



**Міністерство освіти і науки України**

**ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет енергетики, робототехніки та комп'ютерних технологій**

**Кафедра електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки**

**Конспект лекцій**

**з дисципліни**

**«ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ»**

**Для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форми навчання, спеціальностей:**

**141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

**Харків  
2025**

Міністерство освіти і науки України  
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет енергетики, робототехніки та комп'ютерних технологій  
Кафедра електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та  
електротехніки

Конспект лекцій  
з дисципліни  
**«ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ»**

**Для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та  
заочної форми навчання, спеціальностей:  
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Затверджено рішенням Науково-методичної ради  
Факультету ФЕРКТ  
Протокол № 4  
від 26.02.2025 р.

Харків  
2025

УДК 62-83(042.4)

О-75

Схвалено  
на засіданні кафедри  
електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки  
Протокол № 6  
Від 11.02.2025

Конспект лекцій з дисципліни “Основи електроприводу” для здобувачів першого (бакалаврського) РВО, денної та заочної форми навчання спец. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. / Держ. біотехнол. у-т; упоряд.: М.Л. Лисиченко, Ю.М. Хандола, М.С. Сорокін, О.В. Сотнік, В.В. Гузенко, Д.М. Міленін - Харків: [б. в.], 2025. - 121 с.

Конспект лекцій з дисципліни “Основи електроприводу” складені у відповідності до навчального плану. Видання включає рекомендації призначені для отримання практичних навичок в вирішенні теоретичних питань з дисципліни.

**Рецензенти:**

**О.О. Мірошник**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту Державного біотехнологічного університету;  
**М.Ю. Середин**, консультант з обслуговування та ремонту електронного обладнання бурового верстату, бурового управління “УКРБУРГАЗ”.

**Відповідальний за випуск** : В.В. Гузенко, канд. техн. наук, доцент.

© М.Л. Лисиченко, Ю.М. Хандола, М.С. Сорокін, О.В. Сотнік, В.В. Гузенко,  
Д.М. Міленін, упорядкування, 2025  
© ДБТУ, 2025

## ЛЕКЦІЯ 1

### РОЗДІЛ 1

#### ВСТУП. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ. ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТТЯ "ЕЛЕКТРОПРИВОД". ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА.

План лекції:

1. Визначення поняття "електропривод". елементи електропривода
2. Стан та основні напрями розвитку електропривода
3. Мета і завдання вивчення дисципліни "електропривод"
4. Класифікація електроприводів
5. Типи систем електроприводу
6. Класифікація механічних характеристик електродвигунів за ступенем жорсткості

#### 1. Визначення поняття "електропривод". елементи електропривода

У сільському господарстві для виробництва продукції використовують робочі машини (РМ), виконавчий орган (ВО) яких може приводитися в рух різноманітними приводами. Привод – це система пристроїв, призначених для перетворення енергії будь-якого виду на механічну, для приведення в рух ВОРМ і керування цим рухом.

Залежно від виду первинної енергії розрізняють ручний, паровий, гідравлічний, вітряний, тепловий, пневматичний та електричний приводи.

Електропривод (ЕП) є основним приводом у сільському господарстві. Порівняно з іншими видами приводів ЕП має такі переваги: високий коефіцієнт корисної дії (ККД), надійність, високий рівень автоматизації, екологічна чистота, компактність тощо.

У сільськогосподарському виробництві здебільшого застосовують ЕП з асинхронним двигуном (АД) з короткозамкненим ротором (КЗР).

**Електропривод (ЕП)** — це електромеханічна система, яка здійснює кероване перетворення електричної енергії (ЕЕ) на механічну (МЕ) і в загальному вигляді складається з таких елементів: електричного перетворювального (ЕПП), електромеханічного перетворювального (ЕМП) або електродвигунного (ЕД), механічного передавального (МПП) та керуючого (КП) пристроїв - і призначена приводити в рух виконавчий орган робочої машини (ВОРМ) та керувати цим рухом.

Основою будь-якого ЕП є один або декілька ЕД постійного або змінного струму, призначених для перетворення ЕЕ на МЕ. Вони отримують живлення від джерела ЕЕ (ДЕЕ) через перетворювальний пристрій (ЕПП) ЕЕ.

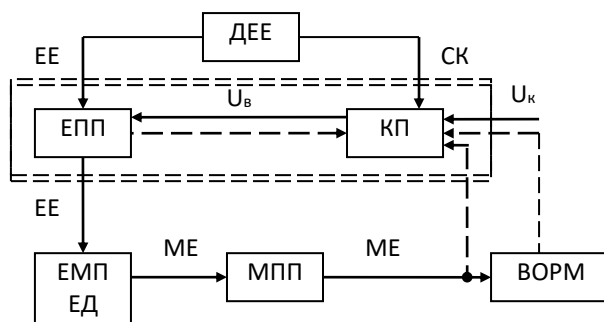


Рис.В.1 - Структурна схема автоматизованого електропривода

У якості ЕПП, які перетворюють і регулюють параметри ЕЕ (струм, напругу, частоту), в ЕП використовують автономні генератори з регулюванням в широких межах напруги на їх затискачах, керовані тиристорні випрямлячі, автотрансформатори, перетворювачі частоти та ін.

Механічний передавальний пристрій МПП передає МЕ від ЕД до ВОРМ і навпаки. Крім того, за допомогою механічного передавального пристрою відбувається перетворення МЕ: обертальний рух перетворюється на поступальний або зворотно – поступальний, збільшується або зменшується швидкість руху тощо. Механічними передавальними пристроями є ланцюгові, пасові, зубчасті – рейкові та інші передачі, редуктори, муфти, шатунно – кривошипні механізми та ін. У

сучасних сільськогосподарських ЕП найбільш поширені клинопасові, зубчасті та ланцюгові передачі, а також різноманітні за своєю конструкцією з'єднувальні муфти.

Керування процесом перетворення ЕЕ виконується КП, де в нерегульованих ЕП застосовуються апарати керування та захисту, які здійснюють функції “ввімкнено – вимкнено”, захист ЕД від струмів короткого замикання, перевантаження, нульовий захист.

ЕП має два канали: **силовий, або енергетичний, та інформаційний**. По першому каналу транспортується перетворююча ЕЕ, по другому здійснюється керування потоком енергії.

**Силовий, або енергетичний канал** складається з двох частин – електричної та механічної. Послідовно з'єднані елементи, які безпосередньо беруть участь у процесі перетворення ЕЕ на МЕ (і навпаки, в разі електричного гальмування), це звичайно три типи перетворювачів енергії: **електричні, електромеханічні і механічні, що разом складають собою силовий канал ЕП**.

**Інформаційний канал** виробляє керуючий сигнал  $U_k$  у функції вхідного сигналу  $U_v$  і різних додаткових електричних сигналів, що містять інформацію про процес перетворення енергії, реальні параметри механічного руху ЕД і ВОРМ та ін. До складу інформаційного каналу можуть входити мікропроцесори, ЕОМ з широкими і різноманітними можливостями керування складним рухом ВО. Наприклад, сучасного маніпулятора або робота

## 2. Стан та основні напрями розвитку електропривода

Розширення галузей використання ЕП, зростання їх сумарної та одинарної потужності гостро ставить питання про необхідність застосування регульованого ЕП для поліпшення техніко-економічних показників найбільш економічних технологічних режимів роботи промислових і сільськогосподарських об'єктів.

У сільському господарстві в масових нерегульованих приводах найчастіше використовують високонадійні асинхронні двигуни (АД) змінного струму з короткозамкненим ротором. Через недоліки проектування й експлуатації ЕП коефіцієнт завантаження багатьох АД не перевищує 50%, що призводить до зниження їх встановленої потужності. Недавній прогрес у напівпровідниковій індустрії, особливо в силовій електроніці і мікроконтролерах, зробив приводи з регулюванням частоти обертання більш практичними і значно дешевшими.

Сьогодні для керування процесом використання енергії згідно з технологічними потребами конкретної РМ створюють системи керування, до складу яких належать силові перетворювачі ЕЕ з мікропроцесорною системою керування для розширення виконавчих функцій, включаючи керування режимами, енергозбереженням, діагностику пошкодження тощо. Проводиться розробка і дослідження цифрових, мікропроцесорних електромеханічних систем керування з ЕП різних видів, ставиться задача поліпшення підготовки інженерних і наукових кадрів для обслуговування автоматизованого електроприводу.

На даному етапі розвитку сільського господарства в Україні особливого значення набувають питання розробки та широкого впровадження методів і способів керування енергоефективністю (енергозбереженням) засобами ЕП, адже гостро постала проблема економії електроенергії і з'явилася реальна можливість її ефективного використання головним споживачем.

## 3. Мета і завдання вивчення дисципліни “електропривод”

Мета вивчення – формування у майбутніх бакалаврів та магістрів (електриків) необхідних теоретичних і практичних знань з основ електроприводу, вміння творчо вирішувати завдання проектування та експлуатації електроприводів сільськогосподарських машин та агрегатів, а також проводити дослідження, випробування та оцінку електроприводів в умовах експлуатації. Після вивчення дисципліни студент повинен:

- знати основні положення теорії електропривода і вміти користуватися цими знаннями при визначенні розрахункових параметрів усіх елементів електропривода;
- вміти досліджувати, проектувати, налагоджувати та експлуатувати електродвигуни, перетворювальні й передавальні пристрої, системи і апарати керування та захисту електродвигунів, складати та аналізувати схеми керування; виконувати випробування, давати оцінку роботи електроприводів;
- створювати необхідну теоретичну базу знань для вивчення інших спеціальних дисциплін.

## 4. Класифікація електроприводів

Сучасні електроприводи класифікують за такими основними ознаками:

1. *За видом руху ЕД і можливістю зміни його напрямку* розрізняють ЕП **обертального і поступального руху**. При цьому швидкість ВО може бути регульованою або нерегульованою, а сам рух – неперервним або дискретним, реверсивним або неревверсивним.

2. *За кількістю РМ або ВО однієї РМ, які приводяться в рух одним ЕП,- групові та індивідуальні* ЕП. Груповим називають ЕП, який забезпечує рух ВО кількох РМ чи кількох ВО однієї РМ, а індивідуальним – ЕП, що забезпечує рух одного ВО РМ.

3. *За наявністю зв'язків з іншими ЕП – незалежні*, режимами роботи яких практично не залежать від режимів роботи інших ЕП, і **взаємозв'язані**, в яких два або кілька ЕП електрично і механічно зв'язані між собою. При роботі взаємозв'язаних ЕП підтримується задане співвідношення їх швидкостей, навантажень або положення ВО РМ. Розрізняють два види взаємозв'язаних ЕД: багатодвигунні, в яких електродвигунні пристрої працюють разом на загальний вал, і електричні вали, в яких забезпечується синхронне обертання двох і більше ЕД, вали яких не мають механічного зв'язку.

4. *За причиною зміни параметрів – регульовані ЕП*, параметри яких змінюються під впливом керуючого пристрою, і **нерегульовані ЕП**, параметри яких змінюються в результаті збурюючих впливів (зміна навантаження, напруги, частоти, опору окремих кіл).

5. *За рівнем автоматизації керування – неавтоматизовані, автоматизовані та автоматичні*.

Неавтоматизованим називають ЕП, усі операції керування яким виконуються з участю людини. В автоматизованому ЕП людина бере участь у створенні початкової керуючої дії, а керування автоматичним ЕП здійснюється без участі людини.

Автоматизовані ЕП поділяються на програмно керовані, якими керують відповідно до заданої програми, і слідкуючі, що переміщують ВО РМ відповідно до заданого сигналу.

6. *За видом перетворювального пристрою – вентильні, автотрансформаторні, за системою генератор – електродвигун та ін*.

Вентильні ЕП, у свою чергу, поділяються на системи: випрямляч – двигун і перетворювач частоти - двигун. Перетворювальними пристроями цих ЕП відповідно є вентильнонапівпровідникові перетворювачі ЕЕ або регульовані випрямлячі та інвертори і регульовані перетворювачі частоти.

7. *За родом МПП* розрізняють **редукторний ЕП і безредукторний**, привод з варіатором, з пасовою передачею, з фрікційною муфтою.

8. *За родом струму* – ЕП **постійного струму**, в яких електродвигунними пристроями є **двигуни постійного струму** (незалежного, послідовного та змішаного збудження), і ЕП **змінного струму**, де електродвигунними пристроями є асинхронні ЕД, їх називають асинхронними приводами, а в яких електродвигунними пристроями є синхронні двигуни, - синхронними.

## 5. Типи систем електроприводу

Система електроприводу (СЕП) розглядається як електромеханічна система, що складається з ЕД і РМ.

У залежності від виду приводного двигуна, перетворювальних пристроїв визначається і назва типу системи.

В ДСТУ 3886-99 рекомендуються такі типи СЕП: асинхронний двигун із короткозамкненим ротором загального призначення (АД); асинхронний двигун із підвищеним ковзанням (АС); асинхронний двигун з підвищеним пусковим моментом (з глибоким пазом ротора, з підвійною роторною кліткою) (АП); синхронний електродвигун (СД); лінійний асинхронний двигун (ЛАД); асинхронний (синхронний) двигун – турбомуфта (ТМ) (електромагнітна муфта ковзання (ЕМК)); асинхронний двигун з індукційним реостатом у колі фазного ротора (АФ- ІР); багатошвидкісний асинхронний двигун (АМ); джерело струму (індуктивно – ємнісний перетворювач)- асинхронний двигун (ІСР – АФ); асинхронний двигун з регульованим ступенево активним опором резистора в колі фазного ротора (АФ – РА); асинхронний двигун із ступенево регульованим індуктивним опором резистора в колі фазного ротора (АФ- РІ); індукційний регулятор напруги - асинхронний двигун (ІРН – А); тиристорний регулятор напруги - асинхронний двигун (ТРН-А); тиристорний (транзисторний) перетворювач частоти з ланкою постійного струму – асинхронний (синхронний) двигун (ТПЧ – А (СД)); тиристорний перетворювач частоти з безпосереднім зв'язком -

асинхронний двигун (БПЧ- А); двигун постійного струму з резисторним регулюванням швидкості (ступеневим чи плавним) (Д-Р); генератор – двигун постійного струму (Г-Д); тиристорний перетворювач - двигун постійного струму (ТП – Д) та інші.

Найважливішими характеристиками СЕП (ЕД і РМ) є їх механічні характеристики, тобто залежності  $\omega = f(M)$  і  $M_c = f(\omega)$ .

## 6. Класифікація механічних характеристик електродвигунів за ступенем жорсткості

Механічні характеристики можуть бути природними (власними) і штучними. Природною МХ ЕД називають залежність швидкості обертання ЕД від створюваного ним моменту при номінальних параметрах мережі живлення ( номінальних значеннях напруги і частоти), номінальному магнітному потоці і при відсутності додаткових опорів у колі якоря (ротора, статора).

Якщо природна МХ не задовольняє тих або інших вимог виробничого механізму, використовують **штучні МХ**. Вони також являють собою залежність кутової швидкості від його моменту, але **при неномінальних параметрах**.

Крім МХ, у теорії ЕП є поняття **електромеханічної характеристики (ЕМХ)** ЕД, якою називають **залежність його кутової швидкості від струму якоря (ротора)  $\omega(I)$** .

**Електродвигуни можуть працювати в двигунному режимі**, приводячи в рух РМ, **та в гальмівному**. Майже всі ЕД характеризуються тим, що у двигунному режимі роботи при збільшенні обертального моменту кутова швидкість зменшується, а в гальмівному – при збільшенні швидкості гальмівний момент зростає.

Величина зміни швидкості при зміні моменту різних ЕД неоднакова і характеризується **коефіцієнтом жорсткості механічної характеристики  $\beta$** :

$$\beta = \frac{dM}{d\omega} \quad (B.1)$$

Для прямолінійних МХ диференціали  $dM$  і  $d\omega$  можна відповідно замінити скінченними приростами  $\Delta M$  і  $\Delta\omega$ , тоді:

$$\beta = \frac{M_1 - M_2}{\omega_1 - \omega_2} = \frac{\Delta M}{\Delta\omega} \quad (B.2)$$

**Абсолютно жорсткою** ( рис.В.2, пряма 4)  $\beta = \infty$  називають МХ, при якій зі зміною обертального моменту ЕД швидкість його не змінюється. Таку характеристику мають синхронні ЕД.

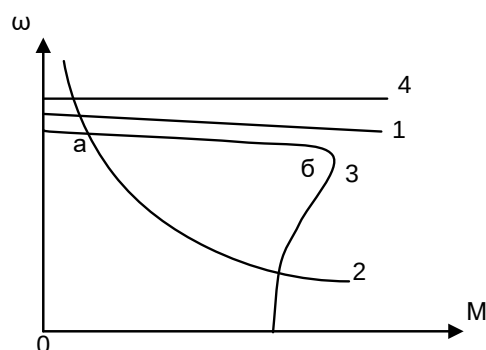


Рис. В.2. Механічні характеристики електродвигунів

**Жорстка** (рис.В.2, пряма1) – МХ, коли зі зміною обертального моменту в широких межах кутова швидкість ЕД змінюється дуже мало. Таку МХ мають двигуни постійного струму

незалежного ( паралельного ) збудження (ДПС НЗ) та АД, що працюють при ковзаннях менших від критичного (рис. В.2, крива 3, ділянка аб).

**М'якою** (рис.В.2. крива 2) називають МХ, де невелика зміна обертового моменту викликає значну зміну швидкості ЕД. Таку МХ мають двигуни постійного струму послідовного збудження (ДПС ПЗ).

**Абсолютно м'якою** називають МХ, коли момент ЕД при зміні швидкості залишається сталим  $\beta = 0$ ). Таку МХ мають ДПС НЗ при живленні їх від джерела струму або при роботі в замкнених системах ЕП в режимі стабілізації струму якоря.

Жорсткі і м'які МХ мають від'ємний коефіцієнт жорсткості, тобто  $\beta < 0$ . На неробочій частині МХ АД ( рис.В.2, крива 3) при ковзаннях, більших від критичного, коефіцієнт  $\beta > 0$ .

#### Питання для самоконтролю:

1. Що називають приводом?
2. Залежно від виду первинної енергії які розрізняють приводи?
3. Який привод є основним приводом у сільському господарстві?
4. Що називають електроприводом і з яких елементів (пристроїв) він складається? Яке їх призначення?
5. Які два канали має ЕП? Яке їх призначення?
6. Які сучасні тенденції використання ЕП у сільському господарстві?
7. Яка мета і завдання вивчення дисципліни "Електропривод"?
8. За якими основними ознаками класифікують сучасні електроприводи?
9. Які є основні системи ЕП?
10. Як класифікують механічні характеристики електро-двигунів за ступенем жорсткості? Чому дорівнює коефіцієнт жорсткості?
11. Які характеристики називають абсолютно жорсткими і які абсолютно м'якими?
12. За якими умовами можна створити високопродуктивну, надійну та економічно вигідну СЕП?
13. Що розуміють під приводними характеристиками (ПХ) РМ?
14. Яку залежність називають механічною характеристикою робочої машини, якою емпіричною формулою її описують і як прийнято графічно зображати?

## ЛЕКЦІЯ 2

#### План лекції:

1. Механічні характеристики виконавчих органів робочих машин, їх класифікація
2. Розрахункові схеми механічної частини електропривода
3. Статичні та динамічні моменти і сили, що діють в електроприводі, зведення їх до вала двигуна
4. Зведення до вала двигуна моменту інерції та мас, що рухаються поступально
5. Рівняння руху електропривода та його аналіз

#### 1. Механічні характеристики виконавчих органів робочих машин, їх класифікація

Високопродуктивну, надійну та економічно вигідну СЕП можна створити тільки при найкращому узгодженні властивостей і можливостей ЕД, апаратури керування і приводних характеристик РМ.

Під приводними характеристиками РМ розуміють комплекс характеристик, що відображають усі особливості виробничого процесу та умови роботи машини. До них відносять технологічні, кінематичні, енергетичні, механічні, навантажувальні, інерційні характеристики. До робочих машин належать вентилятори, насоси, всякого роду транспортери, конвеєри, підйомні крани, механізми, які виробляють, переробляють і зберігають різну сільськогосподарську продукцію.

Механічною характеристикою (МХ) виконавчого органу РМ називають залежність між моментом опору (моментом статичних опорів) механізму і швидкістю  $M_c = f(\omega)$ .



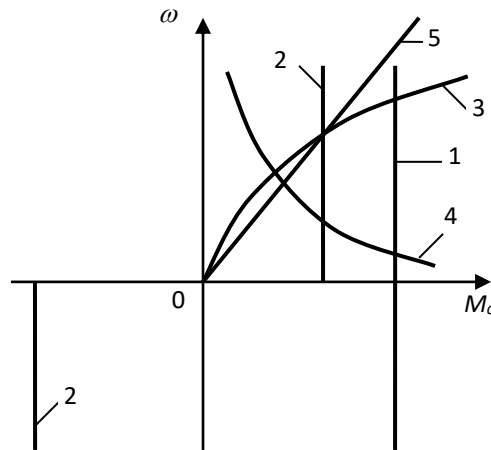


Рис.В.3. Механічні характеристики виконавчих органів робочих машин.

Механічні характеристики РМ описують емпіричною формулою:

$$M_c = \frac{1}{i \cdot \eta_n} \cdot \left[ M_o + (K_z \cdot M_{c,ном} - M_o) \left( \frac{\omega_c}{\omega_{c,н}} \right)^x \right] \quad (В.3)$$

де  $M_c$  – зведений до валу двигуна момент опору при швидкості  $\omega_c$ , Н·м;  $M_o$  – момент опору тертя в рухомих частинах, який не залежить від швидкості, Н·м;  $M_{c,ном}$  – момент опору при номінальній швидкості  $\omega_{c,ном}$ , Н·м;  $x$  – показник ступеня, що характеризує зміну статичного моменту при зміні швидкості;  $K_z$  – коефіцієнт завантаження;  $i, \eta$  – відповідно передаточне число і ккд. редуктора.

Прийнято будувати МХ ЕД і РМ як функції  $\omega = f(M)$ . При побудові МХ РМ необхідно за формулою (В.3) визначити зведений до швидкості вала ЕД момент опору РМ і для зручності подальших розрахунків будувати її у першому квадранті (рис.В.3).

Незважаючи на різноманітність РМ, відповідно до (В.7) їх МХ орієнтовно можна поділити на чотири групи:

**1. Незалежна від швидкості МХ.** При цьому  $x = 0$  і момент опору  $M_c$  не залежить від швидкості. (прямі 1 і 2, рис.В.3). Прямі 1- МХ підйомних кранів, лебідок, поршневих насосів тощо, що мають активні моменти, які можуть бути зумовлені дією маси, силами гравітації, пружної деформації та ін. Залежність 2 стосується РМ, де реактивний статичний момент зумовлений головним чином силами тертя (стрічкові конвеєри, механізми переміщення підйомних кранів, механізми подачі металорізальних верстатів тощо).

**2. Прямолінійно – зростаюча МХ** (пряма 5, рис.В.3). У цьому випадку  $x = 1$  і момент опору  $M_c$  лінійно залежить від швидкості (для спрощення прийнято  $M_o = 0$ ). Таку МХ має, наприклад, генератор постійного струму з незалежним збудженням, який працює з незмінним зовнішнім навантаженням.

**3. Нелінійно – зростаюча (параболічна) МХ** (крива 3, рис.В.3). У цьому випадку  $x = 2$  і момент опору  $M_c$  залежить від квадрату швидкості. Параболічні МХ мають РМ, що працюють за відцентровим принципом: вентилятори, відцентрові насоси тощо

**4. Нелінійно – спадаюча МХ** (крива 4, рис.В.3). У цьому випадку  $x = -1$  і момент опору  $M_c$  обернено пропорційний швидкості, а потужність, споживана РМ, залишиться сталою. Нелінійно – спадаючі МХ мають деякі токарні, розточувальні та фрезерні верстати то

## 2. Розрахункові схеми механічної частини електропривода

Механічна частина системи ЕП «електродвигун - робоча машина» складається з ротора (якоря) ЕД, механічного передавального пристрою (редуктора) і виконавчого органу РМ, зв'язаних між собою, як показано на кінематичній схемі (рис.1.1). На базі кінематичної схеми складають розрахункову схему механічної частини ЕП.

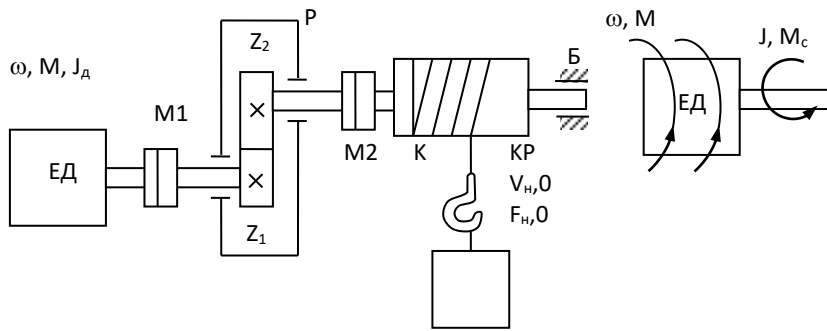


Рис1.1. Кінематична схема механічної частини електропривода

Механічна частина значної кількості систем ЕП ЕД– РМ має складну кінематичну схему з багатьма ланками, які рухаються з різними швидкостями. Рух окремих ланок може бути обертовим, поступальним або складним. Кожний елемент кінематичної схеми має певну пружність, а в з'єднаннях елементів наявні зазори. При теоретичному аналізі такої системи потрібно скласти рівняння руху кожного елемента з урахуванням впливу одного елемента на інший, а потім розв'язати ці рівняння разом. Розрахунок системи таким методом дуже складний.

У більшості практичних випадків в інженерних розрахунках, де не потрібна велика точність, розрахунки ведуть з допущеннями, що механічна система складається з абсолютно жорстких елементів, які не деформуються і між якими немає зазорів. При такому допущенні за рухом одного елемента можна одержати інформацію про рух решти елементів системи. Найчастіше таким елементом вважають вал ЕД з його кутовою швидкістю. При цьому реальну систему замінюють найпростішою одномасовою без зазорів еквівалентною в енергетичному відношенні системою з обертальним рухом. Розрахункова схема системи зводиться до узагальненої жорсткої механічної ланки, яка має еквівалентну масу з моментом інерції  $J$ , на яку діє електромагнітний момент двигуна  $M$  і сумарний зведений до вала ЕД момент статичних опорів  $M_c$ , до якого входять усі механічні втрати в системі, у тім числі механічні втрати в ЕД.

### 3. Статичні та динамічні моменти і сили, що діють в електроприводі, зведення їх до вала двигуна

Моменти і сили, що розвиваються двигунним пристроєм (обертовим або лінійним ЕД) можуть бути рушійними або гальмівними. Рушійними вони бувають у двигунному режимі роботи, коли ЕД приводить в рух ВОРМ, а гальмівними – у гальмівних режимах роботи, коли ВОРМ є джерелом МЕ.

ВОРМ реалізує підведену до нього МЕ в корисну роботу, будучи таким чином споживачем МЕ. Іноді він може бути і джерелом МЕ, віддаючи, наприклад, на вал двигуна енергію, запасену обертовими частинами, піднятим угору вантажем тощо. Робота, яку виконує двигун або ВОРМ, визначається з рівнянь:

а) при обертovому русі:

$$W_{\omega} = \int_0^t M \omega dt ; \quad (1.1)$$

б) при поступальному русі:

$$W_v = \int_0^t F \cdot v \cdot dt , \quad (1.2)$$

де  $M$  – обертовий момент,  $H \cdot m$ ;

$\omega$  – кутова швидкість,  $\frac{rad}{c}$  ;

$F$  – сила,  $H$ ;

$v$  – лінійна швидкість,  $\frac{m}{c}$  ;

$t$  – час,  $c$ .

Механічна потужність визначається як похідна роботи за часом і при обертовому русі становить:

$$P = \frac{dW_{\omega}}{dt} = M\omega; \quad (1.3)$$

При поступальному русі:

$$P = \frac{dW_v}{dt} = Fv \quad (1.4)$$

Моменти і сили статичних опорів, що створюються ВОРМ, поділяють на реактивні та активні (потенціальні). Реактивними називають сили і моменти статичних опорів, які виникають внаслідок руху як протидія механічної ланки на рух. До них належать сили і моменти, зумовлені тертям, опором матеріалу при обробці різанням, опором потоку повітря у вентиляторах. Напрямок дії цих моментів завжди протилежний напрямку обертання і при зміні напрямку руху змінює свій знак (рис.1.2). Елементи механічної системи або рідини у насосах, які створюють реактивні сили і моменти, можуть бути тільки споживачами енергії.

Активні сили і моменти статичних опорів створюються сторонніми джерелами МЕ і виникають у механічній системі незалежно від її руху. До них належать сили і моменти, зумовлені тяжінням, стисканням, розтягуванням і скручуванням пружних тіл, силою вітру чи потоку падаючої води.

Напрямок дії активних сил і моментів не залежить від напрямку руху, і при зміні останнього вони зберігають свій знак.

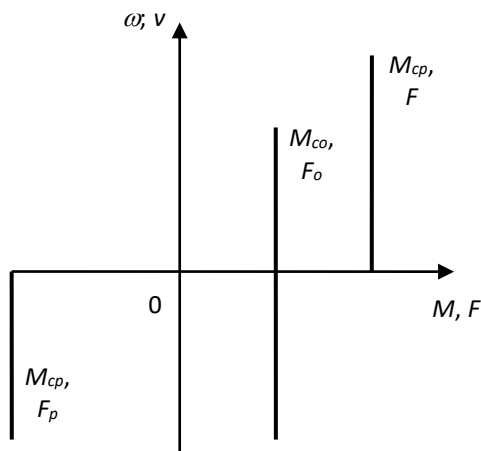


Рис.1.2. Залежність статичних активних і реактивних сил та моментів від напрямку обертання

Таким чином, при одному напрямі руху вони можуть діяти в тому самому напрямі, а при зміні напрямку руху вони можуть діяти в напрямі, протилежному напрямку руху (рис.1.2). Джерело активної сили або моменту може споживати або віддавати МЕ. Так вантаж, переміщуваний підйомником, при підніманні споживає МЕ від ЕД, а при опусканні віддає її ЕД, внаслідок чого останній працює в гальмівному режимі.

