в напівпровідниковому замикаючому шарі, між дотичним напівпровідником і металом. При опроміненні пластини, що складається з напівпрозорого шару металу, і нанесеного на нього світлочутливого

напівпровідника, у проміжному шарі створюється різниця потенціалів, що залежить від світлової енергії. Вентильні *фотоелементи* і *фототріоди* у фотогенераторному режимі використовують як перетворювачі *світлової* енергії в *електричну*.

*П'єзоелектричний датчик* являє собою набір пластинок з матеріалу, що володіє так називаним п'єзо ефектом (із кварцу). У момент прикладання механічної сили на поверхні пластин з'являються електричні заряди. Сумарний заряд пропорційний діючій силі, а його знак показує напрямок сили (стиск чи розтягання). Напруженість зарядів електричного поля вимірюють спеціальними чутливими електронними пристроями.

*Індукційні датчики*, принцип дії яких заснований на використанні закону *електромагнітної індукції*, можна розділити на дві групи.

У *датчиках першої групи* контрольовані лінійні чи кутові переміщення передаються котушці, що рухається відносно постійного магніту. При цьому в котушці наводиться Е.Д.С.

У *датчиків другої групи* котушка і її електромагнітна система залишаються нерухомими, а змінюється під впливом контрольованого параметра магнітний потік  $\Phi$ , зчеплений з котушкою Е.Д.С.

$$e = k \cdot B \cdot W_v$$

У датчиків цієї групи пропорційна і зворотна за знаком швидкості магнітного потоку.

## Лекція 15

### Тема 14. Принцип побудови замкнених систем електропривода.

#### План

1. Принципи побудови замкнутих систем регульованого електроприводу
2. Системи підлеглого регулювання

#### 1. Принципи побудови замкнутих систем регульованого електроприводу

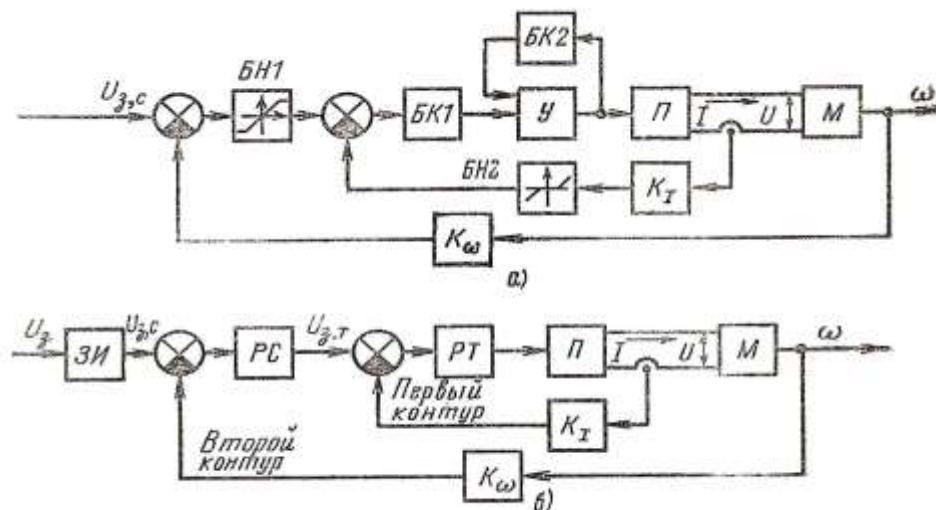


Рис. 1. Структурні схеми замкнутих систем регулювання

а - із загальним сумуючим підсилювачем; б - з  $n$  послідовними сумуючими підсилювачами - система підпорядкованого регулювання з послідовною корекцією



Найбільше застосування до недавнього часу отримували два типи побудови замкнених систем регулювання: 1) з одним загальним суммируючим підсилювачем (рис. 1, а), 2) з  $n$  послідовними суммируючими підсилювачами (рис. 1, б) - так звані системи підлеглого регулювання з послідовною корекцією. Розглянемо їх.

Відмінною особливістю систем, побудованих за типом структурної схеми, наведеної на рис. 1а, є наявність одного підсумовує підсилювача  $У$ , на вхід (входи) якого подається алгебраїчна сума сигналу задає і всіх зворотних зв'язків жорстких і гнучких (підсумовування може бути як електричне, так і магнітне). Вихідний сигнал підсилювача; таким чином, залежить відразу від декількох змінних, що робить практично неможливим регулювання якоїсь однієї змінної, незалежно від інших.

Додання системі необхідних динамічних властивостей при такій побудові системи зазвичай досягається застосуванням складних коригувальних пристроїв, що включаються в ланцюг сигналу керування при малій потужності управління (блок  $БК1$  на рис. 1, а - послідовна корекція) або паралельно деяким блокам системи (паралельна корекція - гнучка негативний зворотний зв'язок, блок  $БК2$  - на рис. 1, а). При цьому не можна здійснити незалежне налаштування якості регулювання (наприклад: статична помилка, динамічна помилка, час регулювання, перерегулювання, ступінь загасання та ін.) всіх змінних. В цілому отримати необхідне високе або оптимальне якості регулювання в таких системах вкрай важко, а в ряді випадків і неможливо.

Однак незважаючи на зазначені недоліки, системи, побудовані за типом структурної схеми, наведеної на рис. 1, а, ще іноді знаходять місце для застосування або через простоту реалізації, або у випадках, коли не пред'являються жорсткі вимоги до якості перехідних процесів і не потрібно роздільне регулювання змінних, або коли відносно простими засобами вдається досягти необхідної якості процесів.

## 2. Системи підлеглого регулювання

Системи підлеглого регулювання з послідовною корекцією, в яких використовується  $n$  послідовних підсумовуючих підсилювачів (рис.1, б), відрізняються тим, що, на ці підсилювачі покладаються функції не тільки підсумовування і посилення сигналів, але й виконання деяких інших математичних операцій над сигналами, тому суммируючі підсилювачі в цих системах називають регуляторами.

Система підпорядкованого регулювання (див. Рис. 1, б) складається з ряду контурів, число яких дорівнює числу регульованих змінних (або числу великих постійних часу системи, що підлягають компенсації), причому кожен внутрішній контур регулювання підпорядкований наступного по порядку зовнішньому (по відношенню до внутрішнього) контуру. Ця підпорядкованість виражається в тому, що задане значення регульованої змінної будь-якого внутрішнього контуру визначається вихідним сигналом регулятора наступного по порядку контура. У результаті всі внутрішні контури працюють як підлегли завданню регулювання вихідний координати системи. Кожен контур **будується** за принципом **регулювання по відхиленню** (помилково) і має свою зазвичай жорстку негативну зворотний зв'язок по регульованої змінної і свій **регулятор** (підсумовує підсилювач). Для кожного зовнішнього контуру внутрішній контур (або декілька внутрішніх контурів) входить до складу об'єкта регулювання. Іншими словами принцип підлеглого регулювання полягає в тому, що кожен для кожного з регульованих параметрів: струму, швидкості і, якщо потрібно, положення, організовується свій

контур регулювання, що містить об'єкт регулювання, регулятор і негативний зворотний зв'язок за регульованим параметру. У системах електроприводу внутрішнім контуром є контур струму.