В основу зведення моментів статичних опорів до вала ЕД покладена рівність потужності системи до і після зведення. На основі енергетичного балансу системи “ЕП-РМ” за рівноваги потужностей одержимо:

$$\frac{M_{c.m} \cdot \omega_m}{\eta_n} = M_c \omega, \quad (1.5)$$

звідки

$$M_c = M_{c.m} \frac{\omega_m}{\omega \cdot \eta_{II}}, \quad (1.6)$$

де  $M_{c.m}$  – момент опору виконавчого органу РМ, Н м ;  
 $M_c$  – той же момент опору, зведений до швидкості вала ЕД, Н м;  
 $i = \omega/\omega_m$  - передаточне відношення.

За наявності декількох передач між двигуном і виконавчим органом робочої машини (рис.1.1) з передаточними числами  $i_1, i_2, \dots, i_n$  і відповідними ККД  $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n, \eta_{noc}$  момент опору, зведений до швидкості вала ЕД, визначається за формулою:

$$M_c = M_{c.m} \frac{1}{\eta_1 \eta_2 \dots \eta_n i_1 i_2 \dots i_n} \quad (1.7)$$

Зведення сил опору виконується аналогічно зведенню моментів. Якщо швидкість поступового руху  $v$ , (м/с), а кутова швидкість вала ЕД  $\omega$ , (рад/с), то

$$M_c \omega = \frac{v F_{c.m}}{\eta_n} \quad (1.8)$$

де  $F_{c.m}$  – сила опору виконавчого органу РМ, Н.

Таким чином, зведений до швидкості вала ЕД момент опору дорівнює:

$$M_c = \frac{F_{c.m} v}{\omega \cdot \eta_n} \quad (1.9)$$

При зведенні обертального руху до поступального зведене зусилля буде:

$$F_{c.m} = \frac{M_c \omega \cdot \eta_n}{v} \quad (1.10)$$

#### 4. Зведення до вала двигуна моменту інерції та мас, що рухаються поступально

Зведення до вала ЕД моментів інерції та мас, що рухаються поступально, виконують на основі рівності запасів кінетичної енергії системи до і після зведення:

$$j \frac{\omega_D^2}{2} = j_D \frac{\omega_D^2}{2} + j_1 \frac{\omega_1^2}{2} + \dots + j_n \frac{\omega_n^2}{2} + \frac{mv^2}{2}, \quad (1.11)$$

де  $j$  – зведений до вала ЕД момент інерції системи, (кг·м<sup>2</sup>);  $j_D$  - момент інерції ротора (якоря) ЕД і частин, що обертаються на його валу, (кг·м<sup>2</sup>);  $j_1, j_2, \dots, j_n$  - моменти інерції елементів, що обертаються з валами 1,2,...,n, (кг·м<sup>2</sup>);  $m$  – маса елементів, кг, що рухаються поступально з лінійною швидкістю  $v$ , (м/с).

Розділивши рівняння (1.11) на  $\frac{\omega_D^2}{2}$  і замінивши відношення кутових швидкостей на відповідні передаточні числа, одержимо:

$$j = j_D + j_1 \frac{1}{i_1^2} + j_2 \frac{1}{i_1^2 \cdot i_2^2} + j_n \frac{1}{i_1^2 \cdot i_2^2 \dots i_n^2} + m \frac{v^2}{\omega_D^2}, \quad (1.12).$$

## 5. Рівняння руху електропривода та його аналіз

При роботі системи „ЕП-РМ” стан її рухомих частин обумовлений співвідношеннями між рушійними і гальмівними силами та моментами статичних опорів. Під їх дією система може рухатися рівномірно або нерівномірно. Рівно-мірний рух, або усталений режим роботи, спостерігається при рівності рушійних і гальмівних сил та моментів. В іншому випадку виникають інерційні сили та моменти, які спричиняють прискорення або сповільнення системи. При цьому порушується усталена швидкість ЕП, яка супроводжується зміною кінетичної енергії, накопичуваної в системі.

Диференційне рівняння процесу нерівномірного поступального руху окремого елемента або системи, в цілому має вигляд:

$$F_d - F_c = F_{\text{дин}} = m \frac{dv}{dt}, \quad (1.13)$$

де  $F_d$  – рушійна сила, Н;  $F_c$  – сила статичних опорів у системі, Н;  $F_{\text{дин}}$  – динамічне зусилля, яке виникає в системі при зміні швидкості її руху, Н;  $m$  – маса рухомих частин, кг;  $v$  – лінійна швидкість елементів, які рухаються поступально, м/с;  $\frac{dv}{dt}$  – лінійне прискорення, м/с<sup>2</sup>.

При обертovому русі аналогічно розглядається рівновага моментів:

$$M - M_c = M_{\text{дин}} = j \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.14)$$

де  $M$  – рушійний момент двигуна, Н·м;  $M_c$  – момент статичних опорів, Н·м;  $M_{\text{дин}}$  – динамічний момент, який виникає в системі при зміні швидкості обертання, Н·м;  $j$  – зведений до вала ЕД момент інерції системи, кг·м<sup>2</sup>;  $\omega$  – кутова швидкість обертання, рад/с;

$\frac{d\omega}{dt}$  – кутове прискорення рад/с<sup>2</sup>.

Слід враховувати, що рівняння (1.13) і (1.14) належать до двигунного режиму, коли сила  $F_d$  і момент  $M$  ЕД є рушійними, а сила  $F_c$  і момент  $M_c$  статичних опорів – гальмівними, спрямованими проти дії ЕД. При такому припущенні напрямок динамічного зусилля і динамічного моменту завжди збігаються з напрямком прискорення ЕП.

Крім того, в цих рівняннях прийнято масу  $m$  рухомих частин при поступальному русі і момент інерції  $j$  обертovих частин постійними, що справедливо для великої кількості виробничих механізмів.

З аналізу рівнянь (1.13) і (1.14) видно, що:

1) при  $F_d > F_c$  та  $M > M_c$  прискорення  $\frac{dv}{dt}$  і  $\frac{d\omega}{dt}$  мають додатний знак, тобто система працює з прискоренням;

2) при  $F_d < F_c$  та  $M_d < M_c$   $\frac{dv}{dt} < 0$ ,  $\frac{d\omega}{dt} < 0$  і рух системи уповільнюється;

3) при  $F_d = F_c$  та  $M_d = M_c$ ,  $\frac{dv}{dt} = 0$  і  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ , тобто привод працює в усталеному режимі.

Як відомо, ЕД можуть працювати у двигунному і гальмівному режимах, тобто знак моменту двигуна може бути додатковим і від’ємним ( $\pm M_d$ ). Активні моменти статичних опорів також можуть змінювати свій знак, тому рівняння (1.14) матиме такий вигляд:

$$\pm M \mp M_c = M_{\text{дин}} = \pm j \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.15)$$

Аналіз рівняння (1.15) показує, що механічна система або її окремих елемент буде прискорюватися, коли різниця моментів двигуна  $M$  і статичних опорів  $M_c$  додатна, і уповільнюватися, коли ця різниця стане від'ємною.

Розглянемо це на прикладі роботи багатошвидкісного асинхронного двигуна з виробничим механізмом, момент статичних опорів  $M_c$  якого не залежить від швидкості (рис.1.4). Припустимо, що система працює в усталеному режимі зі швидкістю  $\omega_2$  (точка А на характеристиці 2). Якщо обмотку статора перемкнути на нижчу швидкість, то двигун перейде в режим рекуперативного гальмування, різниця  $M - M_c$  стане від'ємною і рух системи уповільниться до усталеної швидкості  $\omega_1$  (точка Б на характеристиці 1).

При перемиканні на вищу швидкість момент двигуна буде більшим за момент статичних опорів і рух системи прискориться до усталеної швидкості  $\omega_3$  (точка В на характеристиці 3).

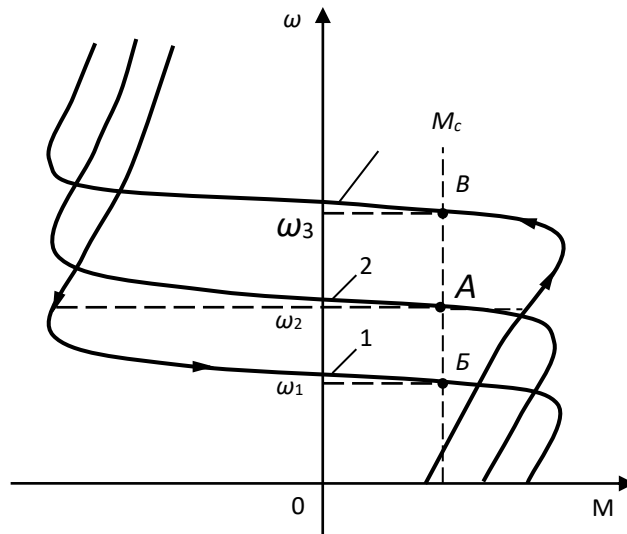


Рис.1.4. Зміна співвідношень між  $M$  і  $M_c$  у багатошвидкісному електродвигуні при перемиканні з середньої швидкості на нижчу і вищу.

Якщо момент інерції механізму не постійний і є функцією кута повороту  $j = f(\varphi)$ , наприклад, у кривошипно – шатунному механізмі, то рівняння руху ЕП має складний вигляд:

$$M_d - M_c = j \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dj}{d\varphi}. \quad (1.16)$$

Якщо момент інерції є постійною величиною, то  $\frac{dj}{d\varphi} = 0$ , і рівняння (1.16) набуває вигляду (1.11).

#### Питання для самоконтролю:

1. З яких елементів складається механічна частина системи ЕП “ЕД - РМ”? На базі чого складають розрахункову схему цієї частини?
2. Як провести теоретичний аналіз механічної системи ЕП, яка має складну кінематичну схему? Які приймаються допущення в інженерних розрахунках, де реальну систему замінюють еквівалентною в енергетичному відношенні?
3. Які моменти і сили розвиваються двигунним пристроєм і ВОРМ?
4. Яким рівнянням визначається корисна робота ВОРМ при реалізації підведеної до нього механічної енергії (МЕ)?
5. Як визначається механічна потужність при обертовому і поступальному рухах?
6. Які моменти статичних опорів і сили, створювані ВОРМ, називають реактивними або активними?
7. Як напрямок дії активних сил або моментів, що створюються стороннім джерелом МЕ, залежить від напрямку руху? У яких випадках це джерело може споживати або віддавати МЕ?
8. Що покладено в основу зведення моментів статичних опорів до вала ЕД?

9. Що покладено в основу зведення моментів інерції та мас, що рухаються поступально до вала ЕД?
10. У яких випадках роботи системи „ЕП-РМ” рухається рівномірно або нерівномірно?
11. Який режим роботи двигуна описують диференціальні рівняння процесу нерівномірного обертального або поступального рухів окремого елемента системи?
12. Що показує аналіз диференціальних рівнянь процесу нерівномірного поступального або обертального рухів окремого елемента системи?
13. Який вигляд має диференціальне рівняння процесу нерівномірного обертального руху ЕД, що може працювати у двигунному і гальмівному режимах?

### ЛЕКЦІЯ 3

#### Механічні та електромеханічні характеристики двигунів постійного струму незалежного збудження

##### План лекції:

1. Рівняння рівноваги напруг у колі якоря.
2. Генераторні режими роботи ДПС НЗ.
3. Динамічне гальмування ДПС НЗ.

#### 1. Рівняння рівноваги напруг у колі якоря.

Рівняння рівноваги між напругою  $U$ , прикладеною до якірного кола, та е.р.с.  $E$  якоря і спадом напруги в якірному колі  $I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})$  при усталеному режимі роботи ДПС НЗ має вигляд:

$$U = E + I_{\text{я}} R = E + I_{\text{я}} (R_{\text{я}} + R_{\text{д}}), \quad (2.1)$$

де  $I_{\text{я}}$  – струм у колі якоря, А;

$R = R_{\text{я}} + R_{\text{д}}$  – сумарний опір якірного кола, який складається із внутрішнього опору якірного кола  $R_{\text{я}}$  та додаткового опору  $R_{\text{д}}$ , Ом;

Внутрішній опір якірного кола ЕД  $R_{\text{я}} = r_{\text{оя}} + r_{\text{дп}} + r_{\text{к}} + r_{\text{щ}}$  складається з опору обмотки якоря  $r_{\text{оя}}$ , опору обмотки додаткових полюсів  $r_{\text{дп}}$ , опору компенсаційної обмотки  $r_{\text{к}}$  і опору щіткового контакту  $r_{\text{щ}}$ .

Рівняння е.р.с.:

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2 \cdot \pi} \Phi_{\text{ном}} \omega = C_e \Phi_{\text{ном}} \omega = C_{\text{ном}} \omega \quad (2.2)$$

і електромагнітного моменту:

$$M_e = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2 \cdot \pi} \Phi_{\text{ном}} I_{\text{я}} = C_m \Phi_{\text{ном}} I_{\text{я}} = C_{\text{ном}} I_{\text{я}} \quad (2.3)$$

показують, що  $E$  і  $M_e$  залежать від магнітного потоку  $\Phi$ ,  $B\delta$  і коефіцієнтів  $C_e$ ,  $C_m$ , які залежать від конструктивних параметрів ЕД, у системі СІ кутова частота обертання вала (кутова швидкість) ЕД  $\omega$  має основну одиницю виміру  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$  і додаткову  $\text{с}^{-1}$ , а електромагнітний момент  $M_e$ , Н·м, то  $C_e = C_m = C$  або  $\frac{C_e}{C_m} = 1$ ;  $C_{\text{ном}} = C \cdot \Phi_{\text{ном}}$ , В·с.

Крім того, електрорушійна сила залежить від кутової швидкості якоря  $\omega$ ,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ , а електромагнітний момент двигуна залежить від струму якоря.

При виводі рівняння механічної (електромеханічної) характеристики ДПС НЗ вважають, що двигун має додаткові полюси і компенсаційну обмотку. Це дає можливість нехтувати реакцією якоря, вважати магнітний потік сталим, а механічні характеристики – прямолінійними. У формулі

механічної характеристики є момент електромагнітний, а не момент на валу двигуна, який менший від електромагнітного моменту на величину, яку називають моментом холостого ходу. Момент холостого ходу  $M_{х.х}$  відповідає втратам у сталі та механічним втратам у двигуні. Він порівняно малий, тому з достатньою для практики точністю при розрахунках МХ можна ним нехтувати і вважати, що момент на валу ЕД дорівнює його електромагнітному моменту.

З метою можливості використання аналітичних виразів МХ ЕД момент втрат звичайно відносять до моменту навантаження, тобто вважають, що підшипники ЕД і його вентилятор є елементами РМ. У цьому випадку заміна моменту на валу ЕД електромагнітним не дає помилок в результатах розрахунків.

Після сумісного розв'язання рівнянь “рівноваги напруг у колі якоря” і “е.р.с. якоря Е” відносно  $\omega$  при номінальних параметрах двигуна одержимо аналітичний вираз природної статичної електромеханічної характеристики:

$$\omega = \frac{U_{ном}}{C\Phi_{ном}} - \frac{I_{я}R_{я}}{C_{ном}} = (U_{ном} - I_{я}R_{я})K_{\phi}, \quad (2.4)$$

де  $U_{ном}$ ,  $\Phi_{ном}$  – номінальні значення відповідно напруги і магнітного потоку;

Підставивши значення струму з формули “електромагнітного моменту двигуна  $M_e$ ” в рівняння ЕМХ, одержимо рівняння статичної механічної характеристики ДПС НЗ:

$$\omega = \frac{U_{ном}}{C\Phi_{ном}} - M \frac{R_{я}}{C^2\Phi_{ном}^2}, \quad (2.5)$$

Аналізуючи виведені формули електромеханічної і механічної характеристик, робимо висновок, що ЕМХ і МХ графічно можна зобразити прямими лініями. Їх початкова ордината – це швидкість ідеального холостого ходу, яка визначається виразом  $\omega_0 = \frac{U_{ном}}{K\Phi_{ном}}$ . У режимі ідеального холостого ходу  $\omega = \omega_0$  на валу двигуна навантаження відсутнє, тобто  $M = 0$ .

Точка ідеального холостого ходу з координатами  $(\omega = \omega_0, M = 0)$  – це точка, через яку проходять МХ ДПС НЗ при переході його із двигунного режиму роботи в генераторний паралельно з мережею. У цьому випадку струм у якорі дорівнюватиме нулю, а е.р.с. двигуна дорівнюватиме напрузі живлення  $E = U$ .

Нахил прямої механічній характеристиці залежить від величини коефіцієнта при моменті –  $\frac{R_{я}}{C^2\Phi_{ном}^2}$ , тобто визначається величиною опору кола якоря.

Електромагнітний момент  $M_e$  в двигунному режимі роботи більший, ніж момент на його валу  $M$ , на величину, яку називають моментом холостого ходу ( $M_{х.х}$ ), або моментом втрат на тертя в підшипниках, вентиляцію і втрат у сталі:

$$M_{х.х} = M_{е.ном} - M_{ном} = C\Phi_{ном}I_{ном} - \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{\omega_{ном}}, \quad (2.6)$$

де  $I_{ном}$ ,  $M_{е.ном}$ ,  $\omega_{ном}$ ,  $P_{ном}$ ,  $M_{ном}$  – відповідно номінальні значення струму, електромагнітного моменту, кутової швидкості, потужності та обертового моменту на валу ЕД.

Момент холостого ходу  $M_{х.х}$  порівняно малий, тому з достатньою для практики точністю при розрахунках МХ можна ним нехтувати і вважати, що момент на валу ЕД дорівнює його електромагнітному моменту.

Якщо ДПС НЗ уже виготовлений, то з виразу  $\omega_0 = \frac{U_{ном}}{C\Phi_{ном}}$ , за яким визначається швидкість ідеального холостого ходу, видно, що її ( $\omega_0$ ) можна змінити за рахунок напруги або магнітного



потоків чи зміною обох величин.

Статичним спадом кутової швидкості ДПС НЗ  $\Delta\omega$  називають спад швидкості, зумовлений наявністю навантаження на валу двигуна:

$$\Delta\omega = \omega_0 - \omega = \frac{R_{\text{я}}}{C^2 \Phi_{\text{ном}}^2} M = \frac{R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{C \Phi_{\text{ном}}} = \frac{R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{C_{\text{ном}}}. \quad (2.7)$$

При сталих значеннях  $M$  і  $\Phi$  статичний спад кутової швидкості буде тим більший, чим більший опір матиме коло якоря двигуна, тобто чим більший додатковий опір.

Коефіцієнт пропорційності між  $E$  і  $\omega$   $C_e = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2 \cdot \pi}$  (його ще називають коефіцієнтом е.р.с. двигуна) залежить від конструктивних параметрів. Також від конструктивних параметрів залежить коефіцієнт пропорційності між моментом, струмом і магнітним потоком

$$C_m = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2 \cdot \pi} = C_e = C.$$

Номинальний електромагнітний момент двигуна буде:

$$M_{\text{ном.в}} = C_m \Phi_{\text{ном}} I_{\text{ном}} = C_{\text{ном}} I_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{я.ном}} R_{\text{я}}}{\omega_{\text{ном}}} \cdot I_{\text{я.ном}} \quad (2.8)$$

$$\text{де } C_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{я.ном}} R_{\text{я}}}{\omega_{\text{ном}}}, \text{ В}\cdot\text{с}.$$

Номинальний момент на валу двигуна буде визначатися через номинальну потужність  $P_{\text{ном}}$  і номинальну частоту обертання якоря  $n_{\text{ном}}$ . Ці величини наведені в каталозі.

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 10^3}{0,105 \cdot n_{\text{ном}}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{ном}}} \quad (2.9)$$

$$\text{де } \omega_{\text{ном}} \approx 0,105 n_{\text{ном}}.$$

Номинальну кутову швидкість ЕД  $\omega_{\text{ном}}$  за каталоговими даними визначають за формулою:

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30}, \text{ або } \omega_{\text{ном}} \approx 0,105 n_{\text{ном}}. \quad (2.10)$$

Швидкість, яку має ДПС НЗ при номинальному моменті і введеному в коло якоря додатковому опорі, визначають за формулою:

$$\omega_{M_{\text{ном}}} = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{я.ном}} (R_z + R_d)}{U_{\text{ном}} - I_{\text{я.ном}} R_{\text{я}}} \omega_{\text{ном}} = \left[ 1 - \frac{I_{\text{я.ном}} (R_{\text{я}} + R_d)}{U_{\text{ном}}} \right] \omega_0 \quad (2.11)$$

Із каталогу відомі значення  $U_{\text{ном}}$ ,  $\eta_{\text{ном}}$ ,  $I_{\text{я.ном}}$ ,  $R_{\text{я}}$ . Якщо немає заводських даних про опір внутрішнього кола якоря ДПС НЗ, то його величину (власне обмотки якоря, додаткових полюсів тощо) визначають за формулою:

$$R_{\text{я}} \approx 0,5 \cdot (1 - \eta_{\text{ном}}) \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{я.ном}}} = 0,5 \cdot (1 - \eta_{\text{ном}}) R_{\text{ном}}, \quad (2.12)$$

Якщо нехтувати реакцією якоря і вважати магнітний потік сталим, то момент короткого замикання визначають за формулою:

$$M_{к.з} = M_{ном} \frac{I_{к}}{I_{ном}}, \quad (2.13)$$

де  $I_{к} = U/R$  – струм короткого замикання, А.

Оскільки сумарний опір якірного кола ЕД  $R$  залежить від додаткового опору  $R_d$ , то струм і момент короткого замикання будуть різними для різних штучних характеристик. Для природної МХ момент короткого замикання буде найбільший, тому що струм короткого замикання обмежує лише внутрішній опір якірного кола ЕД. При цьому рівняння МХ можна написати так:

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{M}{M_{к.з}}\right). \quad (2.14)$$

Аналіз цього рівняння показує, що при  $M = 0$  швидкість  $\omega = \omega_0$ .

Якщо  $M = M_{к.з}$ , то швидкість  $\omega = 0$ .

Струм якоря у двигунному режимі ДПС НЗ визначають із рівняння рівноваги напруг у колі двигуна, що обертається, за виразом:

$$I_{я} = \frac{U - E}{R}. \quad (2.15)$$

## 2. Генераторні режими роботи ДПС НЗ.

В ЕП ДПС НЗ можуть працювати у трьох генераторних режимах:

- 1) робота ДПС НЗ генератором з віддачею енергії в мережу живлення, або робота паралельно з мережею живлення, або ще називають – рекуперативне гальмування;
- 2) робота генератором послідовно з мережею, або гальмування противмиканням;
- 3) робота генератором незалежно від мережі живлення, або електродинамічне гальмування.

Усі генераторні режими – гальмівні.

Генераторний режим роботи ДПС НЗ паралельно з електричною мережею, або рекуперативне гальмування, здійснюється тоді, коли при незмінній схемі вмикання ЕД його якір під дією активного моменту статичних опорів РМ обертається із швидкістю, більшою за швидкість ідеального холостого ходу  $\omega > \omega_0$ . При цьому е.р.с. якоря вища за прикладену напругу, тому струм у якорі і момент, який розвивається ЕД, змінюють свій напрямок. Двигун працює як генератор паралельно з електричною мережею. Рівняння його МХ в режимі рекуперативного гальмування записується так:

$$\omega = \omega_0 + M \frac{R_{я}}{C_{ном}^2} \quad (2.16)$$

Струм якоря у режимі рекуперативного гальмування ДПС НЗ визначають із рівняння рівноваги напруг у колі двигуна, що обертається, за виразом  $U = E - I_{я} R$ . Враховуючи, що е.р.с. не змінювала свій знак оскільки не змінювала знак і кутова швидкість якоря, яка стала  $\omega > \omega_0$ , то

$I_{я} = \frac{E - U}{R}$  буде мати знак більшої величини, тобто знак е.р.с.

Рівняння механічної характеристики ДПС НЗ в режимі рекуперативного гальмування має такий вигляд:

$$\omega = \frac{U_{ном}}{C \Phi_{ном}} + M_{г} \frac{R_{я}}{C^2 \Phi_{ном}^2}, \quad (2.17)$$

де  $M_{г}$  – гальмівний момент двигуна, Н·м.

Аналіз наведеного математичного виразу показує, що при переході двигуна з рушійного режиму в режим генераторного гальмування з віддачею енергії в мережу змінюються знаки у

струмі і моменті двигуна. Статичний спад швидкості:

$$\Delta\omega = +M_{\varepsilon} \frac{R_{\text{я}}}{C^2 \Phi_{\text{ном}}^2}, \quad (2.18)$$

має додатну величину, а тому  $\omega > \omega_0$ .

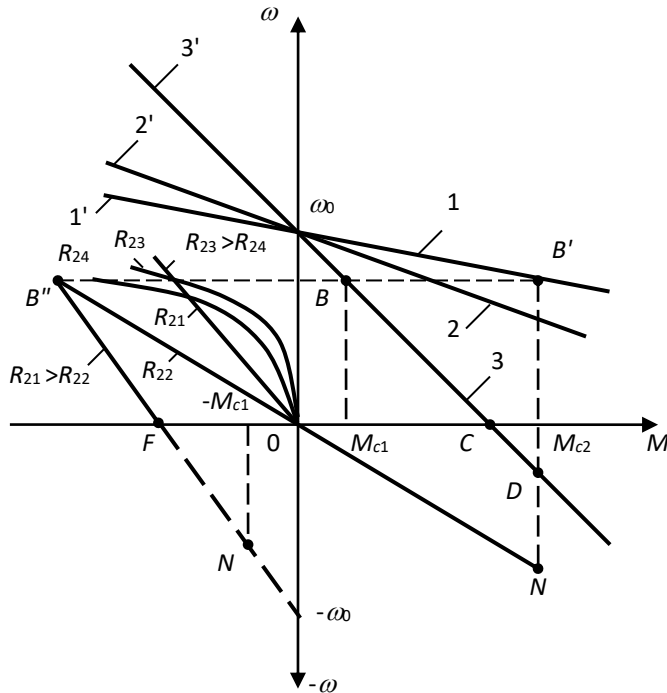


Рис.2.1 - Механічні характеристики ДПС НЗ у двигунному і гальмівному режимах

Нахил прямої механічної характеристики не змінюється, тому що не змінюється  $\frac{R_{\text{я}}}{C^2 \Phi_{\text{ном}}^2}$

коефіцієнт при моменті, вона є продовженням МХ двигунного режиму і розташовується в другому квадранті. Графічно ці характеристики зображуються прямими лініями, які є продовженням МХ двигунного режиму в зоні другого квадранта (рис.2.1).

Рекуперативне гальмування економічне, оскільки супроводжується перетворенням МЕ, що надходить з вала РМ, в ЕЕ, яка віддається (крім втрат в ЕД) в електричну мережу. Має високу надійність.

Перехід з двигунного режиму в гальмівний відбувається плавно, без перемикачів у колі якоря і колі збудження ЕД.

Його застосовують, наприклад, у приводах підйомних і транспортних механізмів. Застосування рекуперативного гальмування обмежується тим, що для його здійснення ЕД повинен обертатися зі швидкістю, вищою за швидкість ідеального холостого ходу, а це не завжди можливо.

Гальмування протivismанням ДПС НЗ може здійснюватися у трьох випадках.

Перший випадок – реалізується в ЕП машин з активним моментом статичних опорів, наприклад, в установці для гальмівного спускання вантажу. Якщо на валу двигуна є активний (потенційний) момент і ЕД працює в двигунному режимі (точка B на рис.2.1), то збільшення статичного моменту від  $M_{c1}$  до  $M_{c2}$  спричинить виникнення від'ємного динамічного моменту, внаслідок чого почнеться зниження швидкості до  $\omega = 0$ . Після цього під дією того самого активного моменту змінюється напрям обертання ЕД  $\omega < 0$  і напрям е.р.с. E, яка буде діяти узгоджено з напругою живильної мережі. Двигун стає послідовно сполучений з електричною мережею, при цьому він споживає енергію як із мережі, так і від вала машини. Ця енергія  $I_{\text{я}}^2 R$  у вигляді тепла виділяється в опорах кола якоря.

Другий випадок – двигун з активним моментом на валу  $M_{c2}$  працює в режимі, що відповідає точці B' (рис.2.1), і якщо в коло якоря ввести значний додатковий опір, момент ЕД

зменшиться до значення, що відповідає точці *B*. Виникне від'ємний динамічний момент, внаслідок чого почнеться зниження швидкості, і після точки *C* почнеться режим гальмування противмиканням.

Третій випадок – гальмування противмиканням характерний для ЕП машин з реактивним моментом статичних опорів і здійснюється шляхом зміни полярності напруги, підведеної до якоря двигуна, що працює в двигунному режимі (точка *B*) (рис.2.1). Це призведе до зміни напрямків струму в ЕД і дії електромагнітного моменту. Поки напрямок обертання не змінився (якір під дією кінетичної енергії системи “ЕД – РМ” продовжує обертатися в попередньому напрямку), електромагнітний момент ЕД діє в протилежному відносно обертання напрямку, тобто гальмує привод, і в цьому випадку напруга живильної мережі та е.р.с. діють узгоджено.

Графічно ці МХ зображують прямими лініями, що лежать у другому квадранті (пряма *B''F* на рис.2.1). Після зупинки (точка *F*) двигун необхідно вимкнути з електромережі, інакше він знову перейде у двигунний режим і буде обертати РМ у протилежному напрямку.

Оскільки при гальмуванні противмиканням напруга, прикладена до якірного кола, і е.р.с. якоря мають однаковий напрямок, то струм у колі якоря різко зростає і визначається за формулою:

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

Усталеному режиму гальмування противмиканням відповідає точка *D*, коли зрівнюються статичний і гальмівний моменти. Рівняння МХ двигуна, що працює в режимі гальмування противмиканням, для випадку зміни напрямку обертання можна записати так:

$$\omega = \omega_0 - M \frac{R_{\text{я}}}{C^2} \quad (2.19)$$

Графічно ці МХ зображуються прямими лініями, які є продовженням ліній МХ двигунного режиму в зоні квадранта IV (рис.2.1). Схема вмикання ЕД в електричну мережу залишається незмінною.