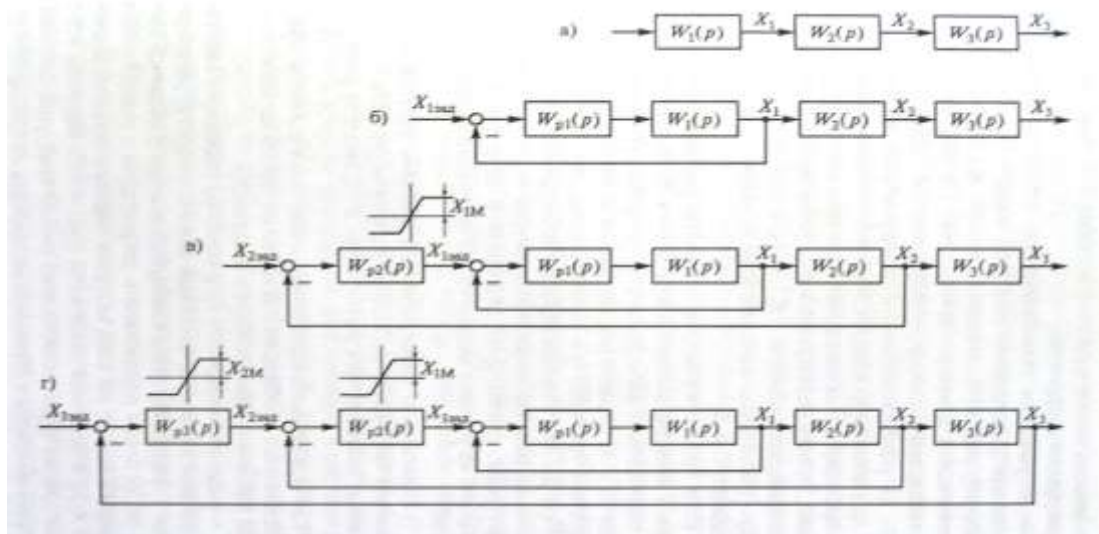


Рис. 2. Структурна схема послідовного регулювання

Задачу синтезу схеми з послідовним включенням регуляторів (схема підлеглого регулювання) розглянемо на прикладі, коли:

- Об'єкт регулювання (рис. 2, а) являє собою послідовне з'єднання ланок з передавальними функціями  $W_1(p)$ ,  $W_2(p)$ ,  $W_3(p)$ . Через  $X_1$  і  $X_2$  проміжні координати, через  $X_3 = X_{\text{вих}}$  - вихідна регульована координата;

за умовами технологічного процесу необхідно забезпечити підтримання вихідної координати  $X_{\text{вих}}$  рівний заданому значенню вхідного сигналу  $X_{\text{вх}}$  з мінімальної статичної та динамічної помилкою (тобто необхідно мінімізувати помилку регулювання  $\Delta X = X_{\text{вх}} - X_{\text{вих}}$ );

з умов міцності (електричної, механічної або ін.) елементів слід забезпечити обмеження деяких проміжних координат заданих максимальним значенням, тобто необхідно мати як в перехідних, так і в сталих режимах  $|X_1| \leq X_{1M}$  і  $|X_2| \leq X_{2M}$ . Тут  $X_{1M}$  і  $X_{2M}$  - допустимі максимальні значення проміжних координат  $X_1$  і  $X_2$ .

Якщо провести аналогію з електроприводом постійного струму і в якості вихідної координати  $X_3$  розглянути кутове положення а вала двигуна, то проміжними координатами  $X_1$  і  $X_2$  об'єкта регулювання можна поставити у відповідність струм якоря  $I_{\text{я}}$  і швидкість обертання  $n$  вала двигуна. При роботі електроприводу необхідно забезпечити обмеження максимальних значень струму якоря з умов його комутації колектором двигуна і швидкості обертання двигуна з умови механічної міцності обертових частин.

Поставлену задачу синтезу системи регулювання розуміємо як завдання вибору її структури (тобто переліку зворотних зв'язків і типу регуляторів) і параметрів регуляторів.

Як можна виконати схему управління з урахуванням сформульованих вимог? В якості одного з можливих шляхів вирішення завдання виберемо наступний:

виділивши координату  $X_1$  в якості проміжної регульованої величини, виконаємо замкнутий контур регулювання 1. Налаштування цього замкнутого контуру зі зворотним зв'язком по  $X_1$  будемо здійснювати регулятором з передавальною функцією  $w_{p1}(p)$ ,

на вхід якого подамо сигнали задає  $X_{1зад}$  і зворотного зв'язку по  $X_1$  (рис. 2, б). Зауважимо, що з точки зору функціонування будь-якої замкнутої системи, внутрішній контур 1 прагне підтримати  $X_1 = X_{1зад}$ ;

коли контур регулювання 1 налаштований, виконаємо настройку (іноді говорять оптимізацію) контуру регулювання 2 з зворотного негативного зв'язком по  $X_2$  (рис. 2, в). При цьому в якості об'єкта регулювання *величини*  $X_2$  приймемо послідовно включені налаштований замкнутий контур регулювання *величини*  $X_1$  і ланка з передавальною функцією  $W_2(p)$ . Налаштування контура регулювання 2 проводиться дією тільки на регулятор  $W_{P2}(p)$ , *параметри* регулятора  $W_{P1}(p)$  залишаються на даному етапі вже незмінними. Звернемо увагу на те, що вихідна величина регулятора  $W_{P2}(p)$  може розглядатися як задаючий сигнал для замкнутого контуру регулювання 1;

аналогічно двом попереднім контурам регулювання 1 і 2 виконаємо налаштування контура регулювання 3, тобто, охопивши негативним зворотним зв'язком по  $X_3$  послідовно з'єднані налаштований замкнутий контур регулювання 2 і ланка об'єкта регулювання з передавальною функцією  $W_3(p)$  і віднісши їх до незмінної частини контуру 3, налаштуємо цей контур за допомогою тільки регулятора  $W_{P3}(p)$ ;

обмежимо координату  $X_1$  допустимим значенням  $X_{1M}$ , для чого створимо обмеження максимального значення задає величини  $X_{1зад}$ , ввівши на рівні  $X_{1M}$  зону насичення в статичній характеристиці регулятора  $W_{P2}(p)$  (рис. 2, в). Якщо контур регулювання 1 налаштований у відповідності до загальноприйнятих критеріїв якості (наприклад, по максимуму швидкодії і мінімуму коливальності), то досягається підтримання  $X_1 = X_{1зад}$ , тим самим гарантується виконання умови  $X_1 \leq X_{1M}$ .

Якісна настройка контуру регулювання 1, зокрема, його високу швидкодію, дозволяє надійно придушити вплив збурень, що діють в системі електроприводу, на точність підтримки  $X_1$ . Крім того, висока швидкодія контуру регулювання 1 набагато полегшить умови налаштування і забезпечить якість роботи подальших контурів регулювання *величин*  $X_2$  і  $X_3$ ;

- Обмежимо величину  $X_2$  введенням зони насичення в статичній характеристиці регулятора  $W_{P3}(p)$  на рівні  $X_{2M}$  (рис. 2, г).

При роботі електропривода в режимі малих відхилень від положення рівноваги всі регулятори знаходяться в ненасиченому стані. Система регулювання працює як багатоконтурна система підтримки вихідної величини  $X_3$ . Внутрішні контури виступають при цьому як додаткові, підлеглі основного зовнішньому контуру (звідси й назва схеми регулювання).

У перехідних режимах, викликаних, наприклад, різкою зміною вхідного сигналу  $X_{вх} = X_{Ззад}$ , регулятори  $W_{P2}(p)$  і  $W_{P3}(p)$  можуть насичуватися за рахунок великого неузгодженості сигналів на їх вході. Це викликає заміну звичайного режиму підтримки вихідної координати, рівної заданому вхідному сигналу  $X_{вх} = X_{Ззад}$ , на режим підтримки відповідної проміжної координати на допустимому рівні. За рахунок насичення статичних характеристик регуляторів відбувається поділ режимів підтримки різних регульованих величин.

Цінною перевагою схеми підпорядкованого регулювання є її універсальність. Вона здатна задовольнити різноманітному поєднанню вимог з боку технологічного процесу. Як показує досвід налагодження таких схем, вони в порівнянні з іншими відомими схемами найменш чутливі до зміни параметрів силового обладнання в електроприводі.

Схема характеризується високою якістю процесів регулювання при зміні сигналу завдання. Це виходить за рахунок того, що можливості послідовної корекції

в замкнутій системі регулювання вдало доповнюються можливостями місцевих зворотних зв'язків по проміжним змінним (у нашому випадку - по  $X_1$  і  $X_2$ ), які виконують роль додаткових коригувальних ланок.

Схема підпорядкованого регулювання відрізняється відносно простотою розрахунку і наладки. Тут процес налагодження складної многоконтурної системи регулювання вдається представити у вигляді декількох послідовних етапів, на кожному з яких припадає налаштовувати систему регулювання лише з однією зворотним зв'язком.

Нарешті, у цій схемі досить простим способом вдається забезпечити обмеження на допустимому рівні значень проміжних координат: достатньо, як ми бачили, лише виставити рівень обмеження на статичній характеристиці відповідного регулятора.