Рівняння механічної характеристики ДПС НЗ при гальмуванні противмиканням для ЕП машин з реактивним моментом статичних опорів має вигляд:

$$\omega = -\omega_0 + M \frac{R_{\text{я}}}{C^2} \quad (2.20)$$

Позитивними якостями гальмування противмиканням ДПС НЗ є значна інтенсивність гальмування до повної зупинки; висока надійність гальмування при будь – якій кутовій швидкості обертання якоря двигуна; наявність гальмівного моменту при нерухомому двигуні; порівняно стаке значення гальмівного моменту.

Основними недоліками цього способу гальмування є значні зусилля на передавальний пристрій і вал двигуна; значна величина струму гальмування для обмеження якої в коло якоря двигуна необхідно ввімкнути зовнішній додатковий опір; значні втрати енергії при гальмуванні; можливість довільного реверсування коли момент двигуна при нульовій швидкості більший від реактивного статичного моменту.

### **3. Динамічне гальмування ДПС НЗ.**

Режим роботи ДПС НЗ генератором незалежно від мережі або режим електродинамічного гальмування створюється, коли якір двигуна, вимкнути з мережі живлення і замкнути на зовнішній опір або накоротко (відзначимо, що закорочування накоротко якоря двигуна не означає для нього режиму короткого замикання).

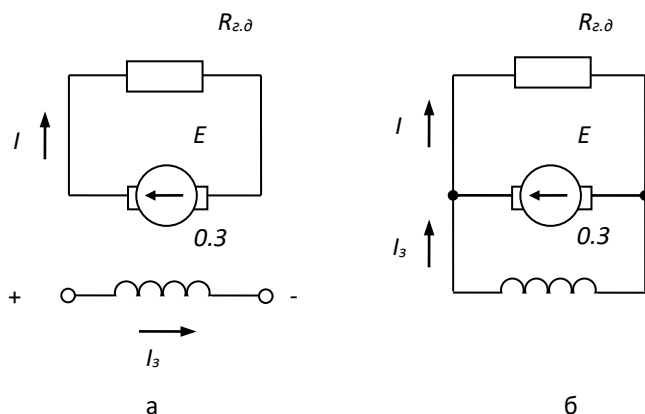


Рис.2.2 - Схеми вмикання ДПС НЗ при динамічному гальмуванні:

- а) при незалежному збудженні;  
б) при самозбудженні.

Обмотка збудження залишається приєднаною до мережі (рис.2.2а) – незалежне збудження або паралельне якорю ЕД; (рис.2.2б) – самозбудження.

Двигун працює як генератор, перетворюючи МЕ, що надходить від вала РМ (за рахунок кінетичної енергії ЕД і механізму або потенційної енергії вантажу, що опускається), в ЕЕ, яка потім витрачається на нагрівання якоря ЕД і гальмівного опору.

При гальмуванні ЕД, на валу якого діє реактивний момент, двигун переходить з точки В' в точку В'' (рис.2.1) і гальмується до зупинки. При активному моменті на валу ЕД може працювати в точці К, яка відповідає усталеній гальмівній швидкості, наприклад, при опусканні вантажу.

При динамічному гальмуванні із самозбудженням ЕД працює в режимі генератора з самозбудженням на зовнішній опір  $R_z$ . Характерною рисою цього режиму є те, що в процесі гальмування при деякій критичній швидкості, залежній від опору кола обмотки збудження, гальмівний момент зникає (рис.2.1). Пояснюється це тим, що при швидкостях, менших за критичні, не відбувається самозбудження.

Оскільки якір ЕД вимикається з мережі, то  $U = 0$  і  $\omega_0 = \frac{U}{C_{iie}} = 0$ , а  $I = \frac{0 - E}{R} = -\frac{E}{R}$ , тоді рівняння МХ ДПС НЗ, що працює в режимі динамічного гальмування, має такий вигляд:  
 $\omega = -M \frac{R_y}{C_{ном}^2}$  – на валу діє реактивний момент, або  $-\omega = M \frac{R_y}{C_{ном}^2}$ , коли на валу діє активний момент статичного опору.

Із рівняння видно, що МХ є прямими лініями, які незалежно від величини опору проходять через початок координат  $\omega = 0$ ,  $M = 0$  (рис.2.1). Жорсткість характеристик при сталому потоці збудження цілком залежить від гальмівного опору  $R_z$ .

Відносно проста схема вмикання і можливість гальмування при відсутності напруги в мережі є основною перевагою цього гальмівного режиму, тому він застосовується як аварійний.

До позитивних якостей електродинамічного гальмування ДПС НЗ можна ще віднести простоту, економічність (у гальмівному режимі енергія з мережі витрачається тільки на живлення обмотки збудження), надійність, плавність гальмування.

Недоліками є зниження гальмівного моменту при зниженні швидкості двигуна, при втраті напруги живлення обмотки збудження зникає гальмівний момент.

В усталеному режимі гальмівний момент двигуна при рекуперативному гальмуванні дорівнює статичному, тому опір додаткового резистора знаходять, користуючись рівнянням механічної або електромеханічної штучної характеристики при додатковому опорі та усталеній швидкості:

$$\omega_{III} = \frac{U_{ном}}{C_{ном}} = \frac{M_{\Gamma}(R_y + R_{\Gamma.P})}{C_{ном}^2}, \quad (2.21)$$

$$\text{звідси } R_{\Gamma.P.} = \frac{C_{ном} (C_{ном} \cdot \omega_{ш} - U_{ном})}{M_{\Gamma}} - R_{я} \quad (2.22)$$

$$\text{або } R_{\Gamma.P.} = \frac{C_{ном} \cdot \omega_{ш} - U_{ном}}{I_{\Gamma}} - R_{я} \quad (2.23)$$

Щоб визначити опір, який треба ввести в коло якоря ДПС НЗ для обмеження гальмівного моменту (струму) в режимі противмикання, знаходять початкове значення гальмівної швидкості (при реактивному статичному моменті) або усталене значення гальмівної швидкості (при потенційному статичному моменті). Задаючи бажану величину гальмівного моменту  $M_{\Gamma}$  двигуна, додатковий опір знаходять за формулою:

$$R_{\Gamma.P.} = \frac{C_{ном} (U_{ном} + C_{ном} \cdot \omega_{\Gamma})}{M_{\Gamma}} - R_{я}. \quad (2.24)$$

Щоб визначити додатковий опір якоря ДПС НЗ у режимі електродинамічного гальмування, задають бажану величину гальмівного струму, знаходять потрібний додатковий опір:

$$R_{\Gamma.P.} = \frac{E}{I_{\Gamma}} - R_{я}, \quad (2.25)$$

де  $E = \frac{\omega}{\omega_0} U$ , а  $\omega$  – швидкість двигуна в момент переведення його в режим електродинамічного гальмування, рад/с.

Відносні значення струму якоря та моменту при  $\Phi = \Phi_{ном} = \text{const}$  у ДПС НЗ однакові:

$$M^* = \frac{(C_{м} \Phi_{ном} I)}{(C_{м} \Phi_{ном} I_{ном})} = I^*$$

Рівняння ЕМХ і МХ ДПС НЗ у відносних одиницях можна одержати, якщо формулу ЕМХ:

$$\omega = \frac{U_{ном}}{C\Phi_{ном}} - \frac{I_{я} R_{я}}{K\Phi_{ном}} \quad (2.26)$$

записати у вигляді:

$$\omega = \omega_o \left( 1 - \frac{IR}{U_{ном}} \right). \quad (2.27)$$

Поділивши обидві частини рівняння на  $\omega_o$  одержимо:

$$\omega^* = \left( 1 - \frac{IR}{U_{ном}} \right) = 1 - \frac{IR}{I_{ном} R_{ном}} = 1 - I^* R^* = 1 - M^* R^*, \quad (2.28)$$

тобто ЕМХ і МХ ідентичні.

ДПС НЗ «іде в рознос» при обриві в колі обмотки збудження. З математичної точки зору  $\omega \rightarrow \infty$  тоді, коли ( $\Phi \rightarrow 0$ ) у знаменнику формули ЕМХ:

$$\omega = \frac{U_{ном} - I_{я} R_{я}}{C\Phi_{ном}}, \quad (2.29)$$

тобто, коли струм обмотки збудження наближається до нуля. Це можливо при обриві в колі обмотки збудження, коли величини напруги живлення і струму будуть дорівнювати нулю, або коли вимкнуте джерело живлення обмотки збудження.

Із формули  $\omega_o = \frac{U_{ном}}{C\Phi_{ном}}$  видно, що при зменшенні напруги живлення, зменшиться величина

швидкості ідеального холостого ходу  $\omega_o$  ДПС НЗ (рис.2.3).

Із формули  $\omega_o = \frac{U_{ном}}{C\Phi_{ном}}$  видно, що при зменшенні напруги живлення в обмотці збудження,

при тій же величині опору її кола, зменшиться в ній струм і, як наслідок, зменшиться її магнітний потік  $\Phi$ , а це збільшить величину швидкості ідеального холостого ходу  $\omega_o$  ДПС НЗ (рис. 2.3).

При збільшенні величини опору в обмотці збудження швидкість ідеального холостого ходу  $\omega_o$  ДПС НЗ збільшиться, так як зменшиться величина струму в обмотці збудження і зменшиться магнітний потік. Це видно із формули  $\omega_o = \frac{U_{ном}}{C\Phi_{ном}}$  і рис.2.3.

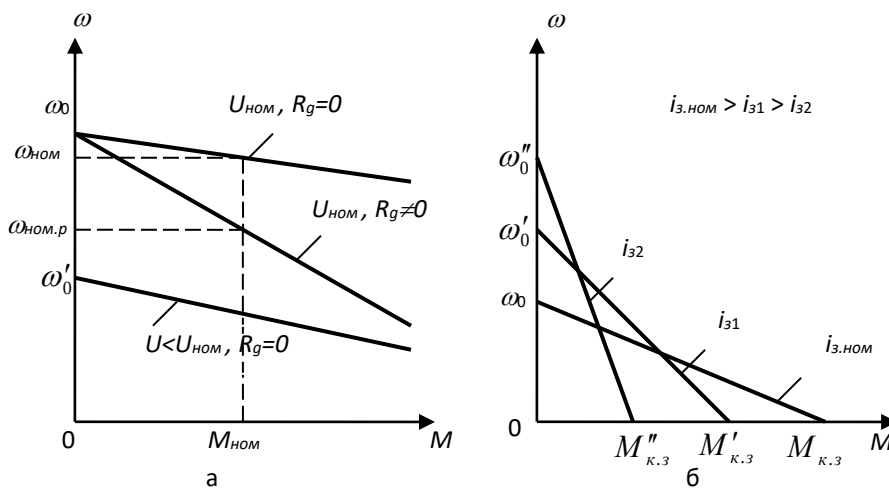


Рис.2.3 - Механічні характеристики ДПС НЗ:  
а) при номінальному магнітному потоці;  
б) при ослабленому магнітному потоці

Струм короткого замикання ДПС НЗ  $I_k = \frac{U}{R}$ , як видно з формули, не залежить від зміни струму в обмотці збудження.

Найбільш економічним є гальмування з віддачею енергії в мережу живлення, наступне - електродинамічне з самозбудженням, коли з мережі живлення не споживається електрична енергія. І найбільш неекономічним є гальмування противмиканням.

#### Питання для самоконтролю.

1. У яких випадках здійснюється рекуперативне гальмування ДПС НЗ?
2. Як визначити струм якоря у режимі рекуперативного гальмування ДПС НЗ?
3. Напишіть рівняння механічної характеристики ДПС НЗ, коли режим його роботи відповідає рекуперативному гальмуванню.
4. Які позитивні якості і які недоліки має рекуперативне гальмування?
5. У яких випадках здійснюється гальмування проти-вмиканням ДПС НЗ?
6. Як визначити струм якоря у режимі гальмування проти-вмиканням ДПС НЗ?
7. Напишіть рівняння механічної характеристики ДПС НЗ у генераторному режимі послідовно з електричною мережею при навантаженні активним моментом статичного опору.
5. Напишіть рівняння механічної характеристики ДПС НЗ для режиму генератора послідовно з електричною мережею при навантаженні його реактивним моментом статичного опору?

6. Які позитивні якості і які недоліки властиві ДПС НЗ в режимі гальмування противмиканням?

7. У яких випадках здійснюється електродинамічне гальмування ДПС НЗ.

#### ЛЕКЦІЯ 4

#### Механічні та електромеханічні характеристики асинхронного електродвигуна.

План лекції:

1. Асинхронні двигуни змінного струму з короткозамкненим та фазним роторами.

2. Механічні характеристики АД.

3. Експлуатаційні режими роботи АД.

#### 1. Асинхронні двигуни змінного струму з короткозамкненим та фазним роторами

На рис.2.8 наведені схеми вмикання (а) і заміщення (б) АД.

Схема заміщення АД використовується для аналізу його статичних режимів роботи при синусоїдній симетричній трифазній напрузі і незмінному моменті навантаження.

На схемах прийняті такі позначення:

$U_1, U_\phi$  – відповідно діючі значення лінійної та фазної напруги, В;

$I_1, I_\mu, I'_2$  – відповідно фазні струми обмотки статора, контуру намагнічування та струм ротора, зведений до обмотки статора, А;

$R_1 = R_c + R_{1\sigma}$  і  $X_1$  – сумарний активний та індуктивний опори фази обмотки статора, Ом;

$R_c, R_{1\sigma}$  – активні опори обмотки статора і додаткового резистора, Ом;

$R'_2 = R'_p + R_{2\sigma}$  і  $X'_2$  – сумарний активний та індуктивний опори фази обмотки ротора, зведені до обмотки статора, Ом;

$R_\mu$  і  $X_\mu$  – фазні значення активного та індуктивного опорів контуру намагнічування, Ом;

$s$  – ковзання асинхронного двигуна.

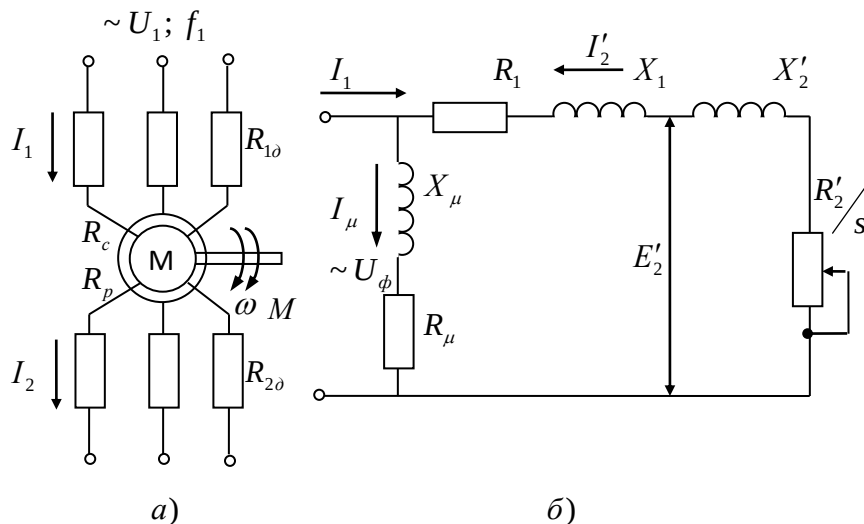


Рис.2.8 – Схема вмикання (а) і заміщення (б) асинхронного двигуна

Ковзання знаходять як відношення різниці між синхронною ( $\omega_0, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ) і дійсною ( $\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ) швидкістю ротора до синхронної швидкості:



$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = 1 - \frac{\omega \cdot p}{2\pi \cdot f_1} \text{ або } s = \frac{n_0 - n}{n_0} = 1 - \frac{n_0 \cdot p}{60 f_1}. \quad (2.42)$$

де  $n_0$  і  $n$  – синхронна і дійсна частота обертання ротора, об/хв;

$f_1$  – частота напруги мережі, Гц;

$p$  – число пар полюсів двигуна.

При виведенні рівняння МХ прийняті такі припущення: активний опір обмотки ротора не залежить від частоти струму, який в ній проходить; насичення магнітної системи двигуна не впливає на величину індуктивних опорів обмоток статора і ротора; провідність контуру намагнічування не залежить від навантаження (залежить лише від напруги); додаткові втрати енергії у двигуні не враховуються

Згідно зі схемою заміщення фазний струм обмотки ротора, зведений до обмотки статора, визначається залежністю:

$$I_2' = \frac{U_\phi}{\sqrt{(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2}} = \frac{U_\phi s}{\sqrt{(R_1 s + R_2')^2 + X_K^2 s^2}}, \quad (2.43)$$

де  $X_K = X_1 + X_2'$  – індуктивний опір двигуна при короткому замиканні.

Одержаний вираз є рівнянням ЕМХ АД  $\omega = f(I_2')$ , аналіз якого виявляє, що  $I_2'$  залежить від ковзання.

Моменти (мінімальний, номінальний, пусковий, максимальний) АД за величиною мають прямопропорційну квадратичну залежність від величини підведеної до обмотки статора напруги живлення.

Ковзання асинхронного двигуна – це різниця між швидкістю обертання магнітного поля обмотки статора і швидкістю ротора у відносних одиницях. Ковзання знаходять відповідно до (2.42).

Якщо виразити електромагнітну потужність асинхронного двигуна через електричні і механічні величини і порівняти ці вирази, а потім розв'язати одержане рівняння відносно величини електромагнітного моменту, то одержимо таке рівняння:

$$M_e = \frac{P_e}{\omega_0} = \frac{m_1}{\omega_0} \frac{U_\phi^2 R_2'}{s [(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2]} = \frac{m_1 U_\phi^2 R_2' s}{\omega_0 [(R_1 s + R_2')^2 + X_K^2 s^2]}, \quad (2.44)$$

яке і називають рівнянням МХ АД в параметричній формі, тому що воно виражене через параметри схеми заміщення  $s(M)$ .

Електромагнітна потужність асинхронного двигуна, яка виражена через електричні величини, має вигляд:

$$P_e = m_1 I_2'^2 R_2' / s = \frac{m_1 U_\phi^2 R_2'}{s [(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2]}, \quad (2.45)$$

а через механічні величини:

$$P_e = M_e \omega_0. \quad (2.46)$$

Критичний момент АД - це найбільша величина його електромагнітного моменту, яку може мати двигун, що працює при заданих значеннях напруги і опорів двигуна. Знак “+” відповідає роботі в двигунному режимі ( $s > 0$ ), а знак “-” в генераторному режимі ( $s < 0$ ).

$$M_{\kappa} = \frac{m_1 U_{\phi}^2}{\pm 2\omega_o \left[ \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right] \pm R_1} \quad (2.47)$$

Із наведеного виразу максимального моменту видно, який вплив мають різні параметри асинхронного двигуна на його величину і видно, що він не залежить від величини активного опору кола ротора і за абсолютною величиною в генераторному режимі більший, ніж у двигунному.

Ковзання, що відповідає швидкості ротора двигуна, при якій він розвиває максимальний (критичний) момент, називається критичним ковзанням і позначається  $s_{\kappa}$ .

$$s_{\kappa} = \pm \sqrt{\frac{R_2'^2}{R_1^2 + X_{\kappa}^2}} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{\kappa}^2}}. \quad (2.48)$$

Знаки у виразі відповідають тим самим, що і в 2.66.в.

У двигунів великої потужності активний опір обмотки статора значно менший за реактивний. Нехтуючи ним, можна одержати спрощені вирази:

$$M_{\kappa} = \pm m_1 U_1^2 / 2\omega_o X_{\kappa}, \quad (2.49)$$

$$s_{\kappa} = \pm R_2' / X_{\kappa} \quad (2.50)$$

Якщо у формулу електромагнітного моменту замість ковзання  $s$  вставити його значення при пуску  $s = 1$ , то одержимо вираз для пускового моменту:

$$M_n = \frac{m_1 \cdot U_{\phi}^2 \cdot R_2'}{\omega_o [(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2]}. \quad (2.51)$$

Із одержаного виразу видно, від яких параметрів і як залежить пусковий момент двигуна. Слід зазначити, що пусковий момент асинхронного двигуна з фазним ротором при збільшенні активного опору кола ротора спочатку зростає і при певному опорі дорівнює критичному моменту, а потім спадає і при безмежно великій величині опору (розімкнуте коло ротора) дорівнює нулю.

## 2. Механічні характеристики АД.

Оскільки опори кіл статора і ротора здебільшого невідомі, тому доцільно мати рівняння МХ АД, виражене через каталогові дані двигуна. Для цього поділять вираз електромагнітного моменту на вираз критичного моменту і після нескладних перетворень одержують:

$$M = \frac{M_{\kappa} (2 + q)}{\frac{s}{s_{\kappa}} + \frac{s_{\kappa}}{s} + q}, \quad (2.52)$$

де 
$$q = \pm \frac{2R_1}{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}.$$

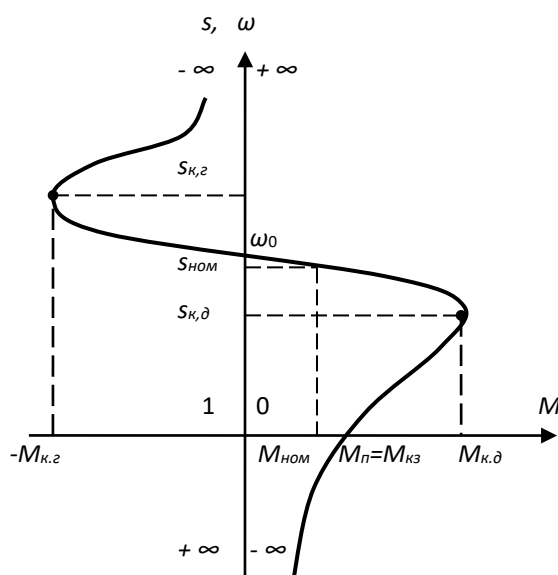


Рис.2.9 – Механічна характеристика АД

На природній механічній характеристиці АД (рис.2.9) можна позначити наступні точки з їх координатами:

1. Точка ідеального холостого ходу ( $\omega = \omega_0, M = 0$ );
2. Точка номінального режиму ( $\omega = \omega_n, M = M_n$ );
3. Точка максимального моменту ( $\omega = \omega_k, M = M_k$ );
4. Точка мінімального моменту при  $S = 0,8 - 0,85 (\omega = \omega_{min}, M = M_{min})$ ;
5. Точка пуску АД ( $\omega = 0, M = M_n$ ).

Інколи за цими характерними точками будують природну МХ АД.

За даними каталогу критичне ковзання визначають за формулою:

$$s_k = \frac{s_{ном} + \sqrt{s_{ном} \frac{M_k^* - 1}{M_k / M_n - 1}}}{1 + \sqrt{s_{ном} \frac{M_k^* - 1}{M_k / M_n - 1}}} \quad (2.52)$$

Для більшості двигунів критичне ковзання приблизно в 4-7 разів більше від номінального ковзання  $s_{ном}$ .

У двигунів великої потужності активний опір обмотки статора значно менший від реактивного. Нехтуючи активним опором обмотки статора, можна одержати спрощену формулу МХ АД:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (2.53)$$

Критичне ковзання розраховується за формулою:

$$s_k = s_{ном} (M_k^* + \sqrt{M_k^{*2} - 1}) \quad (2.54)$$

Із аналізу рівняння МХ АД видно, що для ковзань у межах від  $s = 0$  до  $s = (1,2...1,5) \cdot s_{ном}$  (робоча гілка МХ) можна нехтувати величиною  $s/s_k$ , бо вона в 8-10 разів менша за величину  $s_k/s$ . Тоді МХ буде виражена рівнянням прямої лінії

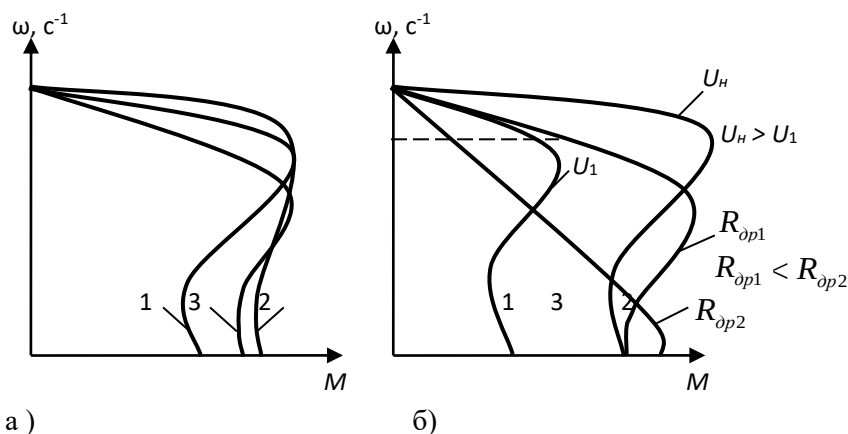
$$M \approx \frac{2M_k}{S_k} S'.$$

При ковзанні більшому, ніж критичне (пускова гілка МХ), у рівнянні МХ можна нехтувати величиною  $s_k/s$ , адже вона мала порівняно з величиною  $s/s_k$ . Тоді рівняння МХ описується рівнянням гіперболи:

$$M \approx 2M_k \frac{S_k}{S}. \quad (2.55)$$

Таким чином, робоча частина МХ вказаних межах ковзань орієнтовно може бути прийнята лінійною. Пускова частина МХ відбиває нелінійну залежність.

Із рівнянь ЕМХ і МХ АД, а також максимального і пускового моментів і критичного ковзання, видно, що збільшення активного опору  $R_2''$  обмотки ротора приводить до зменшення кратності пускового струму, підвищення кратності пускового моменту до критичного і збільшення значень критичного і номінального ковзання. Максимальний (критичний) момент АД не залежить від додаткового активного опору  $R_2''$ . При збільшенні опору ротора МХ двигуна в робочій її частині робиться більш м'якою.



а) б)  
Рис.2.10 – Механічні характеристики АД:

а) природні МХ АД:

1 – загального використання;

2 – з підвищеним пусковим моментом;

3 – з підвищеним ковзанням;

б) при наявності в колі ротора різних опорів і при різних напругах живлення.

Штучні МХ АД можна одержати різними способами (рис.2.10, б): зміною підведеної до двигуна напруги і частоти струму мережі; вмиканням зовнішнього активного або індуктивного опору в коло ротора або статора; несиметрією напруги на статорі або несиметрією опору в колі ротора.

Обертальний момент АД пропорційний квадрату значення підведеної напруги  $U_\phi$ . При напрузі  $U_i$ , відмінній від номінальної  $U_{ном}$ , штучну МХ двигуна можна побудувати за формулою:

$$M_u = M_n \left( \frac{U_i}{U_{ном}} \right)^2 = M_n \cdot U_i^{*2}, \quad (2.56)$$

де  $M_u$  і  $M_n$  – моменти на штучній і природній МХ (рис.2.10, б), Н·м.

Критичне ковзання не залежить від напруги.

У двигунів із фазним ротором для зменшення пускового струму, збільшення пускового моменту в коло ротора вмикають зовнішній додатковий симетричний активний опір  $R'_a$  (рис. 2.11).

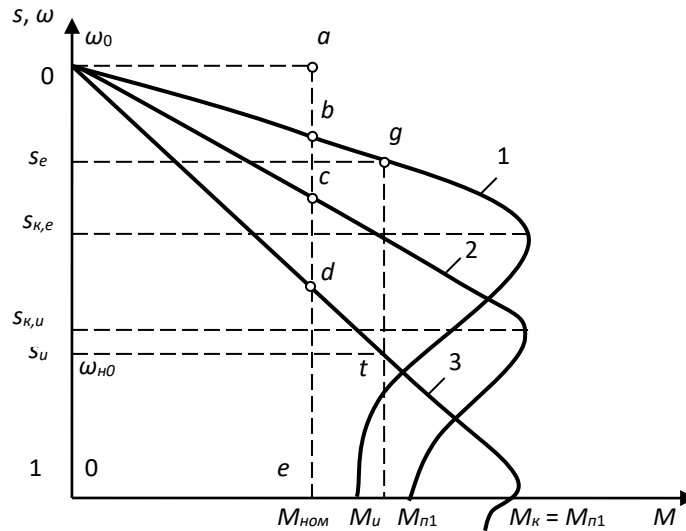


Рис. 2.11 - Механічні характеристики при різноманітних опорах  $R'_{2\sigma}$ , додаткового резистора в колі ротора

Штучну МХ, що відповідає заданому значенню додаткового опору  $R'_o$  знаходять перерахуванням ковзань за формулою:

$$s_u = s_n \frac{R'_p + R'_{2\sigma}}{R'_p} = s_n \frac{R'_2}{R'_p}, \quad (2.57)$$

де  $s_u$  і  $s_n$  – ковзання за штучною і природною МХ;

$R'_p$ ,  $R'_{2\sigma}$  і  $R'_2 = R'_p + R'_{2\sigma}$  – активні зведені до обмотки статора фазні опори обмотки ротора, додаткового резистора і сумарний фази ротора, Ом.

$$R'_p = \frac{E_{2ном}}{\sqrt{3}I_{2ном}} s_{ном} = R_{ном} s_{ном}. \quad (2.58)$$

де  $R_{ном} = \frac{E_{2ном}}{\sqrt{3}I_{2ном}}$  – номінальний опір ротора, Ом;

$E_{2ном}$  – е.р.с. ротора при  $s=1$ ;

$I_{2ном}$  – номінальний струм ротора, А.

### 3. Експлуатаційні режими роботи АД.

Електропривод з асинхронним двигуном може працювати у двигунному або в генераторному (гальмівному) режимах роботи. В АД застосовують такі способи гальмування: рекуперативне – гальмування з віддачею енергії в мережу; гальмування противмиканням; динамічне гальмування зі збудженням постійним або змінним струмом. На рис.2.12 наведені МХ АД у двигунному і генераторному режимах роботи.