Однак не слід переоцінювати можливості підлеглого регулювання та забувати тієї обставини, що в цій системі одночасно можуть працювати контури з суперечливими умовами настройки. Це викликає деяке зниження якості процесів, наприклад, при додатку збурень. Далі, за наявності в системі регулювання послідовно включених двох і більш істотно нелінійних ланок, якими є регулятори із зоною обмеження в їх статичній характеристиці, можливі практично непереборні автоколивання низької частоти і великої амплітуди, якщо систему піддати "великому" впливу. "Велике" - це такий вплив, яке здатне вивести хоча б один із регуляторів на насичений ділянку його статичної характеристики. При цьому в "малому", коли всі регулятори працюють на лінійних ділянках своїх статичних характеристик, система регулювання залишається стійкою і навіть з великим запасом. У силу сказаного системи підпорядкованого регулювання виконуються з числом контурів не більше двох, рідше - трьох. У випадках, коли потрібно більше число контурів регулювання, застосовують інші структури, наприклад, з модальним керуванням.

В даний час схема підлеглого регулювання набула найбільшого поширення, як у вітчизняних, так і зарубіжних електроприводах.

В системі підпорядкованого регулювання з'являється можливість роздільного регулювання змінних і роздільної настройки контурів (починаючи з першого, самого внутрішнього контуру) і корекції перехідних процесів в кожному контурі, що істотно спрощує як розрахункову роботу, так і технічну реалізацію корекції і практичну (в наладці) налаштування системи.

Налаштування контура (розрахунок і вибір елементів послідовних коригувальних ланцюгів, т. Е. Вибір типу регулятора і розрахунок його параметрів) зазвичай виробляють так, щоб отримати технічно оптимальний перехідний процес (настройка на технічний оптимум). Технічно оптимальним перехідним процесом вважається такий процес, при якому час  $t_1$  зміни регульованої величини від 0 до сталого значення було б мінімально можливим при перерегулюванням  $\Delta X_{\text{вих}}$ , що не перевищує допустимого значення, приблизно 4 ... 10% (рис. 3). Такий перехідний процес при стрибку завдання є компромісним між процесом більш швидким, але з великим перерегулюванням, і процесом з меншим перерегулюванням, але більш повільним.

З теорії автоматичного регулювання відомо, що характер перехідного процесу замкнутої системи визначається співвідношенням постійних часу системи, і оптимальному перехідному процесу відповідає оптимальне співвідношення постійних часу. Математично це виражається певним (оптимальним) співвідношенням коефіцієнтів характеристичного рівняння системи.

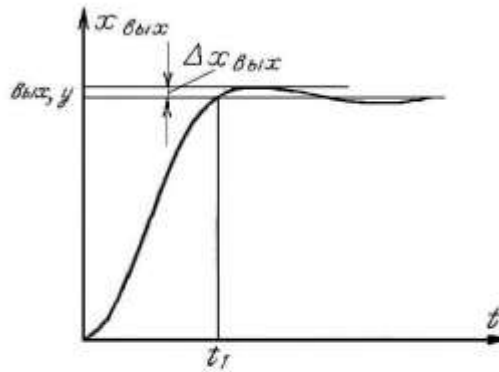


Рис. 3. Технічно оптимальний перехідний процес.

Для системи, що складається з  $n$  підлеглих контурів, що містять тільки безінерційні, інерційні та інтегруючі ланки (це обмеження не стосується регуляторів), характеристичні рівняння залежно від порядку системи (числа контурів) повинні мати співвідношення коефіцієнтів, зазначені в табл. 1. При таких характеристичних рівняннях перехідні процеси в системі по керуючому впливу будуть технічно оптимальними.

У рівняннях табл. 1 прийнято:  $T_1$  - Найменша постійна часу першого (самого внутрішнього) контуру системи. Зазначені в табл. 1 значення часу регулювання  $t_1$  (рис. 3) і перерегулювання  $\sigma, \%$ , відносяться до випадку стрибкоподібної зміни вхідного (задає) сигналу. Особливість рівнянь, наведених у табл. 1, полягає в тому, що всі вони (для будь-якого ПОРЯДКУ повного рівняння) характеризуються коефіцієнтом загасання, рівним  $= 0,707$ , що забезпечує необхідний технічно оптимальний характер перехідного процесу.

Таблиця 1

Порядок рівняння	Повний характеристичне рівняння	Вироджені характеристичне рівняння	Час регулювання	Перерегулювання $\sigma, \%$
2	$2 \cdot T_1 \cdot p \cdot (T_1 \cdot p + 1) + 1$	$2 \cdot T_1 \cdot p \cdot (T_1 \cdot p + 1) + 1$	$4,7 \cdot T_1$	4,33
3	$4 \cdot T_1 \cdot p \cdot [2 \cdot T_1 \cdot p \cdot (2 \cdot T_1 \cdot p + 1) + 1] + 1$	$4 \cdot T_1 \cdot p \cdot (2 \cdot T_1 \cdot p + 1) + 1$	$7,6 \cdot T_1$	8
4	$8 \cdot T_1 \cdot p \cdot \{4 \cdot T_1 \cdot p \cdot [2 \cdot T_1 \cdot p \cdot (T_1 \cdot p + 1) + 1] + 1\} + 1$	$8 \cdot T_1 \cdot p \cdot (4 \cdot T_1 \cdot p + 1) + 1$	$14,4 \cdot T_1$	6,2

Задана вихідна система зазвичай не володіє оптимальним співвідношенням постійних часу, тому, використовуючи корекцію, потрібно змінювати постійні часу системи, тобто для настройки контуру на технічний оптимум потрібно підібрати такий тип регулятора і з такими параметрами, щоб отримати характеристичні рівняння системи, наведені в табл. 1.

Додаток: розглянемо, як проводиться розрахунок настройки регулятора на прикладі контуру регулювання струму якоря двигуна постійного струму незалежного

збудження в системі тиристорний керований випрямляч - двигун, скориставшись апаратом передавальних функцій. Розрахунок цього контуру проводиться для випадку нерухомого (загальмованого) якоря або при вимкненому порушенні двигуна. Тоді структурна схема цього контуру має вигляд, показаний на рис. 4, де наведені передавальні функції перетворювача (керованого тиристорного випрямляча) і якорного ланцюга двигуна.

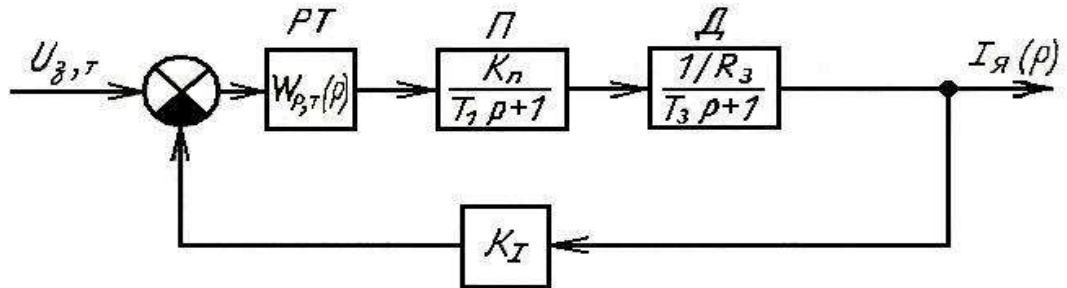


Рис. 4. Структурна схема контуру регулювання струму.

У контурі струму є дві інерційності, що характеризуються постійними часу:  $T_e = L_e / R_e$  - Електромагнітна постійна часу якорного ланцюга;  $T_1$  - , - Постійна часу, що відбиває інерційність системи фазового управління випрямлячем, запізнювання (дискретність) випрямляча і інерційності датчика струму і регулятора. Ця постійна часу називається некомпенсованою або малої постійної часу контуру, так як зазвичай  $T_1 = 0,004 \dots 0,01 \text{ с} < T_e$ , при цьому  $T_e$  називають великою постійною часу, яку потрібно компенсувати.

У відповідності зі структурною схемою контуру струму (рис. 4) передавальна функція перетворювача і якорного ланцюга двигуна дорівнює:

$$W_1(p) = \frac{k_n / R_э}{(T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_э \cdot p + 1)}, \quad (4)$$

де  $k_n$  - Коефіцієнт підсилення перетворювача (керованого випрямляча).