При збільшенні опору додаткових резисторів у колі ротора асинхронного двигуна збільшується коефіцієнт потужності цього кола. При цьому зменшується величина струму в роторі, але меншою мірою. Пусковий момент двигуна збільшується за рахунок збільшення коефіцієнта потужності до величини максимального моменту двигуна. Якщо збільшувати опір

кола ротора, то пусковий момент почне зменшуватися, тому що струм ротора істотно буде зменшуватися, а коефіцієнт потужності вже буде близьким до одиниці і практично не збільшуватиметься, що й призведе до зменшення обертового моменту.

Рекуперативне (поверненням енергії в мережу) гальмування виникає, коли швидкість ротора перевищує синхронну ( $\omega > \omega_0$ ), тобто АД працює як асинхронний генератор. При цьому активна потужність має напрямок протилежний тому, що відповідає роботі в режимі двигуна. Реактивна потужність має той самий напрямок, що й у режимі двигуна.

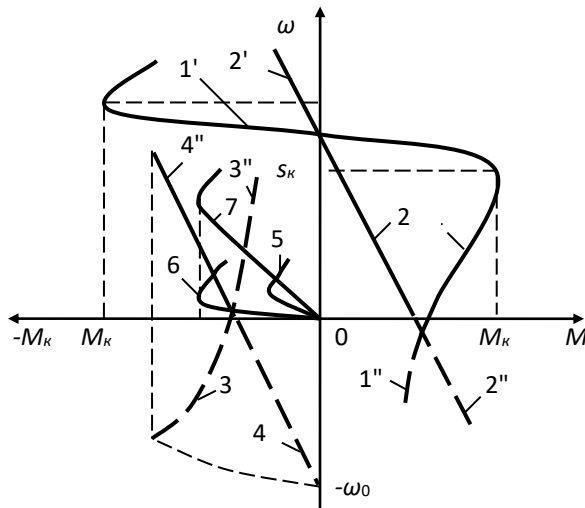


Рис.2.12 – Механічні характеристики АД у гальмівних режимах

У випадках, якщо двигун живиться від керованого перетворювача частоти, гальмування може здійснюватися при зниженні частоти перетворювача, коли синхронна швидкість ЕД стає меншою від швидкості його обертання (при цьому перетворювач повинен працювати в режимі інвертора, щоб прийняти енергію гальмування і передати її в мережу). МХ режиму рекуперативного гальмування описуються рівняннями, в яких ковзання, критичне ковзання і максимальний момент мають від'ємні значення. Ділянки МХ АД, що відповідають різним гальмівним режимам, наведено на рис. 2.12 (1' - при  $R_{Г.Р} = 0$ ; 2' - при  $R_{Г.Р} > 0$ ).

При роботі АД в режимі гальмування з віддачею енергії в мережу активна потужність має напрямок, протилежний тому, що відповідає роботі в режимі двигуна. Реактивна потужність має той самий напрямок, що й у режимі двигуна, тобто реактивна потужність споживається з джерела живлення.

Гальмування противмиканням у приводах з реактивним моментом опору виникає тоді, коли в коло ротора, вимкненого з мережі двигуна, вмикають гальмівний опір для зменшення струму, міняють місцями дві фази двигуна і знову вмикають його в мережу (3'' – характеристика, одержана при ввімкненому в коло ротора зовнішньому додатковому опору); (4'' – характеристика, одержана при відсутності в колі ротора зовнішнього додаткового опору).

Для переходу з режиму двигуна в режим гальмування противмиканням у приводах з активним моментом опору (наприклад, в установках для гальмівного спуску вантажу) досить увімкнути в коло ротора двигуна з фазним ротором достатню величину додаткового опору, не змінюючи схеми вмикання обмоток статора. Напрямок обертання ротора змінюється і тоді, коли момент статичних опорів РМ активний і більший від моменту, який розвивається ЕД. При цьому РМ обертає ротор ЕД проти напрямку обертання магнітного поля статора. Двигун працює з ковзанням  $s > 1$  і розвиває гальмівний момент. На рис. 2.12. 1'' - характеристика, одержана при відсутності в колі ротора зовнішнього додаткового опору; 2'' - характеристика, одержана при ввімкненому в коло ротора зовнішньому опору.

Аналітично МХ АД у режимі гальмування противмиканням описуються тими самими рівняннями, що й МХ двигунного режиму. При цьому слід відзначати, що режим гальмування противмиканням має місце при ковзаннях, більших за одиницю.

Недоліками гальмування противмиканням АД є великі втрати енергії; мала жорсткість МХ; можливість реверсування двигуна після гальмування, якщо його вчасно не вимкнути з мережі.

Щоб здійснити режим електродинамічного гальмування АД зі збудженням постійним струмом, треба вимкнути двигун з мережі змінного струму і ввімкнути його в мережу постійного струму за однією із схем, зображених на рис.2.13, обмеживши постійний струм, споживаний обмотками статора.

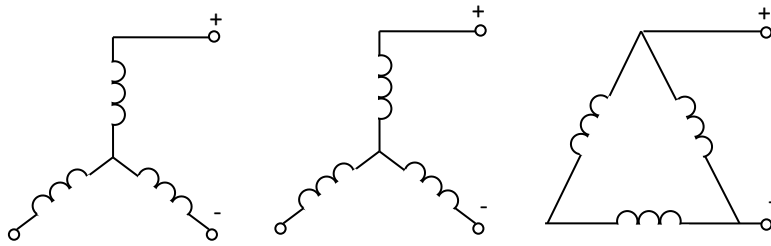


Рис. 2.13 – Деякі способи з'єднання обмоток статора АД при динамічному гальмуванні

Постійний струм, що проходить в обмотці статора, створює нерухоме в просторі магнітне поле, в якому обертається ротор ЕД. В обмотці ротора наводиться е.р.с., під дією якої в замкненому колі цієї обмотки виникає змінний струм. Взаємодією цього струму з нерухомим магнітним полем створюється гальмівний момент. При зниженні частоти обертання ротора до нуля е.р.с. струм в обмотці ротора і гальмівний момент зменшуються також до нуля.

Рівняння МХ АД в режимі електродинамічного гальмування при ненасиченій магнітній системі має вигляд:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{\omega}{\omega_k} + \frac{\omega_k}{\omega}}, \quad (2.59)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість обертання, що відповідає критичному моменту  $M_k$  в режимі динамічного гальмування, рад/с;

$$M_k = \frac{m_1 \cdot I_1^2 \cdot X_\mu^2}{2\omega_0 (X_\mu + X_2)}, \quad (2.60)$$

де  $X_\mu$  – реактивний опір контура намагнічування двигуна, Ом;

$I_1$  – постійний струм, що проходить через обмотку статора, А;

$X_2$  – реактивний опір ротора при частоті, яку має мережа, Ом.

Механічні характеристики АД, що працює в режимі електродинамічного гальмування 5 і 6 (рис. 2.12), відповідають одному певному опору, увімкненому в коло ротора, але різним струмам збудження, що протікають по обмотках статора (6 – відповідає більшому, а характеристика 5 – меншому). Характеристики 6 і 7 відповідають одному певному струму збудження, але різним опорам, увімкненим у коло ротора (характеристика 6 відповідає меншому опору, а характеристика 7 – більшому).

#### Питання для самоконтролю.

1. У яких випадках МХ АД можна представити прямою лінією, а в яких у вигляді гіперболи?
2. Як впливає збільшення додаткового активного опору  $R_2''$  в колі ротора на пускові струм і момент, на ковзання номінальне і критичне, на критичний момент і жорсткість робочої частини МХ?
3. Якими способами можна одержати штучні МХ АД?
4. Як впливає зміна напруги живлення мережі на обертальний момент двигуна?
5. Як можна зменшити пусковий струм і збільшити пусковий момент АД з фазним ротором?
6. Як одержати штучну МХ АД з фазним ротором за заданим додатковим опором  $R_D'$ ?

7. Які можливі режими роботи електропривода з асинхронним двигуном з фазним ротором?
8. Поясніть, чому при збільшенні опорів додаткових резисторів у колі ротора асинхронного двигуна його пусковий момент спочатку збільшується, а потім зменшується.
9. Як здійснити рекуперативне гальмування АД ?

## ЛЕКЦІЯ 5

### Механічні характеристики однофазних електродвигунів. Механічна та кутова характеристики синхронного двигуна

План лекції

1. Однофазні асинхронні електродвигуни.
2. Трифазні синхронні електродвигуни.
3. Механічна та кутова характеристика синхронного двигуна.

#### 1. Однофазні асинхронні електродвигуни.

Характеристика *A* (рис.2.16,б) відповідає роботі двигуна без конденсаторів, *B* – при вмиканні конденсаторів  $C_1$  і  $C_2$ , *D* – при вмиканні конденсатора  $C_1$ .

При вимиканні конденсатора  $C_2$  двигун переводиться з характеристики *B* на характеристику *D*. Для зміни напрямку обертання конденсаторного двигуна міняють місцями кінці однієї з його обмоток – пускової або робочої.

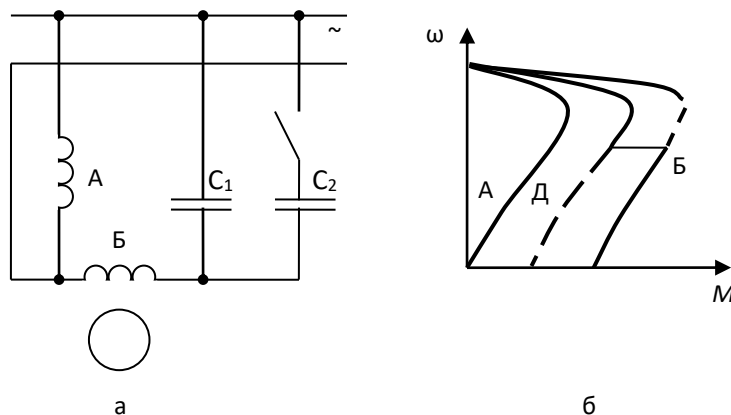


Рис.2.16 – Схема вмикання (а) і МХ (б) однофазного двигуна з пусковим і робочим конденсаторами.

#### 2. Трифазні синхронні електродвигуни.

Синхронні трифазні двигуни (СД) широко застосовують для привода механізмів, що не потребують регулювання швидкості (насосів, компресорів, охолоджувальних машин та ін.)

Синхронні двигуни мають такі переваги порівняно з АД:

- високий коефіцієнт потужності  $\cos\varphi$ , який дорівнює одиниці для малопотужних двигунів і випереджальний  $\cos\varphi$  у потужних двигунів. Здатність роботи з випереджальним  $\cos\varphi$ , коли він компенсує реактивну потужність, що споживається з мережі іншими АД;
- високий ККД 96-98 %, тобто на 1-1,5 % більший, ніж ККД АД того ж габариту і швидкості;
- можливість короткочасного збільшення здатності перевантаження завдяки підсиленню збудження двигуна. Перевантажувальна здатність СД звичайно дорівнює 2..3. Вона залежить від напруги мережі і струму збудження. Збільшуючи струм збудження понад номінальний, перевантажувальну здатність двигуна можна збільшити до (3,5..4)  $M_{ном}$ ;
- менша чутливість до відхилення напруги мережі від номінальної. Обертальний момент ЕД залежить від величини магнітного потоку статора і магнітного потоку ротора. У зв'язку з тим, що магнітний потік ротора створюється постійним струмом, який надходить від збудника, зміна напруги в мережі вплине лише на величину магнітного потоку, створюваного обмоткою статора,



яку приєднано до мережі, а магнітний потік ротора залишиться сталим. Завдяки цьому електромагнітний синхронний момент синхронного двигуна прямо пропорційний напрузі мережі;

- більший максимальний момент;
- абсолютно жорстка характеристика, тобто відсутність залежності швидкості двигуна від навантаження (якщо воно менше від критичного);
- більша експлуатаційна надійність, завдяки наявності більшого повітряного проміжку між статором і ротором, унаслідок чого його характеристики і властивість мало залежать від спрацювання підшипників та неточності монтажу ротора;

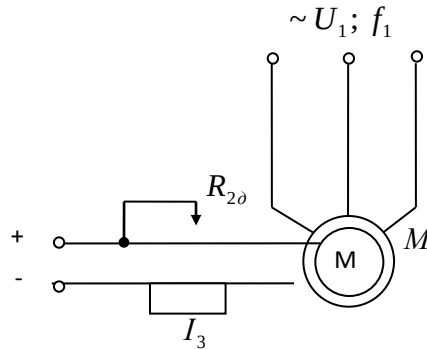


Рис. 2.17 – Схема вмикання СД

- можливість їх виготовлення на дуже великі потужності (до кількох десятків мегават і більше).

На схемі вмикання СД (рис.2.17) статор аналогічний статору АД. Ротор СД виконаний з двома обмотками: обмоткою збудження постійного струму та короткозамкнутою пусковою обмоткою, яка забезпечує МХ СД у вигляді однієї з кривих (рис.2.18, а). Характеристика 1 забезпечує порівняно з характеристикою 2 більший підсинхронний (“вхідний”) момент  $M_{\theta 1} > M_{\theta 2}$ , тобто обертальний момент, який двигун має, коли працює на пусковій характеристиці при швидкості 0,95 від синхронної.

Підсинхронний момент буде тим більший, чим менший опір пускової обмотки двигуна, а пусковий момент – навпаки, тобто  $M_{n1} < M_{n2}$ . Вибір виду пускової МХ визначається конкретними умовами роботи СД

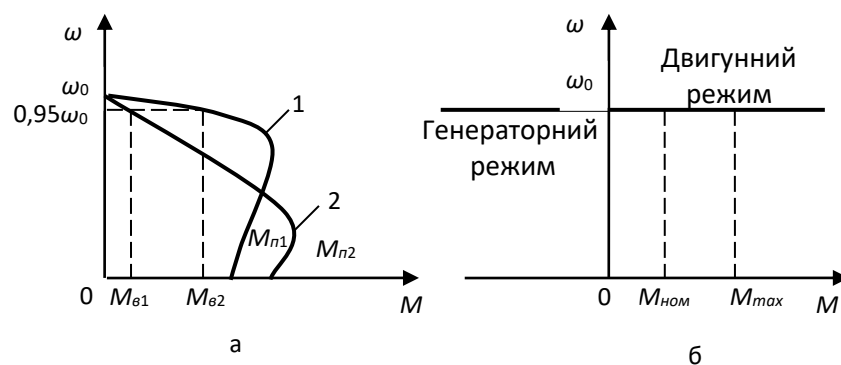


Рис.2.18 – Механічні характеристики СД: а) пускові; б) статичні

### 3. Механічна та кутова характеристика синхронного двигуна.

Синхронний двигун запускають спочатку так, як АД з КЗР, тобто прямим вмиканням у мережу. При цьому СД розганяється, як АД, завдяки наявності в ньому пускової короткозамкнутої обмотки на роторі. Після розгону ЕД до підсинхронної швидкості, що становить 0,95 – 0,98 синхронної, в обмотку збудження двигуна подається струм від збудника і двигун втягується в синхронізм, а потім обертається зі сталою швидкістю обертання магнітного потоку статора, тобто з синхронною швидкістю. Тільки в цьому випадку взаємодія магнітних полів статора і ротора

може створювати сталий за напрямком момент СД. Таким чином, МХ СД  $\omega=f(M)$  (рис.2.18,б) є горизонтальною лінією з ординатою  $\omega_0$ , яка має місце для деякого максимального моменту навантаження  $M_{max}$ , перевищення якого призводить до випадання з синхронізму.

Кутова характеристика СД відображає залежність моменту від внутрішнього кута СД  $\theta$ , яким є кут між е.р.с. статора  $E$  і напругою мережі  $U_\phi$  або між віссю обертального магнітного поля статора і віссю магнітного поля ротора. Кутова характеристика показана на рис.2.19

Для визначення максимального моменту СД  $M_{max}$  служить кутова характеристика СД. Припускають, що активний опір статора  $R_c \approx 0$ , і будують спрощену векторну діаграму (рис.2.19, а).

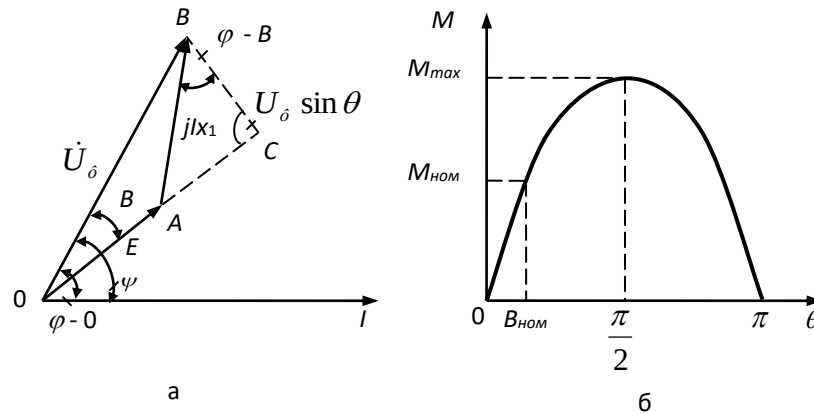


Рис.2.19 – Спрощена векторна діаграма (а) і кутова характеристика СД (б)

Електромагнітна потужність двигуна дорівнює потужності, яка споживається з мережі:

$$P_e = 3U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1, \quad (2.74)$$

де  $I_1$  – фазний струм статора, А;

$U$  – напруга мережі, В;

$\varphi_1$  – кут зсуву між векторами напруги і струму, град.

Зі спрощеної векторної діаграми (рис.2.19,а) видно, що проекції векторів напруги  $U$  і е.р.с.  $E$  на вісь струму  $I_1$  однакові, тобто:  $U \cos \varphi = E \cos (\varphi - \theta)$ .

З допоміжного трикутника ABC і трикутника ABO визначають:

$$\cos(\varphi - \theta) = AB/AC = U \sin \theta / IX_c, \quad (2.75)$$

тоді  $U \cos \varphi = EU \sin \theta / IX_c$  і знаходять:

$$P_e = 3IUE \sin \theta / IX_c = 3EU \sin \theta / XC, \quad (2.76)$$

оскільки  $U/XC = I_k$  – струм короткого замикання, то електромагнітний момент двигуна:  $M_e = 3 I_k E \sin \theta / \omega_0$ . При  $\theta = 90^\circ$  електромагнітний момент має максимальне значення:  $M = 3EI_k / \omega_0$ .

Тоді вираз кутової характеристики СД має такий вигляд (рис.2.19,б):  $M = M_{max} \sin \theta$ . СД може стійко працювати тільки при зміні кута  $\theta$  в межах від  $0$  до  $90^\circ$ . Більші значення кута  $\theta$  призводять до випадання двигуна із синхронізму.

Для підвищення ефективності електродинамічного гальмування СД його обмотку збудження доцільно живити від збудника, що приводиться іншим двигуном. При живленні від власного збудника внаслідок зменшення напруги збудження одночасно зі сповільненням СД струм збудження зменшується, що призведе до зменшення гальмівного моменту двигуна, а отже, до збільшення часу гальмування.

Недоліки СД:

- неможливість регулювання швидкості у випадку, коли двигун живиться від мережі незмінної частоти;
- відносно малий пусковий обертальний момент (слід зазначити, що при зниженні напруги, яку подають до двигуна для зменшення пускового струму СД, сила струму двигуна

знижується пропорційно першому ступеню напруги, тоді як пусковий момент знижується пропорційно другому ступеню напруги).

- складність схеми керування і потреба збудника або перетворювача змінного струму на постійний.

#### **Питання для самоконтролю.**

1. Чим різняться схеми вмикання та МХ однофазного двигуна з пусковим і робочим конденсатором?
2. Де застосовуються синхронні двигуни?
3. Які переваги має СД порівняно з АД?
4. Який вигляд має схема вмикання синхронного електродвигуна і які його механічні характеристики?
5. Як здійснюється пуск синхронного електродвигуна?
6. Яку залежність відображає кутова характеристика синхронного двигуна?
7. Як визначити максимальний момент синхронного електродвигуна?
8. Що потрібно виконати для підвищення ефективності електродинамічного гальмування СД?
9. Які недоліки має СД?

Лекція 6.

### **Регулювання координат електроприводів**

План лекції

#### **1. Загальні положення**

#### **2. Керовані перетворювачі в системах електропривода**

#### **3. Параметричні способи регулювання швидкості двигунів постійного та змінного струму**

#### **4. Основні показники регулювання швидкості**

#### **1. Загальні положення**

Координатами електропривода називають параметри, які регулюють за наперед визначеним законом або стабілізують на певному рівні. До них відносять швидкість, момент, струм, переміщення, кутове та лінійне прискорення та ін. Основною функцією електропривода є приведення до руху робочої машини і керування цим рухом як в усталеному, так і перехідних режимах роботи ВОРМ, згідно з вимогами технологічного процесу, які кількісно можна представити у вигляді показників, що відображають точність роботи ЕП в усталеному режимі, якість перехідних процесів, економічність і надійність, тобто вони бувають різними.

Тому основними задачами керування координатами є:

- забезпечення заданого значення координати на сталому рівні в умовах дії збурень (стабілізація координати);
- зміна координати за попередньо заданим законом (програмне керування); зміна параметра, що контролюється, в умовах, коли задані значення параметра довільно змінюються (слідкуючий електропривод);
- обмеження координати на максимально допустимому рівні.

Усі способи керування координатами електропривода зводяться до двох груп: параметричне керування у розімкнутих системах і автоматичне керування у замкнутих системах.

**Параметричне керування** – зміна координати ЕП за рахунок будь-якого параметра, від якого залежить механічна характеристика двигуна. Перевагою параметричного керування у розімкнутих системах є простота. Тому має широке застосування у ЕП з невисокими вимогами щодо зміни координат. Недоліком параметричного керування є низька точність.

**Автоматичне керування** – керування координатою ЕП у замкнутих системах з використанням зворотних зв'язків.

При параметричному керуванні керуючим пристроєм є релейно-контакторна схема керування, яка не впливає на динамічні властивості розімкнутої електромеханічної системи.

Під час автоматичного керування у склад замкнутої системи входить також керований перетворювач, регулювальні пристрої, елементи зворотних зв'язків.

#### **2. Керовані перетворювачі в системах електропривода**

Керуючим впливом для ДПС є напруга на якорі  $U_{\text{я}}$ , а для АД – частота  $f_1$ . Для зміни цих величин використовують керовані джерела живлення – керовані перетворювачі. Особливістю керованих перетворювачів є те, що їх потужність близька до потужності двигуна, тоді як потужність мережі, як правило, значно більша за потужність двигуна. У зв'язку з цим характеристики і параметри перетворювача впливають на статичні і динамічні властивості ЕП. У системах ЕП до керованих перетворювачів належать: система генератор – двигун (Г–Д); тиристорний перетворювач – двигун (ТП–Д); перетворювач частоти – асинхронний двигун (ПЧ–АД); тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун (ТРН–АД) тощо. Кожен тип перетворювача має свої особливості, які будуть розглядатися при розгляді способів регулювання координат (швидкості) ДПС і АД.

### 3. Параметричні способи регулювання швидкості двигунів постійного та змінного струму

Функціонування деяких технологічних процесів у сільськогосподарському виробництві має потребу, з метою отримання якісної продукції, забезпечення оптимального режиму роботи, щоб ВОРМ мав змінну швидкість. Так у дозаторах регулювання швидкості дає можливість забезпечити оптимальний режим.

Регулюванням швидкості називають вимушену зміну швидкості двигуна незалежно від його навантаження або підтримання її на заданому рівні, при зміні навантаження, відповідно до вимог технологічного процесу.

Існують механічні та електричні способи регулювання швидкості ВОРМ. Механічні способи регулювання швидкості ґрунтуються на зміні параметрів передавального пристрою передаточного числа варіатора чи пасової передачі. Ці пристрої в ряді випадків недостатньо надійні, що утруднює автоматизацію технологічних процесів. У сучасних регульованих електроприводах, а також у безредукторних електроприводах сільськогосподарських машин і механізмів регулювання здійснюється електричним способом за рахунок зміни швидкості двигуна. Регулювання швидкості обертання ЕД може здійснюватись на основі розімкнутих або замкнутих електромеханічних систем.

Регулювання на основі розімкнутої електромеханічної системи (параметричний спосіб) полягає в зміні значення того або іншого параметра електричних кіл ЕД – кількості пар полюсів або напруги живлення внаслідок ввімкнення додаткових елементів: резисторів, конденсаторів, індуктивностей. Так з рівнянь статичних характеристик ДПС НЗ,

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} - \frac{R_{\Sigma} M}{k^2 \Phi^2}, \quad (4.1)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} - \frac{R_{\Sigma} I_{\text{я}}}{k^2 \Phi^2}, \quad (4.2)$$

видно, що можливі три параметричні способи регулювання швидкості внаслідок зміни опору в колі якоря ЕД  $R_{\Sigma}$  (реостатний спосіб), магнітного потоку  $\Phi$  і напруги живлення.

Цими самими способами може здійснюватись регулювання швидкості обертання ДПС ПЗ і 33. Ці способи регулювання прості за конструкцією, дешеві та надійні в експлуатації; однак позитивні якісні показники такого регулювання швидкості не дуже високі.

Швидкість АД визначається швидкістю магнітного поля  $\omega_0$  і величиною ковзання  $s$ , тобто:

$$\omega = \omega_0 (1 - S) = (1 - S) \cdot \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (4.3)$$

Відповідно до цього всі способи регулювання швидкості АД можна поділити на дві групи. До першої групи належать частотне регулювання і регулювання зміною кількості пар полюсів обмотки статора, до другої – регулювання зміною активного опору кола ротора, зміною повних опорів у колі статора або ротора, дросельне та імпульсне регулювання, регулювання в каскадних схемах.

Нині розроблені й інші методи регулювання швидкості АД, наприклад, регулювання зміною гармонічного складу магнітного поля, регулювання взаємним переміщенням активних частин двигуна тощо.

Більшість способів регулювання швидкості АД другої групи, а також регулювання швидкості зміною кількості пар полюсів належать до параметричних способів. Частотне, імпульсне і дросельне регулювання швидкості, а також регулювання швидкості в каскадних схемах реалізуються у замкнутих системах з високими якісними показниками.

Регулювання швидкості з високими якісними показниками можна одержати в замкнутих системах ЕП з двигуном постійного струму під час зміни підведеної до нього напруги. Для цього використовують різні силові перетворювачі, в основному тиристорні й транзисторні.

#### 4. Основні показники регулювання швидкості

До основних показників, що характеризують різні способи регулювання швидкості ЕП, належать точність, діапазон, плавність і напрямок регулювання, а також економічність і допустиме навантаження.

Точність регулювання швидкості – це відповідність заданої та дійсної швидкостей при найбільших відхиленнях моменту навантаження від заданого значення. У системах стабілізації швидкості вихідною координатою є швидкість  $\omega$ , а збуренням – момент статичного навантаження  $M_c$ , який в усталеному режимі дорівнює моменту двигуна  $M$ . Для ЕП точність регулювання швидкості визначається жорсткістю МХ. При зниженні жорсткості МХ знижуватиметься і точність підтримання швидкості обертання. Щоб оцінити похибки регулювання в статичних режимах, використовують поняття статизму МХ (рис.4.1). *Статизмом* МХ називають відношення зміни швидкості двигуна  $\Delta\omega_{ном}$  (викликається зміною навантаження на валі ЕД від нуля до номінального) до швидкості ідеального холостого ходу  $\omega_0$  на заданій характеристиці. Для двигунів змінного струму цю величину називають *ковзанням*; вона характеризує відмінність синхронної швидкості (швидкості поля) від асинхронної (швидкості ротора):

$$S = \frac{(\omega_0 - \omega_{ном})}{\omega_0} = \frac{\Delta\omega_{ном}}{\omega_0} \quad (4.4)$$

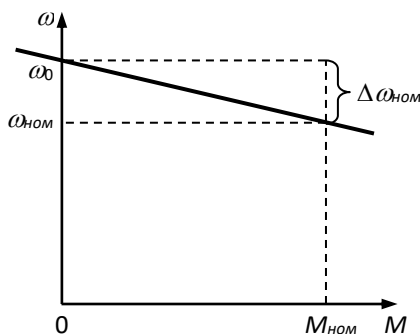


Рис.4.1. До визначення статизму механічної характеристики

Статизм можна визначити за механічною характеристикою  $\omega=f(M)$ . Коли механічна характеристика нелінійна, то статизм  $\delta_{CT} = \frac{d\omega}{dM}$ , якщо ж характеристика лінійна, то

$$\delta_{CT} = \frac{\Delta\omega}{\Delta M} = \frac{\omega_0}{M_{к.з}},$$

де  $\Delta M$  і  $\Delta\omega$  – приріст моменту двигуна і відповідна йому зміна швидкості;  $\omega_0$  – швидкість ідеального холостого ходу;  $M_{к.з.}$  – момент короткого замикання, що відповідає механічній характеристиці, за якою визначена швидкість ідеального холостого ходу  $\omega_0$

Іноді статизм виражають у процентах, тоді

$$S\% = 100 \cdot \frac{\Delta\omega_{ном}}{\omega_0} \quad (4.5)$$

#### **Питання для самоконтролю.**

1. Що називають регулюванням швидкості? Які існують механічні та електричні способи регулювання швидкості виконавчого органу робочої машини?
2. На основі аналізу статичних рівнянь МХ і ЕМХ ДПС визначити, внаслідок чого можна регулювати їх швидкості трьома параметричними способами? Яка експлуатаційна оцінка цих способів?
3. На які дві групи можна поділити всі способи регулювання швидкості АД?
4. Які із способів регулювання швидкості АД належать до параметричних способів, а які реалізуються у замкнутих системах?
5. Як можна одержати якісні показники регулювання в замкнутих системах ЕП з двигуном постійного струму? Що для цього використовують?
6. Які з показників, що характеризують різні способи регулювання швидкості ЕП, належать до основних?
7. Який показник характеризує точність роботи системи стабілізації в усталеному режимі роботи? Яка його характеристика?
8. Чим характеризується діапазон регулювання швидкості?
9. Чим характеризується плавність і напрям регулювання швидкості?
10. Який регульований ЕП є економічно вигідним?

#### **Лекція 7**

#### **Перехідні процеси і стійкість електропривода**

##### **План лекції**

1. Загальні положення про перехідні процеси.
2. Визначення часу пуску і гальмування системи електродвигун – робоча машина.
3. Механічні перехідні процеси в електроприводі з лінійною механічною характеристикою двигуна при незмінних статичному моменті і моменті інерції

##### **1. Загальні положення про перехідні процеси.**

У загальному випадку рух електропривода (ЕП) може бути у двох режимах – усталеному, при якому швидкість руху незмінна (або, окремий випадок, дорівнює нулю), і перехідному (динамічному), де швидкість змінюється, оскільки ЕП переходить із одного усталеного стану до іншого.

Умовою усталеного обертального руху системи електродвигун – робоча машина (ЕД-РМ) відповідно до основного рівняння руху є рівність моментів двигуна і приведенного до валу двигуна моменту навантаження  $M=M_C$ .

Усталеним називається режим, при якому електропривод працює з постійними струмом, моментом, швидкістю обертання і температурою. Режими, за яких ці параметри змінюються, називаються неусталеними.

Неусталені режими умовно можна поділити на тривалі та короточасні. Тривалі (безперервні) неусталені режими спостерігаються при роботі привода зі змінним навантаженням, коли момент статичних опорів безперервно змінюється (дробарки, пиломори, преси тощо), а також у регульованих приводах з безперервною зміною швидкості обертання відповідно до заданого закону. Короточасні неусталені режими виникають при переході від одного усталеного до іншого, тому їх називають перехідними режимами або перехідними процесами. До них належать процеси розгону, гальмування, реверсування, зміни швидкості обертання при регулюванні або при зміні навантаження тощо. Перехідні процеси ЕП можуть бути викликані аварійними режимами або порушеннями нормальних умов електропостачання, наприклад, коливанням напруги або частоти в мережі живлення, обривом однієї з трьох фаз тощо (Рис. 1).

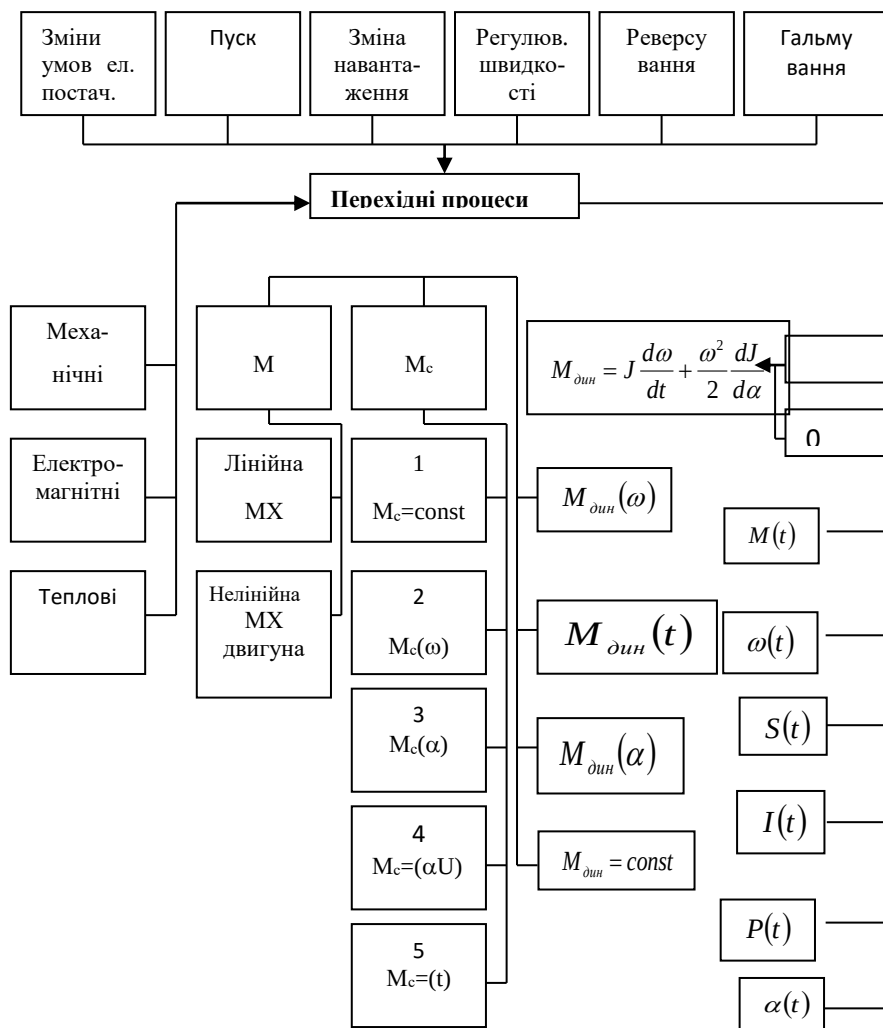


Рис. 1. Причини виникнення перехідних процесів в ЕП

Необхідність вивчення перехідних режимів обумовлена низкою суттєвих обставин. У ряді випадків перехідні режими впливають на продуктивність робочих машин і якість перероблюваного або вироблюваного продукту ( дробарки зерна при ручному завантаженні, штампувальні верстати тощо). При великих коливаннях швидкості обертання роторів дробарок зерна від зміни навантаження також знижується продуктивність машин і погіршується якість подрібнення.

Прискорення, які виникають у виробничих механізмах і передачах при перехідних процесах, можуть перевищити допустимі значення і призвести до поломки окремих ланок кінематичної схеми, псування продукту або порушення вимог техніки безпеки. Тому при проектуванні електроприводів потрібно узгоджувати фактичну тривалість перехідних процесів із допустимою.

Для електроприводів, які тривалий час працюють у перехідних режимах, суттєве значення може мати витрата електроенергії на прискорення або гальмування системи. Ця енергія не виконує корисної роботи, внаслідок чого знижується ККД електропривода.

Ці та інші фактори свідчать, що знання законів перехідних процесів дає можливість вибрати електропривод, який би максимально забезпечував вимоги технологічного процесу при найкращому використанні електродвигунів.

Характери і тривалості перехідних процесів залежать від особливостей робочої машини, типу приводного електродвигуна, механічної передачі, перетворювального і керуючих пристроїв.

При перехідному процесі одночасно і взаємозв'язано змінюються механічна (кінетична), електромагнітна і теплова енергія системи ЕП, відповідно і назва перехідних процесів: механічний, електромагнітний і тепловий. Перехід будь – якої системи від одного рівноважного стану до іншого пов'язаний з інерційністю окремих ланок системи. В електроприводах діють три основних види інерції:

електромагнітна інерція, обумовлена індуктивністю обмоток електродвигунів, трансформаторів, реакторів, апаратів керування; механічна інерція робочої машини, двигуна, передачі і апаратів керування; тепла інерція електродвигунів та деяких елементів апаратів керування.

У більшості випадків теплові процеси відбуваються набагато повільніше за механічні і електромагнітні, суттєвого впливу на стан електроприводу не мають, тому у подальшому вивченні перехідних процесів зміна теплового стану не враховується.

Вплив електромагнітної інерції враховують при розрахунку швидкодіючих і точних електроприводів (регульованих, програмно - керованих, слідкуючих та ін.).

У багатьох випадках, коли не потрібна висока точність розрахунків, обмежуються врахуванням лише механічної інерції. При цьому складається одне диференціальне рівняння руху системи, а співвідношення між електричними величинами описуються алгебраїчними рівняннями.

## 2. Визначення часу пуску і гальмування системи електродвигун – робоча машина.

При розрахунку електроприводів потрібно знати час пуску (гальмування) системи ЕД – РМ. Така необхідність виникає при розробці технологічних процесів, пов'язаних з частими пусками, гальмуванням і реверсуванням ЕД; при перевірці двигунів на нагрівання під час перехідних режимів тощо.

Якщо прийняти зведений момент інерції системи  $J$  незмінним, то рівняння руху електропривода матиме вигляд:

$$dt = J \frac{d\omega}{M - M_c}, \quad (3.1)$$

або

$$t = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{M - M_c}, \quad (3.2)$$

де  $t$  – час перехідного процесу при зміні швидкості ЕД від  $\omega_1$  до  $\omega_2$ .

Оскільки момент електродвигуна і момент статичних опорів системи є функціями швидкості:

$$t = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{M_{(\omega)} - M_{c,\omega}}, \quad (3.3)$$

то аналітичне розв'язання рівняння (3.3) часто дуже складне, а іноді неможливе через складність рівнянь механічних характеристик ЕД і РМ. У деяких випадках розв'язання можна спростити. Розглянемо це на прикладі реостатного пуску електродвигуна постійного струму або АД з фазним ротором, прийнявши залежність між їх моментом і швидкістю лінійною та момент статичних опорів незмінним ( $M_c = \text{const}$ ).

$\omega$

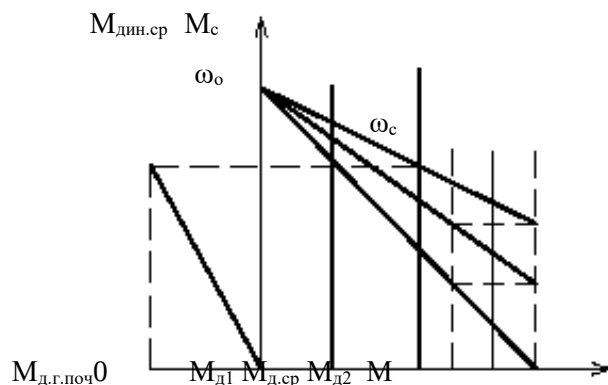


Рис.3.1. Зміна моменту електродвигуна при реостатному пуску і  $M_c = \text{const}$



При правильному розрахунку пускового реостата значення пускового моменту  $M_1$  і моменту перемикачів  $M_2$  на всіх ступенях однакові (рис.3.1.), тому з невеликою похибкою можна допустити, що момент двигуна в процесі пуску незмінний і дорівнює середньому значенню:

$$M_{cp} = \frac{M_1 + M_2}{2} \quad (3.4)$$

З урахуванням прийнятих припущень час пуску системи до усталеної швидкості  $\omega_c$  буде:

$$t_i = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{M_{\text{н\ddot{o}}} - M_c} = \frac{J\omega}{M_{cp} - M_c}. \quad (3.5)$$

Якщо електродвигун вимкнути з мережі, то при самогальмуванні під дією статичного моменту  $M_c$  система зупиниться від швидкості  $\omega_c$  за час:

$$t_z = J \int_{\omega_1}^0 \frac{d\omega}{-M_c} = \frac{J\omega_c}{M_c}. \quad (3.6)$$

Тоді при електричному гальмуванні (наприклад, при динамічному гальмуванні електродвигуна незалежного збудження) середній гальмівний момент двигуна становитиме:

$M_{z, \text{ср.}} = \frac{M_{z, \text{пoc.}}}{2}$  і час гальмування визначиться з рівняння:

$$t_{z, \text{дин.}} = J \int_{\omega_c}^0 \frac{d\omega_c}{\frac{-M_{z, \text{пoc.}} - M_c}{2}} = \frac{2J\omega_c}{M_{z, \text{пoc.}} + 2M_c}, \quad (3.7)$$

Розглянемо інший випадок, коли момент двигуна  $M$  і момент статичних опорів  $M_c$  лінійно залежать від швидкості (рис.3.2). При цьому залежність динамічного моменту  $M_{\text{дин.}} = f(\omega)$  також має лінійний характер:

$$M_{\text{дин.}} = a - b\omega. \quad (3.8)$$

Тоді вираз (3.2.) запишемо:

$$t = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{a - b\omega}, \quad (3.9)$$

Інтегруючи рівняння (3.9) в межах зміни швидкості від  $\omega_1$  до  $\omega_2$ , одержимо:

$$t = J \ln \frac{a - b\omega_1}{a - b\omega_2}. \quad (3.10)$$

Коефіцієнти  $a$  і  $b$ , що входять до рівняння (3.10), можна знайти, користуючись рис.3.2. Пряма лінія, яка описує залежність динамічного моменту від швидкості, задана двома точками А і В з координатами  $M_{дин1}$  і  $\omega_1$  та  $M_{дин2}$  і  $\omega_2$ . З урахуванням цих координат рівняння прямої запишемо:

$$\frac{\omega - \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{M_{дин} - M_1}{M_2 - M_1}, \quad (3.11)$$

де  $\omega$  і  $M_{дин}$  - відповідно поточні значення швидкості і динамічного моменту на прямій. Розв'язавши (3.11) відносно  $M_{дин}$ , одержимо:

$$M_{дин} = M_1 + \frac{M_{дин2} - M_{дин1}}{\omega_2 - \omega_1} \cdot \omega - \frac{M_{дин2} - M_{дин1}}{\omega_2 - \omega_1} \cdot \omega_1. \quad (3.12)$$

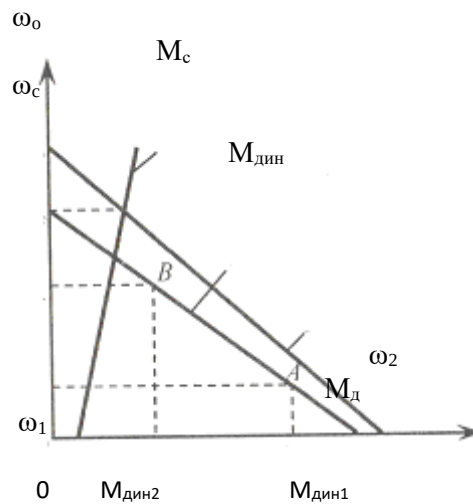


Рис. 3.2. Зміна динамічного моменту в системі, коли  $M$  і  $M_c$  лінійно залежать від швидкості

З виразу (3.12) визначаються коефіцієнти  $a$  і  $b$ :

$$a = \frac{M_{дин} \cdot \omega_2 - M_{дин1} \omega_2}{\omega_2 - \omega_1}, \quad b = \frac{M_{дин1} - M_{дин2}}{\omega_2 - \omega_1}. \quad (3.13)$$

Підставимо значення коефіцієнтів  $a$  і  $b$  у рівняння (3.10), остаточно матимемо:

$$t = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{M_{дин1} - M_{дин2}} \ln \frac{M_{дин1}}{M_{дин2}} \quad (3.14)$$

За рівнянням (3.14) можна знайти час розгону системи при переході від однієї швидкості до іншої, при зміні моменту навантаження або моменту двигуна, а також визначити час розгону і гальмування на кожному ступені реостата.

У тих випадках, коли аналітичний розв'язок занадто складний або неможливий через відсутність точного рівняння механічної характеристики (наприклад, у АД з короткозамкненим ротором), час пуску визначається графічним або графоаналітичними методами, які ґрунтуються на рівнянні руху ЕП в кінцевих приростах:

$$M - M_c = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t}, \quad (3.15)$$

Припускаємо, що за деякий малий проміжок часу  $\Delta t$  динамічний момент  $M_{дин}$  постійний і дорівнює середньому його значенню на цьому проміжку.

Тривалість пуску розраховують графічним методом у такій послідовності. У другому (або у першому) квадранті прямокутної системи координат будують МХ двигуна  $M=f(\omega)$  і РМ  $M_c=f(\omega)$  (рис.3.3). При цьому момент статичних опорів РМ повинен бути зведений до валу ЕД, а момент ЕД визначений з урахуванням допустимого зниження напруги і допустимих відхилень мінімального, максимального і пускового моментів. Графічно знаходять різницю  $M_{дин} = M - M_c$  і будують графік динамічного моменту  $M_{дин} = f(\omega)$ . Останній розділяють на окремі ділянки через малі проміжки швидкості  $\Delta\omega$  і знаходять середнє значення  $M_{дин.ср.}$  на кожній ділянці. Довжини проміжків  $\Delta\omega$  можуть бути різними, і вибирають їх такими, щоб забезпечити високу точність визначення  $M_{дин.ср.}$ . Середні значення динамічних моментів  $M_{дин.ср.}$  на всіх ділянках відкладають угору по осі ординат, одержуючи відрізки  $OB_1 OB_2 \dots OB_n$ .

Ліворуч (або праворуч) від початку координат відкладають відрізок ОА, довжина якого пропорційна зведеному моменту інерції системи  $J$  до валу ЕД. Довжину відрізка ОА (см) знаходять з виразу:

$$OA = \frac{J}{m_j} = \frac{Jm_\omega}{m_M m_t}, \quad (3.16)$$

де  $m_\omega; m_M; m_t; m_j$  – відповідно масштаби

швидкості -  $(с^{-1})/см$ ; моменту -  $Н \cdot м/см$ ; часу -  $с/см$ ; моменту інерції -  $кг \cdot м^2/см$ .

Масштаби швидкості і моменту визначають із графіка  $M_{дин} = f(\omega)$ , а масштабом часу задаються так, щоб майбутня крива  $\omega = f(t)$  розмістилася у межах рисунка.

Позначені на осі ординат точки  $B_1 B_2 \dots B_n$  з'єднують прямими з точкою А. З початку координат проводять відрізок ОС, паралельний прямій АВ<sub>1</sub>, який характеризує залежність

$\omega = f(t)$  на першій ділянці графіка  $M_{дин} = f(\omega)$ . Відрізок ОД на осі абсцис відповідає часу пуску  $\Delta t_i$  системи на першій ділянці.

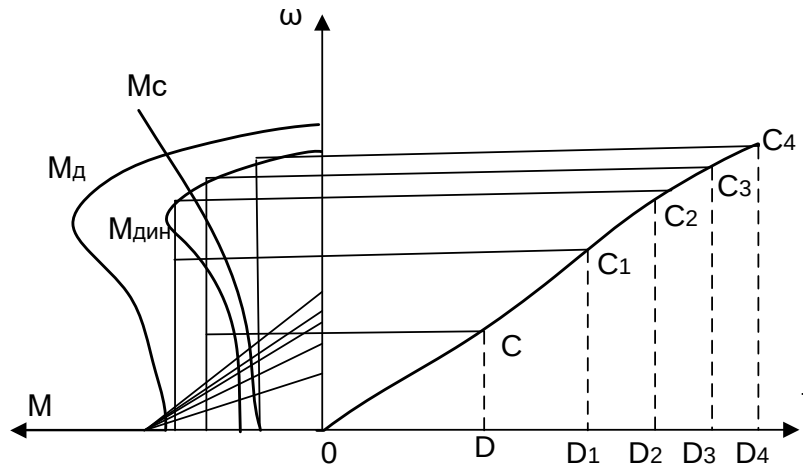


Рис.3.3. Визначення тривалості пуску електропривода з АД графічним методом.

Потім з точки С проводять відрізок  $CC_1$  паралельний  $AB_2$  і так далі до закінчення побудови. Ламана крива  $OCC_1C_2C_3C_4$  являє собою графік залежності  $\omega = f(t)$ , а відрізок  $OD_4$  – тривалість пуску системи до усталеної швидкості.

При графоаналітичному методі розрахунку за методикою, описаною вище, будують графік динамічного моменту і поділяють його на ряд ділянок, на кожній з яких момент передбачається постійним і рівним середньому значенню (рис.3.4).

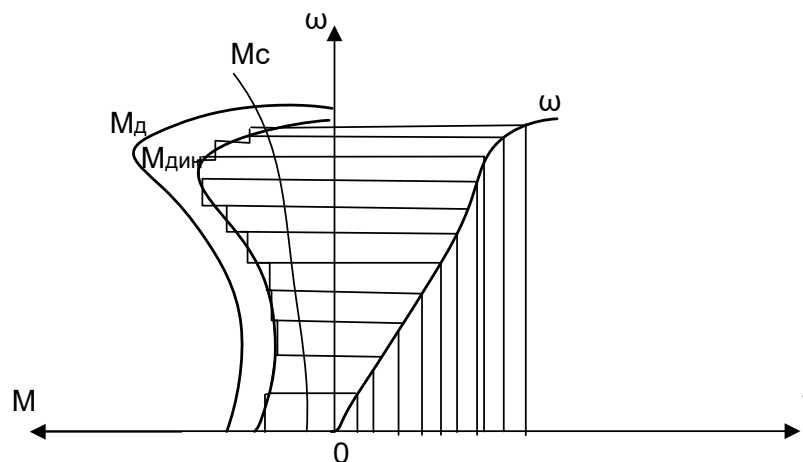


Рис.3.4 Визначення тривалості пуску електропривода з асинхронним електродвигуном графоаналітичним методом

З виразу (3.15) знаходять приріст часу на  $i$ -й ділянці графіка:

$$\Delta t_i = \frac{J \Delta \omega_i}{M - M_c} = \frac{J \Delta \omega_i}{M_{дин.ср}} \quad (3.17)$$

Знаючи тривалість розгону на кожній ділянці, повний час визначають сумою:

$$t_n = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta t_i \quad (3.18)$$

Розрахунок зручно вести у табличній формі (табл. 3.1). Графічним і графоаналітичним методом зручно користуватися також при визначенні часу пуску електродвигунів інших типів, а також часу гальмування системи, коли механічні характеристики ЕД і РМ мають складні аналітичні залежності.

Таблиця 3.1. Розрахунок тривалості пуску системи »ЕД–РМ« графоаналітичним методом.

| № ділянки | $\Delta\omega_i$ , рад/с | $M_{\text{дин.ср.}}, \text{ Н} \cdot \text{м}$ | $\Delta t_i$ , с | $t_n = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$ ,                    |
|-----------|--------------------------|------------------------------------------------|------------------|------------------------------------------------------|
| 1         | $\Delta\omega_1$         | $M_{\text{дин.ср.},1}$                         | $\Delta t_1$     | $\Delta t_1$                                         |
| 2         | $\Delta\omega_2$         | $M_{\text{дин.ср.},2}$                         | $\Delta t_2$     | $\Delta t_1 + \Delta t_2$                            |
| .         |                          |                                                |                  |                                                      |
| .         |                          |                                                |                  |                                                      |
| N         | $\Delta\omega_n$         | $M_{\text{дин.ср.},n}$                         | $\Delta t_n$     | $t_n = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n$ |

### 3. Механічні перехідні процеси в електроприводі з лінійною механічною характеристикою двигуна при незмінних статичному моменті і моменті інерції

Як відомо, лінійну механічну характеристику мають електродвигуни постійного струму незалежного або паралельного збудження. З деякою похибкою лінійними можна вважати реостатні механічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження, асинхронного двигуна з фазним ротором, а також асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при роботі в межах ковзання від 0 до  $s_k$ .

Розглянемо перехідні процеси при пуску електродвигуна постійного струму незалежного збудження з постійно ввімкненим резистором  $R_p$  у коло якоря. Пуск починається з моменту вмикання двигуна в мережу з незмінною напругою  $U$ . Процес відбувається при незмінному магнітному потоці  $\Phi = \text{const}$ . Електромагнітними перехідними процесами знехтуємо.

Вихідними є рівняння руху електропривода

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.19)$$

і рівняння електричної рівноваги електродвигуна

$$U = E + IR, \quad (3.20)$$

де  $R = R_{\text{ос}} + R_p$  - опір кола якоря електродвигуна.

Оскільки момент двигуна прямопропорційний струмові, то

$$\left. \begin{aligned} M &= cI \\ M_c &= cI_c \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

де  $c$  - коефіцієнт моменту, що чисельно дорівнює коефіцієнтові ЕРС;  $I_c$  - струм, споживаний електродвигуном в усталеному режимі при  $M = M_c$ .

Підставивши значення моментів з (3.21) в (3.19), одержимо:

$$cI - cI_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.22)$$

звідки

$$I = \frac{J}{c} \cdot \frac{d\omega}{dt} + I_c. \quad (3.23)$$

Враховуючи (3.23) і те, що  $U = c\omega_0$ , а  $E = c\omega$ , тоді (3.20) запишемо:

$$c\omega_0 = c\omega + \frac{JR}{c} \cdot \frac{d\omega}{dt} + I_c R. \quad (3.24)$$

Розділимо рівняння (3.24) на коефіцієнт  $c$  і перегрупуємо члени:

$$\omega_0 - \frac{I_c R}{c} = \omega + \frac{JR}{c^2} \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.25)$$

Відношення  $\frac{I_c R}{c}$  є статичним падінням швидкості  $\Delta\omega_c$  (рис.3.5), що викликане проходженням струму  $I_c$ . Вираз

$$\frac{JR}{c^2} = T_m \quad (3.26)$$

має розмірність часу і називається електромеханічною сталою часу.

Якщо в одержаному виразі (3.26) замінити  $c^2$  на добуток  $\frac{U}{\omega_0} \cdot \frac{M_{K.3.}}{I_{K.3.}}$ ,

де  $M_{K.3.}$ ,  $I_{K.3.}$  - відповідно момент і струм при загальмованому якорі, то після нескладних перетворень знайдемо:

$$T_m = \frac{J\omega_0}{M_{K.3.}} = \frac{J}{\beta_0}, \quad (3.27)$$

де  $\beta_0$  - коефіцієнт жорсткості механічної характеристики двигуна.

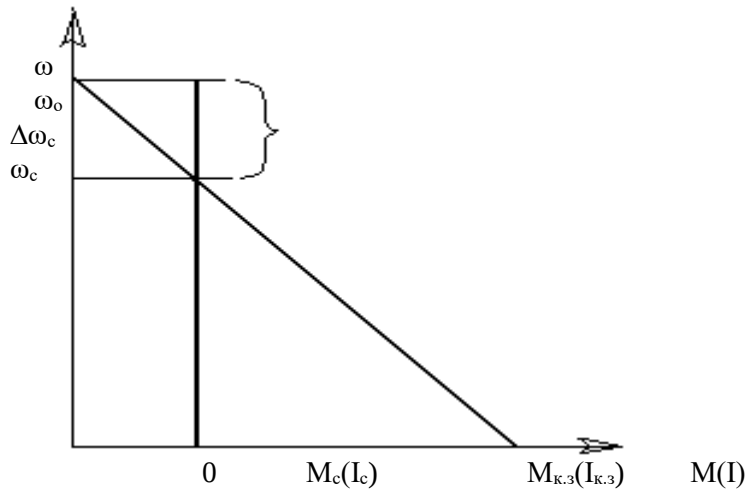


Рис.3.5. Зміна моменту і струму електродвигуна постійного струму незалежного збудження при пуску з постійно ввімкненим резистором.

З (3.27) витікає, що електромеханічна стала часу – це час, за який система з моментом інерції  $J$  розганяється без навантаження з нерухомого стану до швидкості ідеального холостого ходу  $\omega_0$  при незмінному динамічному моменті, що дорівнює моментові короткого замикання  $M_{к.з.}$ .

Оскільки  $T_M$  прямо пропорційна опору кола якоря, то при збільшенні опору стала часу також зростає і навпаки. Слід зауважити, що електромеханічна стала часу не залежить від навантаження двигуна.

Таким чином, рівняння (3.25) можна записати:

$$\omega_0 - \Delta\omega_c = \omega + T_M \frac{d\omega}{dt}, \text{ або } \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{T_M} = \frac{\omega_c}{T_M}, \quad (3.28)$$

де  $\omega_c = \omega_0 - \Delta\omega$  - кутова швидкість двигуна в усталеному режимі при  $M = M_c$ .

Розв'язання цього диференціального рівняння буде:

$$\omega = \omega_c + Ce^{-\frac{t}{T_M}} \quad (3.29)$$

де  $C$  – стала інтегрування, яку можна визначити для початкових умов при  $t=0$  і  $\omega = \omega_{ноч}$ :

$$C = \omega_{ноч} - \omega_c. \quad (3.30)$$

Підставивши рівняння (3.30) у (3.29), одержимо рівняння для кутової швидкості при перехідному процесі в загальному вигляді:

$$\omega = \omega_c \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}\right) + \omega_{ноч} e^{-\frac{t}{T_M}} \quad (3.31)$$

Якщо перехідний процес двигуна починається з нерухомого стану, наприклад, при пуску, коли  $I_c \neq 0, \omega_{ноч} = 0$ , то:

$$\omega = \omega_c \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}\right). \quad (3.32)$$

При пуску без навантаження усталена швидкість буде  $\omega_c \approx \omega_0$ , тоді:

$$\omega = \omega_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}\right). \quad (3.33)$$

На рис.3.6 зображені графіки  $\omega = f(t)$  при пуску двигуна постійного струму незалежного збудження з навантаженням (крива 1) і без навантаження (крива 2).

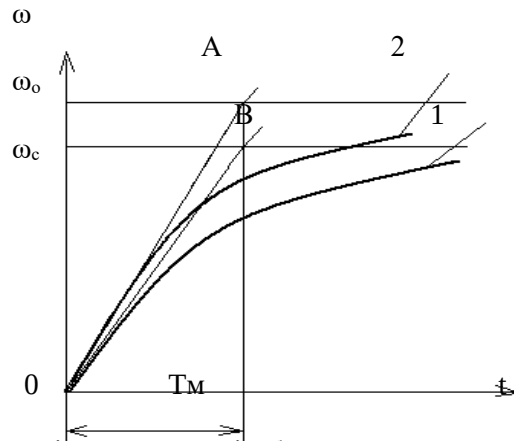


Рис. 3.6. Залежність швидкості обертання ДПС НЗ від часу при пуску в один ступінь: 1- з навантаженням; 2 – без навантаження.

#### Питання для самоконтролю.

1. Навіщо потрібно знати час пуску ( гальмування) системи ЕД – РМ?
2. На основі якого рівняння визначається час перехідного процесу при зміні швидкості ЕД від  $\omega_1$  до  $\omega_2$  ?
3. Якщо аналітично розв'язати рівняння, яке визначає час перехідного процесу, дуже складно, то як його спростити?
4. За якої умови можна допустити, що момент двигуна в процесі пуску незмінний на всіх ступенях пускової діаграми і дорівнює середньому значенню?
5. За якими рівняннями буде визначатися час пуску системи до усталеної швидкості  $\omega_c$  та час самогальмування до зупинки системи: під дією статичного моменту  $M_c$  і при електродинамічному гальмуванні?
6. За яким рівнянням можна знайти час розгону системи при переході від однієї швидкості до іншої, при зміні моменту навантаження або моменту двигуна, а також визначити час розгону і гальмування на кожному ступені реостата?
7. У тих випадках, коли аналітичний розв'язок визначення часу пуску ЕД занадто складний або неможливий, за якими методами його визначають? На основі якого рівняння ґрунтуються ці методи?
8. Яка послідовність розрахунку тривалості пуску ЕД графічним методом?
9. Яка послідовність розрахунку тривалості пуску ЕД графоаналітичним методом?
10. Які ЕД, можна вважати, мають лінійну механічну характеристику?