Використовуємо **PI - регулятор** з передавальної функцією

$$W_{p,т}(p) = (T_0 + 1) / T_{01} \cdot p$$

Тоді передатна функція розімкнутого контуру струму

$$W_{p,к}(p) = W_1(p) \cdot W_{p,т}(p) = \frac{k_n (T_0 \cdot p + 1) / R_э}{(T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_э \cdot p + 1) \cdot T_{01} \cdot p}. \quad (5)$$

З метою компенсації великою постійною часу контуру прийемо  $T_0 = T_e$  (необхідну форсировку для цієї компенсації буде створювати регулятор, впливаючи на перетворювач). Тоді

$$W_{p,к}(p) = \frac{k_n / R_э}{(T_1 \cdot p + 1) \cdot T_{01} \cdot p}, \quad (6)$$

і передавальна функція замкнутого контуру

$$W_{з,к}(\rho) = \frac{W_p(\rho)}{1 + W_p(\rho) \cdot k_I} = \frac{1/k_I}{\frac{T_1 \cdot T_{01} \cdot R_{\Sigma}}{k_I \cdot k_{II}} \cdot \rho^2 + \frac{T_{01} \cdot R_{\Sigma}}{k_I \cdot k_{II}} \cdot \rho + 1}, \quad (7)$$

т. е. замкнутий контур являє собою систему другого порядку.

Для того щоб отримати в цій системі оптимальний перехідний процес, потрібно, щоб коефіцієнт загасання дорівнював  $\sigma = 0,707$ . Це умова буде виконана, якщо коефіцієнт при  $\rho$  в характеристичній рівнянні системи [знаменник (7) прирівняний нулю] буде дорівнює:

$$\frac{T_{01} \cdot T_{\Sigma}}{k_I \cdot k_{II}} = 2 \cdot T_1, \quad (8)$$

звідки

$$T_{01} = 2 \cdot T_1 \cdot k_I \cdot k_{II} / R_{\Sigma}. \quad (8a)$$

Відповідно з позначеннями на рис. 2, б і формулою (3) параметри  $PI$  - регулятора струму визначаються при прийнятих значеннях  $T_0$  і  $T_{01}$  з рівностей

$$T_{01} = R_1 \cdot C = 2 \cdot T_1 \cdot k_I \cdot k_{II} / R_{\Sigma}; \quad (9)$$

$$T_0 = R_{0,c} \cdot C = T_{\Sigma}. \quad (10)$$

Передавальна функція регулятора струму прийме вигляд:

$$W_{p,r}(\rho) = \frac{(T_{\Sigma} \cdot \rho + 1) \cdot R_{\Sigma}}{2 \cdot T_1 \cdot k_I \cdot k_{II} \cdot \rho} \quad (11)$$

При такому регуляторі струму передавальна функція замкнутого контуру

$$W_{з,к}(\rho) = \frac{1/k_I}{2 \cdot T_1^2 \cdot \rho^2 + 2 \cdot T_1 \cdot \rho + 1} = \frac{1/k_I}{2 \cdot T_1 \cdot \rho \cdot (T_1 \cdot \rho + 1) + 1}. \quad (12)$$

Як видно з цієї передавальної функції, вийшло характеристичне рівняння контуру з оптимальним співвідношенням коефіцієнтів (див. Табл. 1), що й потрібно. Значить, перехідний процес в контурі струму при вибраній настройці регулятора буде оптимальним при стрибку  $U_{з,т}$  ( $\sigma = 4,39\%$ ,  $t_1 = 4,7 \cdot T_1$ ). В результаті проведених операцій вийшла заміна двох інерційних ланок (одне з великою постійною часу) коливальним ланкою (з коефіцієнтом загасання  $0,707$ ), близьким до інерційною ланці з постійною часу  $2T_1$ , т. е. істотно підвищилася швидкість контуру при хорошій якості перехідного процесу. Слід зазначити, що коефіцієнт при  $T_1$  в характеристичних рівняннях табл. 1 не обов'язково брати рівним  $2$ . Замість  $2$  можна брати число більше чи менше. У першому випадку процес буде протікати більш повільно і з меншим перерегулюванням або без нього, у другому - більш швидко, але з великим перерегулюванням.

Отриману викладеним способом налаштування контура струму зберігають і при обертовому якорі, коли виявляється вплив ЕРС обертання. При  $T_m > 2 T_e$  і  $T_m \gg T_1$  (де  $T_m$  - електромеханічна постійна часу приводу) цей вплив на перехідний процес в контурі струму при зміні завдання струму виявляється несуттєвим.

Аналогічним чином, як і у випадку контуру струму, розраховується настройка (параметри регулятора) контуру регулювання швидкості. У цьому контурі використовується або  $P$  - регулятор, або  $PI$  - регулятор швидкості.  $P$  - регулятор застосовується при малому діапазоні регулювання кутової швидкості.