## Лекція 8

### Енергетика електропривода

#### План лекції

1. Основні енергетичні показники роботи електропривода
2. Втрати потужності, ККД і коефіцієнт потужності в нерегульованому електроприводі при роботі в усталеному режимі.
3. Втрати потужності в регульованому електро-приводі при роботі в усталеному режимі.

#### 1. Основні енергетичні показники роботи електропривода



До основних енергетичних показників роботи ЕП належать втрати потужності та енергії, коефіцієнт корисної дії (ККД)  $\eta$  і коефіцієнт потужності  $\cos\varphi$ . В ЕП із перетворювачами на основі напівпровідникових приладів (наприклад, вентильний регульований ЕП) суттєвим показником є коефіцієнт спотворення  $K_c$ , який характеризує ступінь відхилення струму і напруги від синусоїдної форми і дорівнює відношенню діючого значення першої гармоніки струму до діючого значення несинусоїдного струму, тобто  $K_c = I_1/I$ .

Енергетичні показники ЕП суттєво залежать від режиму його роботи, характеру зміни моменту навантаження і способів регулювання координат. Зазвичай енергетичні показники нерегульованого і регульованого ЕП визначають окремо при їх роботі в усталеному і перехідному режимах.

Потужність  $P_1$ , споживана електроприводом з мережі, витрачається на реалізацію руху ВОРМ  $P_m = M_m \cdot \omega_m$ , зміну запасу кінетичної і потенціальної енергії в механічній частині ЕП, зміну запасу ЕЕ в ємностях та індуктивностях електричної частини, розсіювання у вигляді теплоти. У теплоту перетворюються втрати в обмотках електричного й електромеханічного перетворювачів і керуючих пристроїв; пов'язані з перемагнічуванням сталі, в ємностях, на тертя у механічній частині.

Економічність роботи ЕП у будь-якому режимі характеризується відношенням виконаної механічної роботи до кількості електроенергії, спожитої з мережі:

$$\eta_u = \frac{A_{mex}}{A_{en}} = \frac{\int_0^{T_u} M_m(t) \omega_m(t) dt}{\int_0^{T_u} P dt}, \quad (6.1)$$

де  $\eta_u$  - цикловий ККД ЕП;  $T_u$  - тривалість робочого циклу;  $A_{mex}$ ,  $A_{en}$  - корисна механічна робота і споживана з мережі електрична енергія;  $P_1$  - потужність споживана ЕП з мережі.

Беручи для окремих відрізків часу сталу потужність, замість формули (6.1.), одержимо:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (6.2)$$

При відомих значеннях ККД перетворювача ЕЕ  $\eta_{n.ел}$ , двигуна  $\eta_{дв}$  і механічних передач  $\eta_{мех}$ , вираз (6.2) буде мати такий вигляд:

$$\eta = \eta_{n.ел} \cdot \eta_{дв} \cdot \eta_{мех}. \quad (6.3)$$

В ЕП змінного струму з'являється реактивна складова струму, яка не бере безпосередньої участі у створенні активної потужності, а сприяє нагріванню ЕД. Так якщо втрати під час передачі потужності постійним струмом  $\Delta P_{n.c.}$ , то при передачі тієї самої потужності змінним струмом, враховуючи  $\cos\varphi$  ЕД, втрати її будуть:

$$\Delta P_{з.с.} = \frac{\Delta P_{n.c.}}{\cos^2\varphi}. \quad (6.4)$$

Економічність споживання активної потужності приводів із тиристорними перетворювачами характеризується коефіцієнтом потужності

$$K_n = K_c \cos\varphi_1, \quad (6.5)$$

де  $\varphi_1$  – кут зсуву першої гармоніки струму.

## 2. Втрати потужності, ККД і коефіцієнт потужності в нерегульованому електроприводі при роботі в установлених режимах.

Потужність втрат у нерегульованому ЕП складається з потужності втрат у двигуні і механічній частині. Втрати потужності в механічній передачі  $\Delta P_{\text{мех}}$  зумовлені, в основному, тертям у рухомих частинах. Ці втрати оцінюються величиною ККД, значення якого для різних видів передач і при різних навантаженнях є в довідковій літературі.

Втрати потужності у двигуні є сумою постійних  $\Delta P_c$  і змінних  $\Delta P_v$  втрат:

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_v \quad (6.6)$$

Під постійними втратами потужності розуміють втрати потужності, що не залежать від струму двигуна. До них належать втрати в сталі магнітопровода, на тертя в підшипниках, вентиляційні, в провідниках обмоток збудження ДПС та синхронних двигунів.

Під змінними втратами розуміють такі, які виникають у провідниках обмоток двигуна під час протікання по них струму навантаження.

Змінні втрати потужності у двигунах постійного струму можна подати у вигляді:

$$\Delta P_v = I^2 R_{\text{об}} = I_{\text{ном}}^2 R_{\text{об}} \left( \frac{I}{I_{\text{ном}}} \right)^2 = \Delta P_{v.\text{ном}} \left( \frac{I}{I_{\text{ном}}} \right)^2 = \Delta P_{v.\text{ном}} K_z^2, \quad (6.7)$$

де  $K_z$  – коефіцієнт завантаження двигуна;  $\Delta P_{v.\text{ном}} = I_{\text{ном}}^2 \cdot R_{\text{об}}$  – втрати потужності в колі якоря при номінальному навантаженні;  $I_n$  – номінальний струм двигуна;  $R_{\text{об}}$  – внутрішній опір кола якоря.

Змінні втрати в трифазних асинхронних двигунах:

$$\Delta P_v = 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2' = 3I_{2.\text{ном}}'^2 \left( R_2' + \frac{R_1}{\sigma_{2.\text{ном}}^2} \right) \left( \frac{I_2'}{I_{2.\text{ном}}'} \right)^2 = \Delta P_{v.\text{ном}} K_z^2, \quad (6.8)$$

де  $\Delta P_{v.\text{ном}} = 3I_{2.\text{ном}}'^2 \left( R_2' + \frac{R_1}{\sigma^2} \right)$  – номінальні змінні втрати потужності;

$$\sigma_{\text{ном}} = \frac{I_{2.\text{ном}}'}{I_{1.\text{ном}}} \approx 0,85 \dots 0,95, \quad \sigma = \frac{I_2'}{I_1} \text{ – номінальна і поточна кратності зведеного струму}$$

ротора і статора. Орієнтовні значення  $\sigma$  залежно від ковзання знаходять за кривими рис. 6.1.

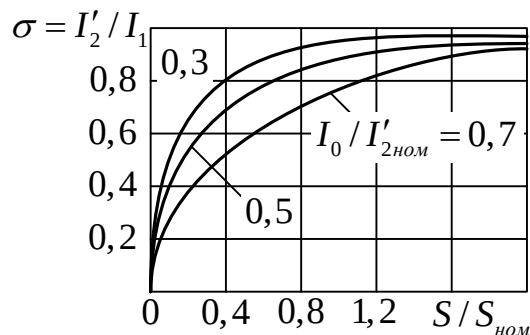


Рис.6.1. Залежність відношення зведеного струму ротора і статора АД від ковзання при різних кратностях струму холостого ходу

Змінні втрати потужності у синхронних двигунах становлять:

$$\Delta P_v = 3I_1^2 R_1 = 3I_{ном}^2 R_1 \left( \frac{I_1}{I_{ном}} \right)^2 = \Delta P_{v.ном} \left( \frac{I_1}{I_{ном}} \right)^2 = \Delta P_{v.ном} K_3^2. \quad (6.9)$$

Таким чином, змінні втрати потужності двигунів різних типів, як це видно із рівнянь (6.7, 6.8, 6.9), визначаються за однаковим виразом:

$$\Delta P_v = \Delta P_{v.ном} K_3^2. \quad (6.10)$$

Повні втрати потужності в двигуні:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_c + \Delta P_{v.ном} K_3^2 = \\ &= \Delta P_{v.ном} \left( \frac{\Delta P_c}{\Delta P_{v.ном}} + K_3^2 \right) = \Delta P_{v.ном} (\alpha + K_3^2), \end{aligned} \quad (6.11)$$

де  $\alpha = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_{v.ном}}$  – коефіцієнт втрат. Величина  $\alpha$  залежить від номінальної потужності та кутової швидкості і для ДПС НЗ знаходиться в межах 1...1,5; для АД з КЗР  $\alpha = 0,5...0,9$ .

Втрати потужності під час роботи двигуна в номінальному режимі, коли  $K_3 = 1$ , знаходять за паспортними даними двигуна:

$$\Delta P_{ном} = P_{ном} \frac{1 - \eta_{ном}}{\eta_{ном}}. \quad (6.12)$$

Втрати потужності при холостому ході:

$$\Delta P_o = \Delta P_{ном} \frac{\alpha}{(\alpha + 1)} = \frac{P_{ном} \alpha (1 - \eta_{ном})}{\eta_{ном} (\alpha + 1)}. \quad (6.13)$$

Постійні втрати потужності:

$$\Delta P_c = \Delta P_{ном} - \Delta P_{v.ном}. \quad (6.14)$$

Повні втрати потужності при  $i$ -тому навантаженні двигуна

$$\Delta P_i = P_i \cdot \frac{1 - \eta_i}{\eta_i}, \quad (6.15)$$

де  $\eta_i$  – ККД електродвигуна при навантаженні  $P_i$ .

Враховуючи, що під час роботи на природній характеристиці  $K_3 = \frac{I}{I_n} \approx \frac{P}{P_n}$ , то з урахуванням (6.11) ККД двигуна знайдемо:

$$\eta_{\partial в} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\partial в}} = \frac{K_3}{K_3 + \frac{\Delta P_{v.ном}}{P_{ном}} (\alpha + K_3^2)}. \quad (6.16)$$

У номінальному режимі  $K_3 = 1$  і вираз (6.16) буде:

$$\eta_{ном} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P_{в.ном}}{P_{ном}}(\alpha + 1)}. \quad (6.17)$$

6.13. Якщо за допомогою виразу (6.6) виключити з рівняння (6.17)  $P_{ном}$ , то одержимо ККД у загальній формі, де параметрами будуть  $\alpha$  і  $\eta_{ном}$ :

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \frac{1 - \eta_{ном}}{\eta_{ном}} \cdot \frac{\frac{\alpha}{K_3} + K_3}{\alpha + 1}}. \quad (6.18)$$

Залежність ККД від коефіцієнта завантаження має максимум при

$$K_{3\text{ опт}} = \sqrt{\alpha}. \quad (6.19)$$

6.14. Максимальне значення ККД двигуна:

$$\eta_{\max} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P_{в.ном}}{\sqrt{\alpha} P_{ном}}}. \quad (6.20)$$

Наприклад, якщо  $\alpha = 1$ , то ККД буде максимальним при  $K_3 = 1$ , що відповідає повному навантаженню. Якщо  $\alpha = 0,5$ , то  $K_3 = \sqrt{0,5} = 0,71$ , і відповідно крива ККД. буде мати максимум при навантаженні двигуна, що дорівнює 71% від номінального. З аналізу виразу (6.19) витікає, що максимальне значення ККД відповідає навантаженню, при якому змінні і постійні втрати однакові.

У довідниках та каталогах на АД наводять залежності  $\eta = f(K_3)$  і  $\cos\varphi = \psi(K_3)$

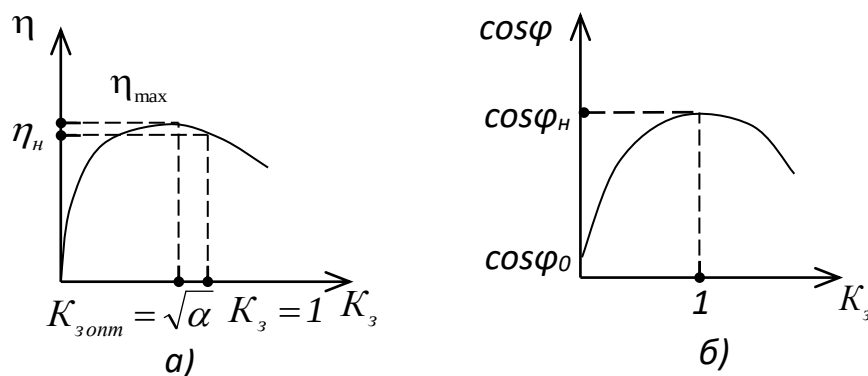


Рис.6.2. Залежності ККД (а) і  $\cos\varphi$  (б) від кратності навантаження двигуна

На рис. 6.2. представлені залежності ККД (а) і  $\cos\varphi$  (б) від коефіцієнта завантаження двигуна.

З викладеного видно, що для кращого використання ЕЕ, зведення до мінімуму її втрат, досягнення максимального значення ККД двигуна в усталених режимах ЕП, кутова швидкість

яких не регулюється, необхідно забезпечити номінальне навантаження та обмежити тривалість холостого ходу двигуна.

При наявності малозавантажених двигунів доцільно провести їх заміну на двигуни менших габаритів, потужність яких відповідає реальній потужності навантаження.

Розрахунки показують, що коли середнє навантаження двигуна складає менше 45% його номінальної потужності, то заміна цього двигуна менш потужним завжди доцільна. При навантаженні двигунів більше 70% номінальної потужності їх заміна взагалі не доцільна. Коли двигуни навантажені в межах 45...70% доцільність їх заміни повинна бути визначена додатковими розрахунками.

Для електродвигунів змінного струму  $\cos\varphi$  є важливим енергетичним показником, який залежить від навантаження на валу двигуна і показує, яка частина повної електричної потужності, що надходить з мережі, перетворюється на активну потужність. Характер зміни цієї залежності показано на рис.6.2,б. При відсутності навантаження ( $P_m = 0$ ) двигун споживає незначну активну потужність, яка практично дорівнює постійним втратам, і значну реактивну потужність, яка витрачається в основному на створення магнітного поля двигуна. У цьому випадку  $\cos\varphi$  має невелике значення. Якщо навантаження збільшується, споживання реактивної потужності змінюється мало і тоді підвищується  $\cos\varphi$ . Подальше збільшення навантаження призводить до росту споживання реактивної потужності за рахунок потоків розсіювання, що призводить до зменшення  $\cos\varphi$ .

Для поліпшення енергетичних показників ЕП змінного струму шляхом підвищення їх коефіцієнта потужності можуть бути здійснені наступні заходи: заміна малозавантажених електродвигунів двигунами меншої потужності; обмеження холостого ходу АД шляхом автоматизації процесу навантаження РМ; заміна асинхронних двигунів синхронними, коли це економічно виправдано; використання СД або компенсуючих конденсаторів.

### **3. Втрати потужності в регульованому електро-приводі при роботі в усталеному режимі.**

Визначення енергетичних показників роботи регульованих електроприводів є більш складною задачею, ніж нерегульованих. Факторами, які ускладнюють рішення цієї задачі, є:

1) зміна швидкості двигуна, яка призводить в загальному випадку до зміни постійних втрат потужності  $\Delta P_c$  у двигуні. Особливо суттєво змінюються постійні втрати при регулюванні струму збудження ДПС НЗ і СД;

2) наявність силового перетворювача в ЕП вимагає додаткових розрахунків з визначення втрат потужності і енергії в перетворювачах;

3) спотворення синусоїдної форми кривих струму і напруги мережі змінного струму регульованим ЕП постійного струму вимагає визначення коефіцієнта потужності  $\cos\varphi$  і коефіцієнта спотворення  $K_c$ ;

4) різноманітність способів регулювання двигунів, кожен з яких характеризується своїми енергетичними показниками.

Способи регулювання швидкості двигунів поділяються на економічні, яким відповідають незначні втрати, і неекономічні, пов'язані з суттєвими втратами потужності й енергії. До економічних способів належать, наприклад, частотне регулювання швидкості АД; регулювання швидкості АД в каскадних схемах, у яких частина втрат енергії повертається до мережі або після відповідного перетворення передається на вал двигуна; регулювання кутової швидкості ДПС НЗ за допомогою керованих перетворювачів. Найекономічнішими є системи, які забезпечують споживання з мережі стільки потужності, скільки її потрібно для приводу ВОРМ та на покриття втрат у двигуні і механізмі при тій чи іншій швидкості. Такі можливості мають системи з перетворювачами.

До неекономічних способів належить регулювання введенням опору в коло якоря або ротора. У цьому випадку, чим більший діапазон регулювання, тим більша частина споживаної з мережі потужності розсіюється на резисторах у вигляді теплоти. Неeкономічним є регулювання швидкості АД при несиметричній напрузі живлення.

**6.20. Регульований електропривод з ДПС НЗ.** Постійні втрати потужності ДПС НЗ складаються із втрат в колі збудження  $\Delta P_3$ , механічних  $\Delta P_m$  і втрат у сталі  $\Delta P_{ст}$ . Дві останні складові можуть бути визначені за наближеною формулою:

$$\Delta P_m + \Delta P_{ст} \approx (\Delta P_m + \Delta P_{ст})_{ном} \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2, \quad (6.21)$$

де  $(\Delta P_m + \Delta P_{ст})_{ном}$  – втрати механічні й у сталі при номінальній кутовій швидкості.

Змінні втрати в якірному колі ДПС

$$\Delta P_v = I^2 R_{\partial\partial} = M(\omega_{o.p} - \omega), \quad (6.22)$$

де  $\omega_{o.p}$  – швидкість ідеального холостого ходу двигуна при його роботі на штучній (регульовальній) характеристиці;  $R_{\partial\partial}$ ,  $I_y$  – відповідно опір і струм якірного кола;  $M$  – електромагнітний момент двигуна при кутовій швидкості  $\omega$ .

При регулюванні швидкості ДПС НЗ реостатним способом  $\omega_{o.p} = \omega_{о.ном}$ , тому змінні втрати потужності зростають пропорційно відносному перепаду швидкості  $\delta = \frac{\omega_{о.ном} - \omega}{\omega_{о.ном}}$ :

$$\Delta P_v = M \omega_{о.ном} \delta. \quad (6.23)$$

Повні втрати в якірному колі двигуна визначаються за формулою:

$$\Delta P_{\partial\partial} = \Delta P_3 + (\Delta P_m + \Delta P_{ст})_{ном} \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 + M(\omega_{o.p} - \omega), \quad (6.24)$$

де  $\Delta P_3$  - втрати потужності в колі збудження.

Постійні втрати при зниженні швидкості зменшуються. Зміна сумарних втрат при цьому визначається співвідношенням постійних і змінних втрат для реального навантаження і конкретного двигуна.

При регулюванні швидкості ослабленням поля збудження двигуна при  $P_m = const$  втрати в колі збудження  $\Delta P_3$  зменшуються внаслідок зменшення струму збудження. Разом з тим у результаті збільшення швидкості зростають механічні втрати  $\Delta P_m$ . Тому постійні втрати можна вважати незмінними, якщо  $\Delta P_3 \approx \Delta P_m$ . Крім того, коли  $P_m = const$ ,  $I_y = I_{y.ном} = const$ , то й змінні втрати залишаються незмінними при різних швидкостях. Отже,

$$\Delta P = \Delta P_{с.ном} + \Delta P_{v.ном} \approx const, \quad (6.25)$$

тобто при регулюванні з постійною потужністю втрати в двигуні незмінні.

При регулюванні швидкості ДПС НЗ зміною напруги на його якорі за допомогою керованого перетворювача необхідно визначати втрати потужності в двигуні і перетворювачі, а також коефіцієнти потужності і спотворення.

Постійні втрати  $\Delta P_c$  в статичному напівпровідниковому перетворювачі визначаються головним чином втратами в сталі силового трансформатора і реакторів. Ці втрати залишаються практично незмінними у всіх режимах роботи ЕП і дорівнюють номінальним:

$$\Delta P_{c,n} = \Delta P_{c,n,ном} = const, \quad (6.26)$$

Змінні втрати потужності в перетворювачі  $\Delta P_{v,n}$  визначаються втратами в міді обмоток силового трансформатора і реактора  $\Delta P_p$  та вентилях  $\Delta P_{вент}$ :

$$\Delta P_{v,n} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 + 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 + \Delta P_p + \Delta P_{вент}, \quad (6.27)$$

де  $I_1, I_2$  – первинний і вторинний струми трансформатора;  $R_1$  і  $R_2$  – активний опір первинної і вторинної обмоток трансформатора.

Вираз (6.27) після деяких перетворень можна записати у вигляді

$$\Delta P_{v,n} \approx (\Delta P_{к.з} + \Delta P_{p,ном}) \left( \frac{I}{I_{ном}} \right)^2 + \Delta P_{вент,ном} \frac{I}{I_{ном}}, \quad (6.28)$$

де  $\Delta P_{к.з}$  – втрати короткого замикання в трансформаторі;  $\Delta P_{p,ном}, \Delta P_{вент,ном}$  – втрати при номінальному струмі в реакторі і вентилях.

При регулюванні кутової швидкості ДПС зміною напруги при сталому моменті навантаження  $M_c = M_{ном}$  струм якоря залишається незмінним і дорівнює номінальному, разом з цим будуть незмінними і дорівнювати номінальним і змінні втрати, тобто  $\Delta P_v = \Delta P_{v,ном}$ . Постійні втрати потужності при даному способі регулювання визначаються за формулою (6.21).

Якщо регулювання швидкості ДПС здійснюється за умови рівності часу його роботи на кожній швидкості в діапазоні  $D$ , а також при однаковій різниці швидкостей на сусідніх регульовальних характеристиках, то ККД такого регулюючого циклу  $\eta_{p,ц}$  може бути визначений за формулою:

$$\eta_{p,ц} = \frac{\eta_{ном} \cdot (D+1)}{2 \cdot D}. \quad (6.29)$$

### Питання для самоконтролю.

1. Що відносять до основних енергетичних показників роботи ЕП? Від чого вони залежать?
2. Куди витрачається потужність  $P_1$ , споживана електроприводом з мережі?
3. Чим характеризується економічність роботи ЕП в будь-якому режимі?
4. Яке співвідношення між втратами потужності при передачі її постійним і змінним струмом?
5. Чим характеризується економічність споживання активної потужності приводів із тиристорними перетворювачами?
6. З потужності втрат яких елементів складається потужність втрат у нерегульованому ЕП? Чим зумовлені і як оцінюються потужності втрат у механічній частині ЕП?
7. Що розуміють під постійними і змінними втратами потужності?
8. У якому вигляді можна подати змінні втрати потужності у двигунах: постійного струму, у трифазних асинхронних двигунах і у синхронних двигунах? Яким однаковим виразом вони визначаються?

9. Як визначають повні втрати потужності у двигуні? Що означає коефіцієнт втрат потужності? У яких межах він знаходиться?

10. Як за паспортними даними двигуна визначити втрати потужності під час роботи його в номінальному режимі, коли  $K_s = 1$ ?

## Лекція 9

Втрати потужності, ККД і коефіцієнт потужності в нерегульованому електроприводі при роботі в усталеному режимі

### План лекції

**1.Втрати енергії в нерегульованому електро-приводі в перехідних режимах роботи і способи зниження цих витрат**

**2.Втрати енергії в двигунах постійного та змінного струму при роботі без навантаження ( $M_c = 0$ )**

**3.Втрати енергії при роботі з навантаженням**

**1.Втрати енергії в нерегульованому електро-приводі в перехідних режимах роботи і способи зниження цих витрат**

Визначення енергетичних показників роботи ЕП в перехідних режимах є не менш важливою задачею, ніж для усталеного режиму роботи. Визначається це перш за все тим, що у перехідних режимах струми в обмотках двигуна значно перевищують номінальні значення і спричиняють підвищення втрат енергії, чим суттєво впливають на нагрівання двигуна. Особливо важливе значення має визначення втрат електроенергії в перехідних режимах для ЕП, у яких динамічний режим є основним і вони практично не виходять із перехідних режимів. До таких приводів належать, наприклад, ЕП підйомних кранів, прокатних станів, стругальних верстатів тощо.

6.31. У загальному випадку втрати енергії за час перехідного процесу можуть бути визначені так:

$$\begin{aligned}\Delta A &= \int_0^t \Delta P dt = \int_0^t (\Delta P_c + \Delta P_v) dt = \\ &= \int_0^t \Delta P_c dt + \int_0^t \Delta P_v dt = \Delta A_c + \Delta A_v,\end{aligned}\tag{6.42}$$

де  $\Delta A_c$  і  $\Delta A_v$  — втрати енергії відповідно постійні і змінні.

Величина  $\Delta A_c$  легко визначається при незмінному значенні постійних втрат потужності  $\Delta P_c$  за час перехідного процесу  $t_{n,n}$ :

$$\Delta A_c = \int_0^t \Delta P_c dt = \Delta P_c t_{n,n}.\tag{6.43}$$

Складову втрат  $\Delta A_v$  можна визначити, використавши формули (6.7) – (6.9), у яких змінні втрати потужності виражені через електричні величини – струм і опір:

$$\Delta A_v = \int_0^{t_{n,n}} I^2(t) R dt = \int_0^t \Delta P_v dt.\tag{6.44}$$

При визначенні складових  $\Delta A_v$  за виразом (6.44) виникають труднощі, пов'язані з тим, що необхідно знати закони зміни струму і опору двигуна в перехідному процесі. Оскільки вказані



залежності не мають аналітичного виразу, то точне визначення інтегралу (6.44) неможливе. Більш зручним є визначення  $\Delta A_v$  у випадку, коли змінні втрати потужності  $\Delta P_v$  виражені через механічні величини.

## 2. Втрати енергії в двигунах постійного та змінного струму при роботі без навантаження ( $M_c = 0$ )

Втрати потужності в колі якоря (ротора) можна записати для ДПС НЗ:

$$\Delta P_{v2} = M \omega_0 - M \omega = M \omega_0 \delta, \quad (6.45)$$

де  $\delta = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$  – відносний статичний перепад швидкості;

$$\text{для АД: } \Delta P_{v2} = M \omega_0 - M \omega = M \omega_0 s, \quad (6.46)$$

де  $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$  – ковзання.

Втрати ЕЕ за час перехідного процесу відповідно з (6.44) визначаються:

$$\text{для ДПС НЗ: } \Delta A_{20} = \int_0^t \Delta P_{v2} dt = \int_0^{t_{n,n}} M \omega_0 \delta dt = \int_0^t (M \omega_0 - M \omega) dt \quad (6.47)$$

$$\text{АД} \quad \Delta A_{20} = \int_0^t \Delta P_{v2} dt = \int_0^{t_{n,n}} M \omega_0 s dt = \int_0^t (M \omega_0 - M \omega) dt. \quad (6.48)$$

Виключимо з виразу (6.47) і (48) час як змінну величину, скориставшись основним рівнянням руху  $M = M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}$ , звідки:

$$\text{для ДПС НЗ: } dt = J \frac{d\omega}{M} = -J \omega_0 d\delta / M. \quad (6.49)$$

$$\text{для АД: } dt = J \frac{d\omega}{M} = -J \omega_0 ds / M. \quad (6.50)$$

Тоді

$$\text{для ДПС НЗ: } \Delta A_{20} = \int_{\delta_{\text{поч}}}^{\delta_{\text{кін}}} -J \omega_0^2 \delta d\delta = J \frac{\omega_0^2}{2} (\delta_{\text{поч}}^2 - \delta_{\text{кін}}^2). \quad (6.51)$$

$$\text{для АД: } \Delta A_{20} = \int_{s_{\text{поч}}}^{\delta_{\text{кін}}} -J \omega_0^2 s ds = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{поч}}^2 - s_{\text{кін}}^2). \quad (6.52)$$

При  $t = 0$   $\delta = \delta_{\text{поч}}$  і  $s = s_{\text{поч}}$ , а при  $t = t_{n,n}$   $\delta = \delta_{\text{кін}}$  і  $s = s_{\text{кін}}$  у рівняннях (6.51) і (6.52). Рівняння (6.51) і (6.52) дають можливість знайти втрати енергії, якщо відомі момент інерції  $J$ , кутова швидкість ідеального холостого ходу (синхронна швидкість)  $\omega_0$ , та межі

регулювання  $\delta_{\text{поч}}$ ,  $\delta_{\text{кін}}$ ,  $s_{\text{поч}}$ ,  $s_{\text{кін}}$ . При користуванні ним не потребуються залежності зміни координат ЕП у функції часу. З виразів (6.51) і (6.52) видно, що втрати енергії в якорі (роторі) при перехідних процесах без навантаження не залежать від форми механічної характеристики і тривалості перехідного процесу. Втрати визначаються тільки запасом кінетичної енергії при кутовій швидкості  $\omega_0$  і границями зміни  $\delta(s)$ . Отже, втрати під час розгону двигуна при прямому вмиканні або при реостатному розгоні будуть однаковими.

**При пуску двигуна без навантаження** і при  $\omega_{\text{поч}} = 0$ ,  $\omega_{\text{кін}} \approx \omega_0$ ,  $\delta(s)_{\text{поч}} = 1$ ,  $\delta(s)_{\text{кін}} \approx 0$  втрати енергії будуть:

$$\Delta A_{20\text{ п}} = J \frac{\omega_0^2}{2}. \quad (6.53)$$

Отже, чисельно втрати енергії дорівнюють запасу кінетичної енергії у механічній частині ЕП в кінці пуску.

**Під час динамічного гальмування** буде аналогічний вираз і для втрат, коли вся кінетична енергія перетворюється в теплоту в якорному (роторному) колі двигуна. Для цього режиму  $\delta(s) = \frac{\omega}{\omega_0}$ , і тоді  $\delta(s)_{\text{поч}} = 1$ ,  $\delta(s)_{\text{кін}} = 0$ .

$$\Delta A_{20\text{ п}} = \Delta A_{20\text{ д.г.}} = J \frac{\omega_0^2}{2} \quad (6.54)$$

**При гальмуванні противмиканням**  $\omega_{\text{поч}} = -\omega_0$ ,  $\omega_{\text{кін}} = 0$ . Тоді  $\delta(s)_{\text{поч}} = 2$ ,  $\delta(s)_{\text{кін}} = 1$ , і втрати будуть

$$\Delta A_{20\text{ п.в.}} = 3J \frac{\omega_0^2}{2}. \quad (6.55)$$

Тому втрати енергії під час гальмування противмиканням утричі більші, ніж втрати під час розгону і динамічного гальмування.

**При реверсуванні**  $\omega_{\text{поч}} = -\omega_0$ ,  $\omega_{\text{кін}} \approx \omega_0$ , тоді  $\delta(s)_{\text{поч}} = 2$ ,  $\delta(s)_{\text{кін}} \approx 0$ , і втрати енергії становитимуть

$$\Delta A_{20\text{ р}} = 4J \frac{\omega_0^2}{2} \quad (6.56)$$

У цьому випадку втрати дорівнюють сумі втрат при гальмуванні противмиканням і при розгоні.

Залежності (6.53-6.56) описують повні втрати у двигунах постійного струму незалежного збудження, тобто  $\Delta A_{20} = \Delta A_v$ .

Втрати енергії в колі ротора двигунів змінного струму визначаються аналогічно втратам енергії в колі якоря ДПС НЗ.

Повні втрати енергії в асинхронному двигуні крім  $\Delta A_{20}$  включають також і втрати в обмотці статора  $\Delta A_{10}$ . Останні можна виразити так:

$$\Delta A_{10} = \Delta A_{20} \frac{R_1}{R_2}. \quad (6.57)$$

Повні втрати енергії в асинхронному двигуні

$$\Delta A_{v0} = J \frac{\omega_0^2}{2} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) (s_{noch}^2 - s_{кин}^2). \quad (6.58)$$

### 3. Втрати енергії при роботі з навантаженням ( $M_c \neq 0$ )

Для визначення втрат енергії при наявності навантаження  $M_c \neq 0$  використаємо формули (6.45-6.48), у яких момент двигуна подано через статичний момент навантаження  $M_c$  і динамічний момент:

$$\begin{aligned} \Delta A_{2ном} &= \int_0^t M (\omega_0 - \omega) dt = \int_0^t \left( M_c + J \frac{d\omega}{dt} \right) (\omega_0 - \omega) dt = \\ &= \int_0^t M_c (\omega_0 - \omega) dt + \int_{\omega_{noch}}^{\omega_{кин}} J (\omega_0 - \omega) d\omega = \\ &= \int_0^{t_{n,n}} M_c (\omega_0 - \omega) dt + J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{noch}^2 - s_{кин}^2). \end{aligned} \quad (6.59)$$

Труднощі, які виникають під час розв'язування рівняння (6.59), пов'язані з тим, що  $M_c$  і швидкість  $\omega$  можуть бути нелінійними функціями часу. Якщо  $M = const$ , то рівняння (6.55) набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \Delta A_{2н} &= \frac{J\omega_0^2 (s_{noch}^2 - s_{кин}^2)}{2} + M_c \omega_0 t_{n,n} - M_c \int_0^{t_{n,n}} \omega dt = \\ &= \Delta A_{20} + M_c \omega_0 t_{n,n} - M_c \int_0^{t_{n,n}} \omega dt. \end{aligned} \quad (6.60)$$

Перший член правої частини виразу (6.60) являє собою втрати енергії при  $M_c = 0$ , а другий і третій члени визначають втрати енергії, спричинені наявністю моменту навантаження  $M_c$ . Для визначення  $\Delta A_{2н}$  необхідні аналітичні вирази для  $\omega(t)$ . Якщо такого виразу немає або він складний, то можливе використання графоаналітичного методу.

Для наближених розрахунків вважають, що момент двигуна в перехідному процесі залишається постійним і рівним середньому значенню  $M = M_{сер} = const$ . Тоді, скориставшись виразом (6.49), запишемо:

$$dt = -J \frac{ds}{M_{сер} \pm M_c}, \quad (6.61)$$

де мінус відповідає пуску двигуна, а плюс – гальмуванню. Якщо вираз (6.61) підставити в рівняння (6.48), одночасно змінюючи межі інтегрування, то одержимо:

$$\Delta A_{2ном} = \int_{s_{поч}}^{s_{кін}} - \frac{M_{сер} J \omega_0^2 s ds}{M_{сер} \pm M_c} = \frac{M_{сер}}{M_{сер} \pm M_c} J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{поч}^2 - s_{кін}^2) =$$

$$= \frac{M_{сер}}{M_{сер} \pm M_c} \Delta A_{20}. \quad (6.62)$$

Для визначення повних втрат у АД можна використовувати такі вирази:

$$\Delta A_{1ном} = \Delta A_{2ном} \frac{R_1}{R'_2}, \quad (6.63)$$

$$\Delta A_{ном} = \Delta A_{1ном} + \Delta A_{2ном} \quad (6.64)$$

Із виразу (6.62) видно, що втрати енергії в двигуні, який працює з реактивним навантаженням, порівняно з роботою вхолосту збільшуються при розгоні і зменшуються при гальмуванні. Це пояснюється тим, що при гальмуванні частина кінетичної енергії витрачається на подолання моменту навантаження.

Визначення шляхів зниження втрат електроенергії у перехідних процесах має важливе значення, особливо для ЕП, у яких перехідні процеси складають суттєву частину загального циклу їх роботи.

Аналізуючи одержані вирази і, зокрема (6.52), можна визначити два основних напрямки зменшення втрат електроенергії у перехідних процесах: 1) зменшення сумарного моменту інерції  $J$  механічної частини ЕП; 2) регулювання в перехідному процесі швидкості ідеального холостого ходу. Зменшення  $J$  досягається використанням малоінерційних двигунів або використанням двох двигунів половинної потужності замість одного. Останнє можливо тому, що потужність двигуна пропорційна квадрату діаметра якоря (ротора), а момент інерції – четвертому ступеню.

Рациональне використання механічної передачі, пов'язане з вибором відповідних форм елементів, конструкційних матеріалів і оптимального передаточного числа редуктора, також призводить до зниження моменту інерції.

У використанні АД із перемиканням числа пар полюсів втрати енергії зменшуються при організації пуску та гальмуванні шляхом переходу з однієї характеристики на іншу. Так, при розгоні вхолосту до швидкості  $\omega_{01}$  (рис.6.3) за характеристикою 1, яка відповідає числу пар полюсів  $p_1$ , втрати енергії при прямому пуску відповідно до виразу (6.50) та з урахуванням того, що  $s_{поч} = 1$ ,  $s_{кін} = 0$ , будуть:

$$\Delta A_{2np} = J \frac{\omega_{01}^2}{2} (s_{поч}^2 - s_{кін}^2) = J \frac{\omega_{01}^2}{2}. \quad (6.65)$$

Втрати при пуску у два ступені будуть:

а) пуск за характеристикою 2 ( $p_2 = 2 \cdot p_1$ ) від  $s_{поч} = 1$  до  $s_{кін} = 0$  при  $\omega_{02} = 0,5\omega_{01}$ :

$$\Delta A_{2ст.1} = J \frac{\omega_{02}^2}{2} (s_{поч}^2 - s_{кін}^2) = J \frac{\omega_{01}^2}{8}, \quad (6.66)$$

б) пуск за характеристикою 1, від  $s_{поч} = 0,5$  до  $s_{кін} = 0$  при  $\omega_{01}$ :

$$\Delta A_{2ст.2} = J \frac{\omega_{01}^2}{2} (s_{поч}^2 - s_{кін}^2) = J \frac{\omega_{01}^2}{8}. \quad (6.67)$$

Сумарні втрати при розгоні у два ступені:

$$\Delta A_{2cm} = \Delta A_{2cm.1} + \Delta A_{2cm.2} = J \frac{\omega_{01}^2}{4} \quad (6.68)$$

Отже, в результаті зміни  $\omega_0$  в перехідному процесі втрати зменшились удвоє. Зниження втрат у роторі викликає зменшення втрат і в статорі двигуна.

Ефект зменшення втрат енергії досягається також при організації гальмування у два етапи:  
1) послідовним переходом з характеристики 1, яка відповідає меншому числу полюсів  $p_1$ , на характеристику 2 ( $p_2 = 2 p_1$ ) рис.6.3. При цьому вдвічі зменшується синхронна швидкість і двигун переходить в режим рекуперативного гальмування з віддачею енергії в мережу ( $s_{noch} = -1, s_{кин} = 0$ ):

$$\Delta A_{2cm.1} = J \frac{\omega_0^2}{2} \cdot (s_{кин}^2 - s_{noch}^2) = J \frac{\omega_{02}^2}{2} = J \frac{\omega_{01}^2}{8}, \quad (6.69)$$

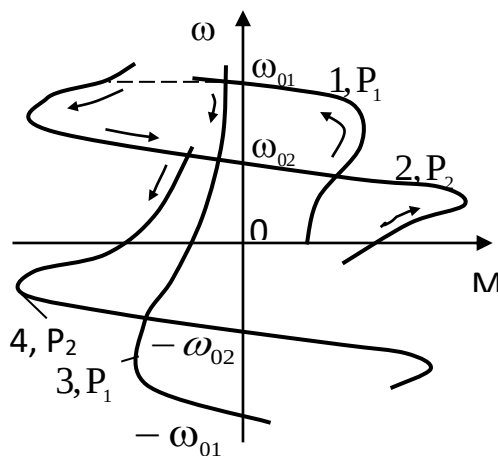


Рис.6.3. До визначення втрат енергії при перехідних процесах у двошвидкісному АД.

2) Після досягнення швидкості  $\omega_{02}$  зміною послідовності чергування фаз двигун переводять в режим гальмування противмиканням при  $s_{noch} = 2, s_{кин} = 1, \omega_{02} = \frac{\omega_{01}}{2}$ . Втрати енергії при цьому

$$\Delta A_{2cm.2} = J \frac{\omega_{02}^2}{2} \cdot (s_{кин}^2 - s_{noch}^2) = 3 J \frac{\omega_{02}^2}{2} = 3 J \frac{\omega_{01}^2}{8}. \quad (6.70)$$

Сумарні втрати при ступінчастому гальмуванні

$$\Delta A_{2cm} = \Delta A_{2cm.1} + \Delta A_{2cm.2} = J \frac{\omega_{01}^2}{2} \quad (6.71)$$

Отже, при ступінчастому гальмуванні зі зниженням  $\omega_0$  втрати становлять тільки третю частину втрат при прямому гальмуванні.

#### Питання для самоконтролю.

1. Які фактори ускладнюють визначення енергетичних показників роботи регульованих електроприводів?
2. За якими умовами способи регулювання швидкості двигунів поділяються на економічні та неекономічні? Яке регулювання до них належить?

3. Які складові становлять постійні втрати потужності ДПС НЗ? Які з них можуть бути визначені за наближеною формулою?

4 Як визначаються повні втрати потужності в якірному колі двигуна?

5. Як змінюються постійні втрати при зниженні швидкості? Як при цьому визначається зміна сумарних втрат для реального навантаження і конкретного двигуна?

6. Чому при регулюванні швидкості ослабленням поля збудження двигуна при  $P_m = const$  постійні і змінні втрати потужності можна вважати незмінними при різних швидкостях?

7. Як визначати втрати потужності в двигуні і перетворювачі при регулюванні швидкості ДПС НЗ зміною напруги на його якорі за допомогою керованого перетворювача? За якою формулою може бути визначений ККД регулюючого циклу  $\eta_{p.c}$ ?

8. Які втрати в АД відносяться до постійних втрат потужності у регульованому електроприводі з асинхронним електродвигуном? Як отримати загальний вираз для сумарних втрат у сталі АД? [1,с.261].

9. Коли при реостатному регулюванні швидкості АД з фазним ротором постійні втрати можна вважати незмінними і рівними номінальним втратам?

10. Яким виразом визначаються змінні втрати потужності при реостатному регулюванні швидкості АД? При якій швидкості величина втрат потужності має максимальне значення, якщо при вентиляторному характері навантаження момент залежить від швидкості?

## Лекція 10

### Шляхи енергозбереження в електроприводі

#### План лекції

**1.Втрати потужності та енергії в регульованому електроприводі у перехідних процесах і способи зниження цих втрат**

**2.Енергозбереження в електроприводі**

**1.Втрати потужності та енергії в регульованому електроприводі у перехідних процесах і способи зниження цих втрат**

До основної системи регульованого електропривода змінного і постійного струму відносяться системи “керований випрямляч –двигун постійного струму” ( $\Pi - Д$ ) і “перетворювач частоти – асинхронний двигун” ( $\Pi Ч - АД$ ).

Важливою особливістю роботи системи  $\Pi - Д$  є можливість суттєво скоротити втрати енергії в перехідних процесах. Цього можна досягти шляхом плавної зміни в перехідних процесах швидкості ідеального холостого ходу двигуна, що досягається відповідною зміною напруги або частоти за допомогою керованого перетворювача. Проте наявність перетворювача у системі електропривода викликає втрати в самому перетворювачі, зміну  $\cos\phi$  і коефіцієнта спотворення форми струму.

Розглянемо втрати енергії в перехідних процесах у системі  $\Pi - Д$  при лінійній зміні в часі ЕРС перетворювача і відповідно швидкості ідеального холостого ходу при розгоні вхолосту. Розгін поділимо на два етапи. На першому  $0 < t < t_{n.o.}$  швидкість ідеального холостого ходу змінюється за лінійним законом (рис.6.4)

$$\omega_o = \varepsilon \cdot t + \omega_{o.ноч}, \quad (6.72)$$

де  $\varepsilon = d\omega_o(t) / dt$  – темп (похідна) зміни швидкості  $\omega_o$

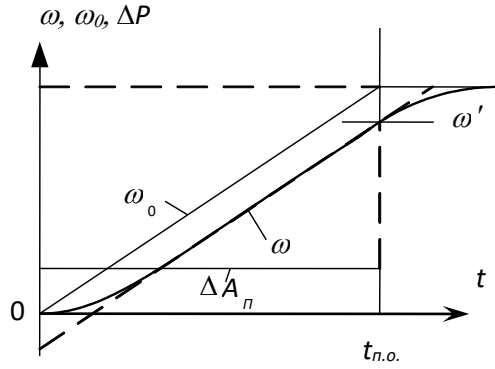


Рис. 6.4. Графіки  $\omega(t)$ ,  $\omega_0(t)$  і втрат при розгоні вхолосту двигуна у системі П-Д

Швидкість якоря і момент при пуску з нульовими початковими умовами і  $M_c = 0$  ( $\omega_{\text{онно}} = \omega_{\text{ноч}} = 0$ ) для першого етапу перехідного процесу запишуться відповідно рівняннями (6.73) і (6.74):

$$\omega(t) = \varepsilon_o(t) - T_M \cdot \varepsilon_o \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}\right) \quad (6.73)$$

$$M = M_o \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}\right). \quad (6.74)$$

На другому етапі при  $t > t_{n.o.}$   $\omega_o = \text{const}$ , а кутова швидкість і момент описуються рівняннями:

$$\omega(t) = \omega_o + (\omega' - \omega_o) e^{-\frac{t-t_{n.o.}}{T_M}}; \quad (6.75)$$

$$M = M_o e^{-\frac{t-t_{n.o.}}{T_M}}, \quad (6.76)$$

де  $\omega'$  - початкове значення швидкості для другого етапу.

Взагалі  $T_M \ll t_{n.o.}$ , тому тривалість перехідного процесу визначається часом наростання напруги на якорі або частоти струму статора до усталеного значення. Тому в рівнянні (6.47) приймемо  $t_{n.n.} < t_{n.o.}$ . При лінійній залежності  $\omega(t)$  матимемо:

$$\left. \begin{aligned} \omega(t) &= \varepsilon_o t - T_M \varepsilon_o; & \omega_o - \omega &= T_M \varepsilon_o \\ M &= J \frac{d\omega}{dt} = J \varepsilon_o; & \varepsilon_o t_{n.o.} &= \omega_o \end{aligned} \right\} \quad (6.77)$$

Відповідно (6.47)

$$\Delta A_{20n.} = \int_0^{t_{n.o.}} J \varepsilon_o T_M dt, \quad (6.78)$$

або

$$\Delta A_{20n.} = J \frac{\omega_0^2}{2} \frac{2T_M}{t_{n.o.}}. \quad (6.79)$$

Порівнюючи (6.53) і (6.79), можна зробити висновок, що при  $t_{n.o.} \gg T_M$  втрати енергії при розгоні з лінійним наростанням напруги (частоти) значно менші, ніж при розгоні з незмінною напругою (частотою). Для зменшення втрат енергії в регульованих ЕП слід прагнути до зменшення відношення  $\frac{T_M}{t_{n.o.}}$ .

Невеликі втрати в перехідних процесах в системі генератор – двигун ( $\Gamma - Д$ ). Якщо на вхід системи  $\Gamma - Д$  сигнал керування подається ступінчасто, то швидкість ідеального ходу двигуна змінюється за експоненціальним законом. При пуску двигуна вхолосту ( $M_c = 0$ ) втрати в якірному колі визначаються за формулою:

$$\Delta A_{20n.} = \int_0^{t_{n.o.}} I_{\Gamma}^2 (R_{\Gamma.з.} + R_{\Gamma.дв.}) dt. \quad (6.80)$$

Підставивши у (6.80)  $i_{\Gamma}(t)$ , що дорівнює

$$I_{\Gamma}(t) = I_{\Gamma.з.} \left( e^{-\frac{t}{T_{\Gamma}}} - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) \frac{1}{m-1}, \quad (6.81)$$

де  $m = \frac{T_{\Gamma}}{T_M}$  – відношення сталої часу обмотки збудження генератора до електромеханічної сталої часу привода, після інтегрування одержимо:

$$\Delta A_{20n.} = J \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \frac{1}{m+1} \quad (6.82)$$

Звідси видно, що втрати енергії в ДПС НЗ у системі  $\Gamma - Д$  зменшуються в  $m+1$  разів порівняно з відповідними втратами при подачі на якір нерухомого двигуна повної напруги.

## 2. Енергозбереження в електроприводі

Абсолютна більшість ЕП сільськогосподарських машин нерегульовані, а перетворювачем ЕЕ в МЕ в основному є АД з короткозамкненим ротором. Тому перший шлях енергозбереження на стадії проектування – удосконалення алгоритмів вибору ЕД для конкретних установок. ЕД заниженої потужності швидко виходить з ладу, ЕД завищеної потужності неефективно перетворює ЕЕ, має високі питомі втрати потужності, в самому ЕД низький ККД і в мережі живлення (низький  $\cos \phi$ ). Розв'язання задачі вибору ЕД не завжди елементарне, тому помилка при виборі ЕД може призвести до значних збитків, підвищення економічності масового нерегульованого ЕП

Другий шлях – перехід на енергозберігаючі двигуни, в яких за рахунок збільшення маси активних матеріалів (заліза і міді) підвищені номінальні значення ККД і  $\cos \phi$ .

Третій шлях забезпечення раціональних режимів роботи ЕП – створення спеціальних додаткових технічних засобів, що забезпечують у нерегульованому ЕП мінімізацію шкідливого



впливу на енергетичні показники відхилення навантаження від номінального. Ці технічні засоби – спеціальні регулятори ЕЕ, які вмикають між мережею і статором ЕД – крім функцій енергозбереження, виконують ще й інші, часто не менш важливі функції: керують режимами пуску і гальмування, іноді регулюють швидкість і момент, здійснюють захист, діагностику та інше, тобто підвищують технічний рівень ЕП в цілому, збільшують його надійність.

Четвертий шлях – виключення необґрунтованих режимів холостого ходу. Під холостим ходом у даному випадку розуміють роботу ЕД як при від'єднаному механізмі, так і при механізмі, що не виконує корисної роботи. Наприклад, корм для обробки не поступає в дробарку або на транспортер.

П'ятий шлях – перехід від нерегульованого ЕП до регульованого. Аналіз енергетичних характеристик елементів силового каналу ЕП показує, що принципово є два шляхи для зменшення енергоспоживання: за рахунок зниження втрат у силових перетворювачах ЕП і за рахунок регулювання технологічних показників РМ при зміні швидкості ЕП. Фактично і другий шлях приводить до зниження втрат енергії в РМ, яка шляхом регулювання швидкості точніше, з точки зору енергетичних витрат, пристосовується до вимог технологічного процесу. При переході до регульованого ЕП економія енергії часто досягається за рахунок того технологічного процесу, який привод обслуговує, причому економія інколи в багато разів перевищує власне споживання ЕП.

Існують і інші шляхи, такі як підвищення якості ремонту ЕД, використання перемикання обмоток ЕД з “трикутника на зірку”, застосування синхронних двигунів тощо.

#### **Питання для самоконтролю.**

1. Які основні шляхи енергозбереження в електроприводі?
2. Які формули використовують для визначення втрат енергії при наявності навантаження  $M_c \neq 0$ ?
3. Які труднощі виникають під час розв'язання одержаного рівняння? Який матиме вигляд рівняння при  $M = \text{const}$  і що визначають його складові?
4. Для наближених розрахунків вважають, що  $M = M_{\text{сер}} = \text{const}$ . Яке рівняння одержують, скориставшись рядом виразів?
5. Які вирази можна використовувати для визначення повних втрат у АД?
6. Чим пояснюється, що втрати енергії в двигуні, який працює з реактивним навантаженням порівняно з роботою вхолосту, збільшуються при розгоні і зменшуються при гальмуванні?
7. Чому визначення шляхів зниження втрат електроенергії у перехідних процесах має важливе значення? Які два основних напрямки зменшення втрат електроенергії у перехідних процесах можна визначити?

#### **Лекція 11**

##### **Визначення потужності електродвигунів.**

##### **План лекції**

**1. Класи нагрівостійкості ізоляції обмоток електродвигунів. Нагрівання та охолодження електродвигунів.**

**2. Класифікація номінальних режимів роботи електричних двигунів**

**1. Класи нагрівостійкості ізоляції обмоток електродвигунів. Нагрівання та охолодження електродвигунів.**

При створенні нових ЕП сільськогосподарських машин або їх модернізації в проектах вибирають такі серійні ЕД, які здатні забезпечити надійну та економічну роботу виконавчих органів робочих машин (ВОРМ). Їх паспортні дані (потужність, напруга, струм тощо) повинні бути близькими до розрахункових, а конструктивне виконання відповідало б способу розміщення в ЕП і умовам навколишнього середовища. Правильно вибраною потужністю ЕД слід вважати потужність, яка визначена в строгій відповідності до режиму роботи ВОРМ та очікуваного навантаження.

Завищення потужності ЕД проти необхідної для РМ веде до зростання габаритів, маси і вартості ЕП, а також до зниження його енергетичних показників: коефіцієнта корисної дії та

коефіцієнта потужності двигунів змінного струму. Зниження потужності ЕД призводить до зниження швидкості обертання (крім синхронних двигунів) при розрахунковому завантаженні РМ, при цьому знижується продуктивність РМ, а іноді – і якість отриманої продукції. Крім того, тривале перевантаження ЕД заниженої потужності викликає перегрівання ізоляції обмоток більше за допустиме, внаслідок цього відбувається інтенсивне старіння ізоляції і різко скорочується строк її служби. В електричних машинах використовують ізоляційні матеріали таких класів нагрівостійкості: А, Е, В, F, Н, С (табл.7.1).

Таблиця 7.1. Допустимі граничні температури нагрівання для ізоляційних матеріалів різних класів нагрівостійкості

| Клас нагрівостійкості ізоляції | Допустима гранична температура, °С | Короткий перелік основних груп ізоляційних матеріалів                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Y                              | 90                                 | Непросочені і незанурювані в рідкий електроізоляційний матеріал. Волоконні матеріали із целюлози, бавовни або натурального, штучного і синтетичного шовку, а також відповідні даному класу інші матеріали та інші сполучення матеріалів. |
| A                              | 105                                | Волоконні матеріали з целюлози, бавовни або натурального, штучного і синтетичного шовку, просочені рідким електроізоляційним матеріалом                                                                                                  |
| E                              | 120                                | Синтетичні органічні матеріали (плівки, волокна, смоли, компаунди та ін.)                                                                                                                                                                |
| B                              | 130                                | Матеріали на основі слюди (у тому числі на органічних підкладках), азбесту і скловолкна, що застосовуються з органічними зв'язуючими і просочуючими сполуками                                                                            |
| F                              | 155                                | Матеріали на основі слюди, азбесту і скловолкна, що застосовуються, із синтетичними зв'язуючими і просочуючими сполуками, які відповідають даному класові нагрівостійкості                                                               |
|                                |                                    | продовження таблиці 7.1                                                                                                                                                                                                                  |
| H                              | 180                                | Матеріали на основі слюди, азбесту і скловолкна у сполученні з кремнійорганічними зв'язуючими і просочуючими сполуками, кремнійорганічні еластomers                                                                                      |
| C<br>Вище<br>180 °С            | 200                                | Слюда, керамічні матеріали, скло, кварц або їх комбінації без зв'язуючих або з неорганічними та елементоорганічними сполуками                                                                                                            |
|                                | 220                                |                                                                                                                                                                                                                                          |
|                                | 250                                |                                                                                                                                                                                                                                          |

При виготовленні сучасних ЕД у більшості випадків застосовують ізоляції класів В, F і Н.

Нагрівання ЕД є наслідком втрати частини ЕЕ в ЕД при перетворенні її на механічну енергію. Дотримання встановлених обмежень за допустимою температурою нагрівання забезпечує нормативну тривалість служби електричної машини в межах 15-20 років. Допустимим тепловим режимом ЕД вважається такий режим роботи, при якому тривалість служби його ізоляції  $T_i$  не буде меншою за передбачуваний.

Тривалість служби ізоляції  $T_i$  суттєво залежить від температури нагрівання  $\Theta_i$ , тобто  $T_i = f(\Theta_i)$ , але ця залежність має нелінійний характер і може бути визначена як експонента:

$$T_i = K e^{-\Theta_i}, \quad (7.1)$$

де  $K$  – константа;  $f(\Theta_i)$  – залежність, яка визначається класом ізоляції.

При тривалому режимі роботи ЕД зі сталим навантаженням визначення тривалості служби ізоляції не викликає особливих труднощів.

Якщо періоди нагрівання ізоляції змінюються періодами охолодження і ці процеси мають різну інтенсивність, визначення тривалості строків служби ізоляції ускладнюється. Якщо коливання температури незначні, то можлива лінеалізація кривих нагрівання навколо точки середньої температури. У такому випадку при розрахунку старіння ізоляції виходять із цього середнього значення. Температура певної частини ЕД залежить не тільки від навантаження (втрат потужності), а й від температури охолоджувального середовища. Найчастіше це повітря.

У реальних умовах роботи електродвигунів температура охолоджувального повітря змінюється в широких межах. Стандартом встановлена допустима гранична температура охолоджувального повітря  $+40^\circ\text{C}$ . У зв'язку з цим поряд із допустимою температурою  $\Theta_{\text{доп.}}$  нагрівання елементів ЕД прийнято вказувати допустиме перевищення температури  $\tau_{\text{доп.}}$  над температурою охолоджувального середовища, яка визначається різницею  $\tau_{\text{доп.}} = \Theta_{\text{доп.}} - \Theta_{\text{с.}}$

Дослідження процесів нагрівання та охолодження ЕД являє собою дуже складну задачу, оскільки двигун складається з деталей і вузлів різної конфігурації, виготовлених із різних матеріалів, які мають різні теплоємності і теплопередачі.

Неоднаковими є умови нагрівання окремих частин двигуна, а напрямок теплових потоків залежить від режиму роботи ЕД. Наприклад, при холостому ході основна кількість теплоти виділяється у сталі статора, а при навантаженні – в обмотках ЕД.

При проектуванні і дослідженні теплових режимів ЕД їх часто розглядають у вигляді двоелементної моделі, одним з елементів якої є електрична обмотка, а другим - магнітопровід.

З метою спрощення дослідження процесів нагрівання та охолодження ЕД допускають:

- 1) двигун розглядається як однорідне тіло зі сталою теплоємністю  $C$ , яке має нескінченно велику теплопровідність і однакову температуру у всіх точках у будь-який момент часу;
- 2) тепловіддача в навколишнє середовище прямо пропорційна різниці температур ЕД і навколишнього середовища;
- 3) теплоємність навколишнього середовища нескінченно велика, тобто під час нагрівання ЕД її температура не змінюється;
- 4) теплоємність, потужність теплових втрат і коефіцієнт тепловіддачі двигуна не залежать від його температури.

Для визначення характеру процесу зміни температури ЕД розглянемо баланс теплової енергії  $\Delta P dt$ , яка виділяється у ЕД за елементарний проміжок часу  $dt$ . Одна частина цієї теплоти  $A \tau dt$  віддається в навколишнє середовище, а друга частина  $C d\tau$  витрачається на підвищення температури ЕД. Таким чином, рівняння теплового балансу має вигляд:

$$\Delta P dt = A \tau dt + C d\tau, \quad (7.2)$$

де  $\Delta P$  – втрати потужності в ЕД,  $\frac{D\tau}{c}$ ;  $A$  – тепловіддача ЕД, тобто кількість теплоти, що віддається в навколишнє середовище за  $1\text{с}$  при різниці температур ЕД і навколишнього

середовища в  $1^{\circ}C$ ,  $\frac{Дж}{с \cdot ^{\circ}C}$ ;  $\tau$  – перевищення температури ЕД над температурою охолоджувального середовища,  $^{\circ}C$ ;  $C$  – теплоємність ЕД,  $\frac{Дж}{^{\circ}C}$ ;  $d\tau$  – приріст температури ЕД,  $^{\circ}C$ , за нескінченно малий проміжок часу.

Розділимо рівняння (7.2) на  $A dt$ , одержимо:

$$\frac{\Delta P}{A} = \tau + \frac{C}{A} \frac{d\tau}{dt}. \quad (7.3)$$

Таким чином, теплові процеси в двигуні при прийнятих припущеннях описуються лінійним диференціальним рівнянням першого порядку.