Недолік систем підпорядкованого регулювання - це зменшення швидкодії системи приблизно в  $2^t$  раз у міру зростання числа послідовних контурів;  $t$  - номер контуру. Тому використовується число послідовних контурів не більше трьох-чотирьох.

Системи, побудовані за принципом підлеглого регулювання, знайшли широке застосування не тільки у всіх видах систем регулювання кутової швидкості та положення приводів постійного струму (у тому числі в системах регулювання кутової швидкості ослабленням потоку), але і у всіх системах приводів змінного струму.

Сприяють широкому поширенню систем підпорядкованого регулювання не тільки їх гідності, відмічені вище, але й наявність уніфікованих блочних систем регулювання (на інтегральних елементах), що містять необхідний для технічної реалізації систем підпорядкованого регулювання набір готових підсилувачів, датчиків, джерел живлення, функціональних блоків, задатчиків інтенсивності та т. п.

Однак, постійно зростаючі вимоги до точності та швидкодії приводу і більш широкі й універсальні для виконання цих вимог можливості, надані сучасною цифровою обчислювальною технікою і її елементної базою в порівнянні з аналоговою, призвели до розробок і все більшому впровадженню систем електроприводу з цифровим управлінням, зокрема з мікропроцесорним, в яких всі вимірювання, передача інформації, її обробка і вироблення оптимальних керуючих впливів на систему приводу і її координати виробляються в цифровому вигляді.



## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

### Базова

3. Бородин И. Ф., Недилько Н. М. Автоматизация технологических процессов. — М.: Агропромиздат, 1986. — 368 с.
4. Гончар В. Ф. Електрообладнання і автоматизація сільськогосподарських агрегатів і установок. — К.: Вища шк., 1985. — 207 с.
5. Е.Л.Жулай, Б.В.Зайцев «Электропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній» К.: Вища освіта, 2001 – 288с.
6. Электропривод / О. С. Марченко, Ю. М. Лавріненко, П. І. Савченко, Є. Л. Жулай; За ред. О. С. Марченка. — К.: Урожай, 1995. — Ч. 1. — 208 о.
7. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — М.: Госзаергоиздат, 1975. — 568 с.
8. Калинушкин М. П. Вентиляторные установки. — М.: Высш. шк., 1979. — 223 с.
9. Ключев В. И., Терехов В. М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов. — М.: Энергия, 1980. — 360 с.
10. Лобаев Б. Н. Расчет воздухопроводов. — К.: Госстройиздат УССР, 1959. — 196 с.
11. Механізація виробництва продукції тваринництва / І. І. Ревенко, Г. М. Кукта, В. М. Манько та ін.; За ред. І. І. Ревенка. — К.: Урожай, 1994. — 264 с.

### Допоміжна

12. Механізація та автоматизація у тваринництві і птахівництві / О. С. Марченко, О. В. Дацишин, Ю. М. Лавріненко та ін.; За ред. О. С. Марченка. — К.: Урожай, 1995. — 416 с.
14. Некрасов С. С. Обработка металлов резанием. — М.: Агропромиздат, 1988. — 365 с.
15. Новиков Ю. Ф., Гопка В. В. Злектромобильные машины для животноводства. — М.: Агропромиздат, 1988. — 190 с.
16. ОСТ 70.2.3-79. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы оценок электроприводов сельскохозяйственных агрегатов. — М., 1980. — 38 с.
17. Фоменков А. П. Электропривод сельскохозяйственных машин, агрегатов поточных линий. — М.: Колос, 1984. — 280 с.
18. Центробежные вентиляторы / Под ред. Т. С. Соломаховой. — М.: Машиностроение, 1975. — 414 с.

Рясна Ольга Василівна  
Чепіжний Андрій Володимирович

# **Основи електроприводу**

## **конспект лекцій**

Суми, РВВ, Сумський національний аграрний університет, вул. Г.-Кондратьєва 160

Підписано до друку: \_\_\_\_ 2022 р. Формат А5: Гарнітура Times New Roman Сур  
Тираж: 25 примірників Замовлення № \_\_\_\_ Ум. друк. арк. 4,3