Розв'яжемо рівняння (7.3) відносно  $dt$ :

$$dt = \frac{\frac{C}{A} d\tau}{\frac{\Delta P}{A} - \tau}. \quad (7.4)$$

Проінтегрувавши вираз (7.4), одержимо:

$$t = -\frac{C}{A} \ln\left(\frac{\Delta P}{A} - \tau\right) + K. \quad (7.5)$$

Стала інтегрування  $K$  знайдеться з початкових умов, коли  $t = 0$ :

$$K = \frac{C}{A} \ln\left(\frac{\Delta P}{A} - \tau_{поч}\right), \quad (7.6)$$

де  $\tau_{поч}$  – початкове перевищення температури ЕД над температурою охолоджуючого середовища,  $^{\circ}C$ .

Підставивши значення  $K$  із виразу (7.6) у рівняння (7.5), знайдемо:

$$t = -\frac{C}{A} \ln \frac{\frac{\Delta P}{A} - \tau}{\frac{\Delta P}{A} - \tau_{поч}}. \quad (7.7)$$

Пропотенціювавши, одержимо:

$$e^{-\frac{t}{T_H}} = \frac{\frac{\Delta P}{A} - \tau}{\frac{\Delta P}{A} - \tau_{поч}}. \quad (7.8)$$

Розв'язавши вираз (7.5) відносно  $\tau$ , одержимо рівняння нагрівання ЕД:

$$\tau = \frac{\Delta P}{A} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right) + \tau_{поч} e^{-\frac{t}{T_H}}, \quad (7.9)$$

де  $T_H$  - стала часу нагрівання ЕД, с.

Згідно з прийнятими допущеннями теплоємність  $C$  і тепловіддача  $A$  ЕД у процесі нагрівання залишаються незмінними. Отже, їх відношення є також незмінним, має розмірність часу і називається сталою часу нагрівання ЕД:

$$T_H = \frac{C}{A}. \quad (7.10)$$

Стандартом визначено, що сталою часу нагрівання ЕД називають час, протягом якого перевищення температури ЕД, який працює з постійним навантаженням і з віддачею теплоти в охолоджувальне середовище, змінюючись за експоненціальним законом, зростає від нуля до  $0,632\tau_y$ .

Фізичне значення сталої часу полягає в тому, що вона чисельно дорівнює умовному часу, за який ЕД нагрівся б від  $\tau_{поч} = 0$  до усталеної температури  $\tau_y$  при відсутності тепловіддачі в навколишнє середовище.

Аналізуючи рівняння (7.9), можна зробити висновок, що при сталих теплових втратах  $\Delta P$  процес нагрівання ЕД описується експоненціальним законом. На початку процесу, коли  $t = 0$ , початкове перевищення температури ЕД було  $\tau = \tau_{поч}$ , а за нескінченно тривалий час  $t = \infty$  настає теплова рівновага, тобто перевищення температури досягає деякого усталеного значення (рис.7.1):

$$\tau_y = \frac{\Delta P}{A}. \quad (7.11)$$

Після підстановки значення усталеної температури рівняння нагрівання ЕД записують так:

$$\tau = \tau_y \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right) + \tau_{поч} e^{-\frac{t}{T_H}} = (\tau_{поч} - \tau_y) e^{-\frac{t}{T_H}} + \tau_y. \quad (7.12)$$

Якщо на початку нагрівання ЕД його температура дорівнює температурі охолоджуючого середовища ( $\tau_{поч}=0$ ), то рівняння (7.12) має вигляд:

$$\tau = \tau_y \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right). \quad (7.13)$$

За рівняннями (7.12 і 7.13) побудовані криві 2 і 4 нагрівання ЕД (рис.7.1) відповідно для  $\tau_{поч} = 0$  і  $\tau_{поч} > 0$  при одному і тому ж навантаженні (однакових втратах потужності  $\Delta P$ ). Якщо навантаження ЕД зменшити, зменшаться і втрати потужності в ньому ( $\Delta P > \Delta P_1$ ), що призведе до зниження усталеного перевищення температури ( $\tau_{y1} < \tau_y$ ). Цьому випадку відповідає крива 1 за умови, що  $\tau_{поч}=0$ .

Крива 3 нагрівання ЕД побудована за даними, одержаними експериментально. Як видно з графіка, на початку процес нагрівання за даними експерименту інтенсивніший, ніж теоретично описаний експонентою. І тільки при  $\tau > (0,5...0,6)\tau_y$  експериментальна крива наближається до теоретичної.

Відповідно і стала часу реального процесу нагрівання ЕД не є сталою, а має найменше значення на початку процесу і найбільше - в кінці. Це пояснюється тим, що на відміну від

прийнятої моделі на початку процесу, завдяки тепловим опорам, температура тепловіддаючих поверхонь ЕД значно нижча, ніж температура гріючих поверхонь (мідь обмотки), а значить, і нижча його тепловіддавальна здатність. Тому на підвищення температури витрачається більша частина енергії, ніж це передбачається теоретично.

Рівняння (7.12) можна використати і для опису процесу охолодження вимкненого ЕД або при зменшенні його навантаження. Для цього потрібно лише підставити в нього відповідні значення  $\tau_{поч}$  і  $\tau_y$ . Якщо нагрітий ЕД вимкнено з мережі, то втрати потужності в ньому дорівнюють нулю ( $\Delta P = 0$ ) і згідно з виразом (7.11)  $\tau_y = 0$ . У цьому випадку процес охолодження характеризується кривою 1 (рис.7.2). При зменшенні навантаження усталена температура  $\tau_{y.o.}$  буде нижчою за початкову  $\tau_{n.o}$  і процес описуватиметься кривою 2.

Згідно з рівнянням (7.12) час зміни температури від початкового до усталеного значення нескінченно великий. Практично ж теплова рівновага настає за час  $t \approx (3...5)T_n$ , тобто коли перевищення температури досягне  $(0,95...0,99) \tau_y$ . Для ЕД малої потужності  $T_n$  становить десятки хвилин, для потужних ЕД – 2..3 години.

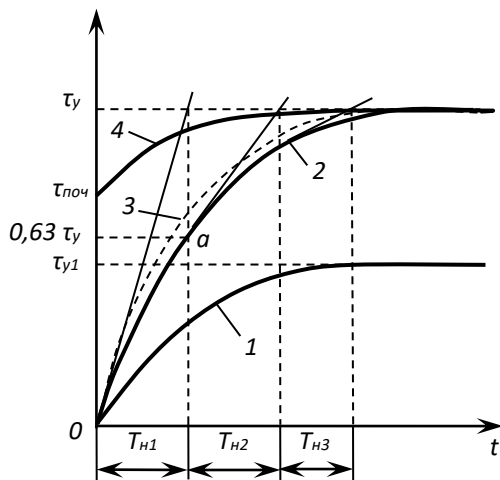


Рис. 7.1. Криві нагрівання електродвигуна

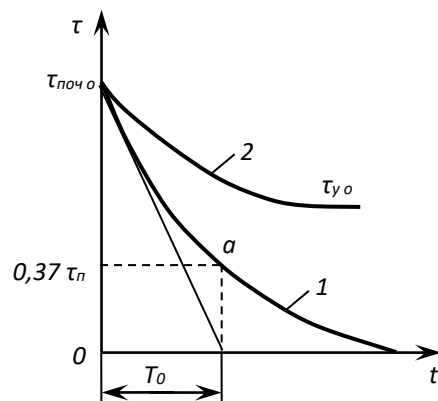


Рис. 7.2. Криві охолодження електродвигуна

Кількісне погіршення тепловіддачі характеризується коефіцієнтом погіршення тепловіддачі при нерухомому роторі:

$$\beta_o = \frac{A_o}{A}, \quad (7.14)$$

де  $A_o$ ,  $A$  - тепловіддача відповідно при нерухомому роторі і при номінальній швидкості обертання. Коефіцієнт погіршення тепловіддачі у перехідних режимах роботи (пуск, гальмування)  $\beta_{н.п.}$  визначається як:

$$\beta_{н.п.} = \frac{1 + \beta_o}{2}. \quad (7.15)$$

Електродвигуни різного виконання за способом охолодження мають приблизно такі значення коефіцієнта  $\beta_o$ :

- закритий з незалежною вентиляцією — 1,0;
- закритий без примусового охолодження — 0,95...0,98;
- закритий самовентильований — 0,45...0,55;
- захищений самовентильований — 0,25...0,35.

Коли при охолодженні ЕД після його зупинки умови тепловіддачі змінюються, то змінюється і стала часу.

Дійсно, при  $A=0$  рівняння (7.2) матиме вигляд:

$$\Delta P dt = C d\tau . \quad (7.16)$$

При умові, коли  $t = 0$  і  $\tau_{поч} = 0$ , після інтегрування лівої частини від 0 до  $\tau_y$ , одержимо:

$$\Delta P t_y = C \tau_y, \text{ звідки } t_y = \frac{C \tau_y}{\Delta P} = \frac{C}{A} = T_n,$$

тобто час нагрівання ЕД до усталеної температури чисельно дорівнює сталій часу нагрівання. З урахуванням (7.14) стала часу охолодження нерухомого ЕД визначається:

$$T_o = \frac{C}{A_o} = \frac{C}{A \beta_o} = \frac{T_n}{\beta_o}. \quad (7.17)$$

Якщо  $\beta_o \leq 1$ , то  $T_o \geq T_n$ , тобто охолодження ЕД з нерухомим ротором відбувається повільніше, ніж його нагрівання.

Сталу часу нагрівання можна визначити різними методами. Розглянемо деякі з них.

**Метод нормованого значення.** Якщо в рівнянні (7.17) прийняти  $t = T_n$ , а  $\tau_{поч} = 0$ , то можна одержати:  $\tau = \tau_y \left( 1 - e^{-\frac{T_n}{T_n}} \right) = 0,632 \tau_y$ .

Отже, якщо побудувати криву  $\tau(t)$  і на осі  $\tau$  (рис.7.1) відкласти значення  $0,632 \tau_y$ , то цьому значенню перевищення температури ЕД відповідає час від початку вмикання  $t = 0$  до  $t = T_n$ , який знаходять на осі  $t$ .

**Метод дотичної.** Сталу часу нагрівання можна визначити графічно (рис.7.1). Для цього потрібно провести дотичну до кривої нагрівання (краще у другій половині кривої). Відрізок, узятий між точкою перетину дотичної з лінією усталеного перевищення температури  $\tau_y$  і вертикаллю, поставленою з точки дотику, дорівнює в масштабі часу  $t$  сталій часу  $T_n$ .

Для більшої точності визначення  $T_n$  проводять три дотичних до точок (у другій її половині) і знаходять середнє значення визначених сталих часу. Сталу часу охолодження визначають відрізком осі абсцис (рис.7.2), відтятим дотичною до будь-якої точки кривої охолодження і перпендикуляром, опущеним з цієї точки на вісь абсцис. При зменшенні навантаження усталена температура  $\tau_{y.o}$  буде нижчою за початкову  $\tau_{поч,0}$  і процес описуватиметься кривою 2 (рис.7.2).

**Аналітичний метод.** Сталу часу нагрівання ЕД можна визначити за формулою:

$$T_n = \frac{C}{A} = \frac{c_1 m}{A} = \frac{c_1 m \tau_{дон} \eta_{ном}}{P_{ном} 10^3 (1 - \eta_{ном})}, \quad (7.18)$$

де  $c_1$  – питома теплоємність матеріалів двигуна,  $\frac{Дж}{C \cdot кг}$ ;  $\tau_{дон}$  – допустиме перевищення температури ЕД над температурою охолоджувального середовища,  $^{\circ}C$ ;  $P_{ном}$  – номінальна потужність ЕД, кВт;  $\eta_{ном}$  – номінальне значення коефіцієнта корисної дії;  $A$  – тепловіддача ЕД,  $\frac{Дж}{C \cdot ^{\circ}C}$ , яка дорівнює:

$$A = \frac{\Delta P_{ном}}{\tau_{дон}} = \frac{P_{ном} \cdot (1 - \eta_{ном})}{\tau_{дон} \cdot \eta_{ном}}. \quad (7.19)$$

Усталене значення перевищення температури ЕД для кожного  $i$ -того значення навантаження визначиться як:

$$\tau_{y,i} = \frac{\Delta P_i}{A}. \quad (7.20)$$

При сталій швидкості обертання ротора двигуна значення  $A$  і  $T_n$  незмінні. Таким чином, підставляючи в рівняння нагрівання відповідні втрати потужності, одержимо дані, за якими буде побудовано сімейство кривих нагрівання (рис.7.3), які різняться одна від одної тільки величиною усталеного перевищення температури ЕД.

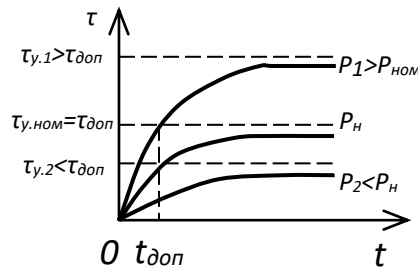


Рис.7.3 Криві нагрівання електродвигуна при різних його навантаженнях

Аналізуючи криві (рис.7.3), приходимо до висновку, що при  $\Delta P_2 < \Delta P_{ном}$  перевищення температури ЕД не досягає номінального (допустимого) значення. При  $\Delta P_1 > \Delta P_{ном}$  перевищення температури ЕД буде більшим за номінальне, що свідчить про перевантаження ЕД. У цьому режимі допустима тривалість роботи ЕД визначається часом нагрівання його обмоток до допустимої температури даного класу ізоляції.

Використовуючи криві нагрівання даного двигуна, можна визначити тривалість роботи ЕД в режимі теплового перевантаження. Цей час  $t_y$  (рис.7.3) буде визначатися точкою перетину кривої нагрівання перевантаженого ЕД з асимптотою, що відповідає значенню  $\tau_y$  при номінальному навантаженні. Для кривої нагрівання, що відповідає втратам потужності  $\Delta P_{ном}$ , тривалість часу роботи ЕД не обмежується, причому за час роботи ЕД не нагрівається вище допустимої температури.

Оскільки теплове перевантаження ЕД обмежується теплостійкістю його ізоляції, то, користуючись кривими нагрівання, в практичній роботі можна визначити його номінальну потужність.

Припустимо, що для даного ЕД з якихось причин невідома номінальна потужність, але відомий клас ізоляції, а отже і  $\tau_{доп}$ . Тоді  $\Delta P_{ном} = A\tau_{доп}$ . Увімкнемо цей двигун на навантаження  $P_i$  (струм навантаження  $I_i$ ). Відповідно до закону експоненціальної функції при  $t = \infty$   $\tau_{yi}A = \Delta P_i$ . Приймаючи, що нагрівання ЕД обумовлене в основному змінними втратами потужності у двигуні  $\Delta P_{v,ном}$ , які є функцією струму навантаження, можна записати:

$$\frac{\tau_{доп}}{\tau_{yi}} = \frac{\Delta P_{ном}}{\Delta P_i} = \frac{\Delta P_{v,ном}}{\Delta P_{i,v}} \approx \frac{I_{ном}^2}{I_i^2} = \frac{P_{ном}^2}{P_i^2}, \quad (7.21)$$

де  $\Delta P_{v,ном}$  і  $\Delta P_{i,v}$  - змінні втрати потужності відповідно при номінальному і  $i$ -тому навантаженні;  $\tau_{yi}$  - усталене перевищення температури двигуна над температурою охолоджувального середовища, яке визначається  $\tau_{yi} = \Theta_{ав.} - \Theta_c$ .

$$\text{Звідси: } I_{ном} = I_i \sqrt{\frac{\tau_{доп}}{\tau_{yi}}} \text{ або } P_{ном} = P_i \sqrt{\frac{\tau_{доп}}{\tau_{yi}}} \quad (7.22)$$

Усталене значення перевищення температури ЕД при номінальному навантаженні і



стандартній температурі  $\Theta_c$  навколишнього середовища не повинна перевищувати допустимого значення перевищення температури  $\tau_{\text{дон}}$  для даного класу ізоляції. Відповідно до виразу (7.20)

$$\tau_{\text{дон}} = \frac{\Delta P_n}{A} = K \cdot (\Delta P_c + \Delta P_{n.v}) = K \cdot \Delta P_{n.v} \cdot (\alpha + 1),$$

де  $K=1/A$  – коефіцієнт пропорційності.

У практиці експлуатації ЕП фактична температура  $\Theta_{c.f}$  навколишнього середовища може відрізнятися від стандартної ( $\Theta_c = +40^\circ \text{C}$ ).

У цьому випадку для збереження максимально допустимої температури нагрівання ізоляції допустиме перевищення температури ЕД  $\Delta \tau = \Theta_c - (\pm \Theta_{c.f})$ , що визначає необхідність зменшення або можливість збільшення навантаження ЕД. Тоді усталене перевищення температури ЕД може бути подано як:

$$\begin{aligned} \tau_y = \tau_{\text{дон}} \pm \Delta \tau &= \frac{\Delta P_i}{A} = K \cdot (\Delta P_c + \Delta P_{n.v} \cdot K_3^2) = \\ &= K \Delta P_{n.v} \cdot (\alpha + K_3^2) \end{aligned}$$

де  $K_3 = \frac{I_i}{I_n}$  – коефіцієнт завантаження ЕД;  $\alpha = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_{n.v}}$  – коефіцієнт втрат потужності – це є відношення сталих втрат потужності до номінальних змінних втрат потужності;

Якщо вираз ( $\tau_y$ ) поділити на вираз ( $\tau_{\text{дон}}$ ), то одержимо  $\frac{\tau_{\text{дон}} \pm \Delta \tau}{\tau_{\text{дон}}} = \frac{\alpha + K_3^2}{\alpha + 1}$  і знайдемо

коефіцієнт завантаження ЕД за нагріванням:  $K_3 = \sqrt{1 \pm (\alpha + 1) \cdot \frac{\Delta \tau}{\tau_{\text{дон}}}}$

Допустиме завантаження ЕД при відхиленні фактичної температури навколишнього середовища від стандартної матиме вигляд:

$$P_i = P_n \cdot K_3 = P_n \sqrt{1 \pm (\alpha + 1) \cdot \frac{\Delta \tau}{\tau_{\text{дон}}}}$$

$$\text{або } I_i = I_n \cdot K_3 = I_n \sqrt{1 \pm (\alpha + 1) \cdot \frac{\Delta \tau}{\tau_{\text{дон}}}}$$

Обмотки електродвигуна досягають допустимого перевищення температури над температурою охолоджуючого середовища при номінальному завантаженні, температурі охолоджувального середовища  $+40^\circ \text{C}$  і висоті над рівнем моря 1000 м. Якщо температура охолоджувального середовища перевищує  $+40^\circ \text{C}$  або двигун працює на висоті більше 1000 м над рівнем моря, то навантаження на нього повинно бути зменшене. При температурі нижчій за  $+40^\circ \text{C}$  теоретично допустиме збільшення навантаження двигуна понад номінальне. Але на **практиці цього не допускають** з двох причин.

По-перше, різниця між середньою і максимальною температурою (найбільш нагрітої частини обмотки) зростає приблизно пропорційно квадратові коефіцієнта завантаження двигуна, а це може призвести до місцевого перегрівання обмотки. По-друге, при цьому знижується перевантажувальна здатність двигунів, особливо асинхронних.

## 2. Класифікація номінальних режимів роботи електричних двигунів

Номінальним режимом роботи електричної машини називають режим роботи, для якого машина призначається підприємством – виготовлювачем і який наведено у її паспорті. Сучасними стандартами передбачено вісім номінальних режимів роботи ЕД з умовним позначенням від S1 до S8 рис.7.

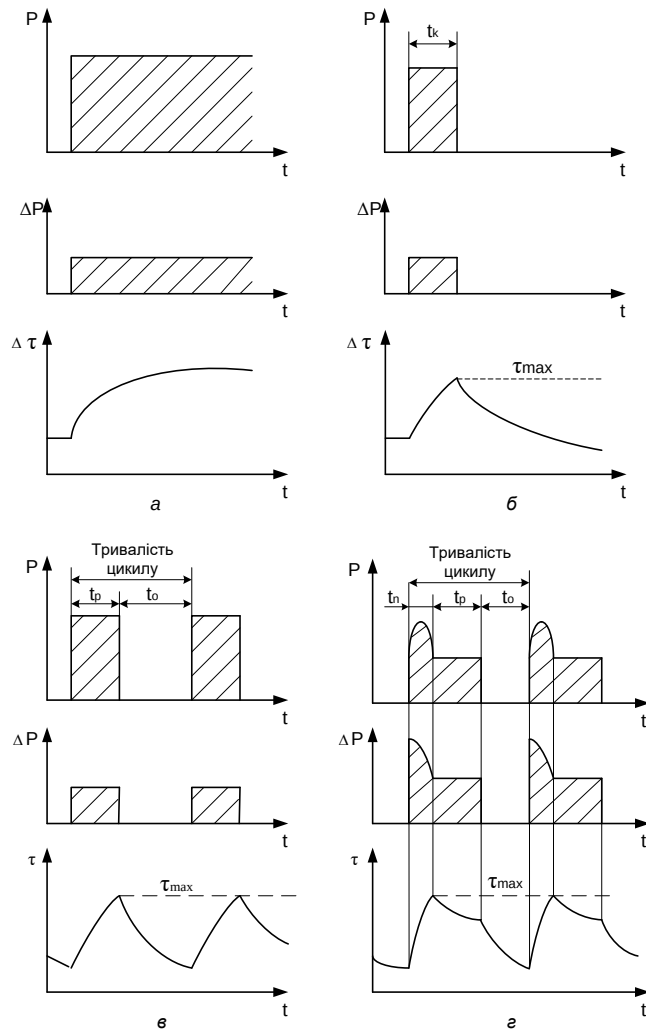


Рис.7.4. Залежність потужності на валу двигуна  $P$ , потужності втрат  $\Delta P$ , температури  $\tau$  від часу : а–у тривалому режимі роботи (S1); б–у короткочасному режимі роботи (S2); в– у повторно–короткочасному режимі роботи (S3); г–у повторно–короткочасному режимі з частими пусками (S4).

**Тривалий номінальний режим (S1)** – режим роботи ЕД при незмінному навантаженні або навантаженні, що циклічно змінюється, причому за час роботи ( $t_p > 3T_n$ ) перевищення температури усіх частин ЕД досягає усталеного значення. Залежності потужності ЕД  $P(t)$ , втрат  $\Delta P(t)$ , нагрівання ЕД - перевищення температури  $\tau(t)$  для режиму S1 показані на рис.7.4, а.

Прикладами механізмів із таким технологічним режимом можуть бути відцентровий насос зі сталими значеннями висоти всмоктування, тиску в напірному трубопроводі зі продуктивності, компресорні і вентиляторні установки, конвеєри з сталою масою транспортованого матеріалу, зерноочисні машини, силосорізки, металорізальні верстати, установки безперервного транспорту.

**Короткочасний номінальний режим роботи (S2)** – режим, коли періоди роботи ЕД з номінальним навантаженням чергуються з періодами вимикання його з електромережі.

Причому тривалість періоду роботи ( $t_p \ll 3T_n$ ,  $t_0 > 3T_n$ ) настільки мала, що ЕД не встигає нагрітися до усталеної температури, а за час паузи охолоджується до температури

охолоджуючого середовища  $\Theta_c$  (рис.7.4,б). Режим S2 характеризується тривалістю робочого ходу. Стандартні тривалості робочого періоду  $t_p$ : 10, 30, 60, 90 хв. Але умови виробництва вимагають широкої номенклатури, тому налагоджено випуск двигунів з іншими тривалостями роботи, наприклад, 1 ;2,5; 5; 8; 13; 18 хв та ін. Стандартні значення тривалості вмикання вказують після позначення режиму, наприклад: S2, 30хв. У короткочасному режимі працюють ЕД приводів конвеєрів для роздавання кормів, прибирання гною, повороту лотків у інкубаторі та ін. Якщо тривалість роботи ЕД перевищує 90 хв., то режим роботи вважають тривалим.

**Повторно-короткочасний номінальний режим (S3)** – це послідовність однакових робочих циклів, кожний з яких складається з періодів роботи з постійним навантаженням і вимкненого нерухомого стану, причому, тривалості періодів роботи  $t_p \ll 3T_n$  і пауз  $t_0 \ll 3T_n$  настільки малі, що за час роботи ЕД не встигає нагрітися до практично усталеної температури, а за час паузи не встигає охолонути до температури охолоджуючого середовища (рис.7.4, в). Тривалість одного робочого циклу  $t_u = (t_p + t_0)$  не більше 10 хв. Режим характеризується тривалістю вмикання ТВ%, яке визначається за формулою:

$$TB \% = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100 \% = \frac{t_p}{t_u} \cdot 100 \% \quad (7.23)$$

Стандартні значення ТВ%, на які розраховуються і випускаються ЕД встановлено такі: 15, 25, 40 і 60 %. Якщо  $TB > 60 \%$  або  $t_u > 10$  хв, то режим роботи вважають тривалим зі змінним навантаженням.

У повторно-короткочасному режимі працюють ЕД приводів деяких безбаштових насосних установок для води, кранів, підйомників тощо.

**Повторно-короткочасний номінальний режим із частими пусками (S4)** – це послідовність однакових робочих циклів, кожний з яких складається з періодів пуску, роботи з постійним навантаженням і періоду вимкненого стану. Тривалість цих періодів недостатня для досягнення теплової рівноваги за час одного робочого циклу (рис.7.4, г). Режим характеризується тривалістю вмикання (ТВ), кількістю пусків за годину і коефіцієнтом інерції ЕП, наприклад: S4 25%, число пусків за годину 60, FJ = 10

Нормовані значення коефіцієнта інерції 1,2; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10. Тривалість вмикання ЕД визначається за формулою:

$$TB \% = \frac{t_p + t_n}{t_n + t_p + t_0} \cdot 100 \%, \quad (7.24)$$

де  $t_u$  – тривалість пуску.

Нормовані значення ТВ: 15; 25; 40 і 60 %. Нормоване число пусків за годину: 30; 60; 120 і 240.

**Повторно-короткочасний номінальний режим із частими пусками і електричним гальмуванням (S5)** – це послідовність однакових робочих циклів, кожний з яких складається з періоду пуску, періоду роботи з постійним навантаженням, періоду швидкого електричного гальмування і періоду вимкненого стану. Тривалість цих періодів недостатня для досягнення теплової рівноваги за час одного робочого циклу (рис.7.4, д). У цьому режимі втрати потужності при пуску і електричному гальмуванні суттєво впливають на перевищення температури двигуна. Режим характеризується такими ж номінальними даними, як і режим S4.

Нормовані значення коефіцієнта інерції в режимі S5: 1,2; 1,6; 2; 2,5; 4. Тривалість вмикання визначається за формулою:

$$TB = \frac{t_n + t_p + t_z}{t_n + t_p + t_z + t_0} 100\%, \quad (7.25)$$

де  $t_e$  — тривалість електричного гальмування.

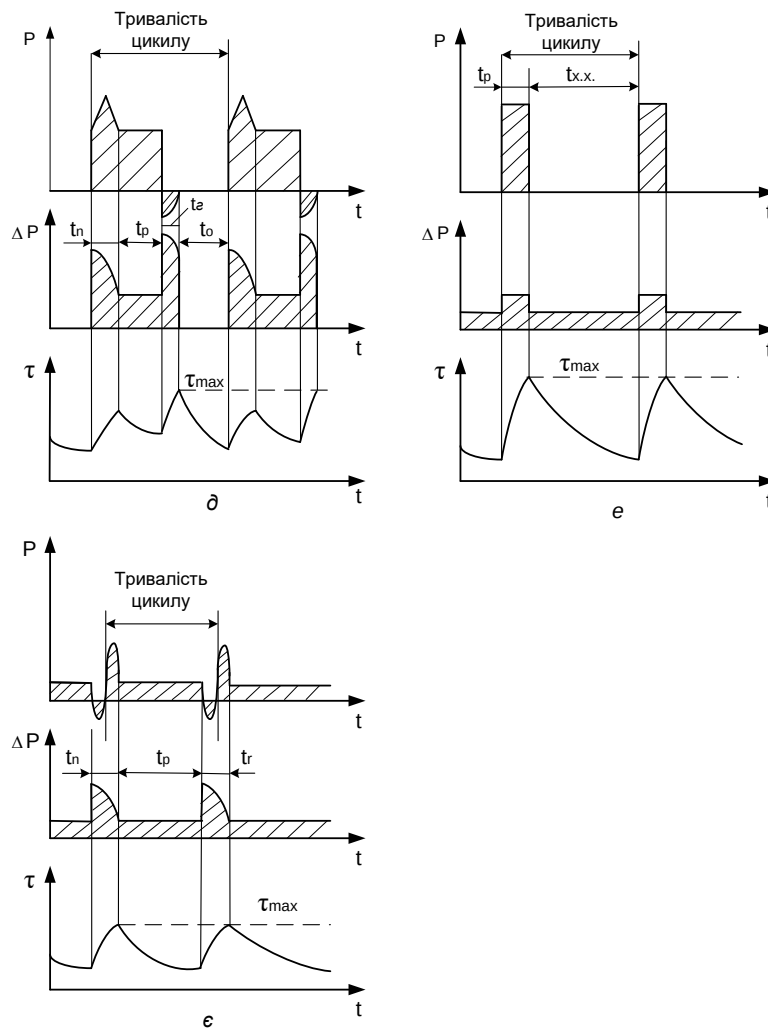


Рис.7.4. Залежність потужності на валу двигуна  $P$ , потужності втрат  $\Delta P$ , температури  $\tau$  від часу :  $d$ —у повторно–короткочасному режимі з частими пусками і електричним гальмуванням (S5);  $e$ —у переміжному режимі (S6);  $e$ —у переміжному режимі з частими реверсами (S7)

**Номінальний переміжний режим (S6)** — це послідовність однакових робочих циклів, кожний з яких складається з періоду роботи з постійним навантаженням і періоду холостого ходу. Тривалість цих періодів недостатня для досягнення теплової рівноваги за час одного робочого циклу (рис.7.4,  $e$ ). Цей режим характеризується тривалістю навантаження (ТН), яка визначається за формулою:

$$TH \% = \frac{t_p}{t_p + t_{x.x}} \cdot 100 \%, \quad (7.26)$$

де  $t_{x.x}$  — тривалість періоду холостого ходу.

У цьому режимі тривалість циклу не перевищує 10 хв. Стандартні тривалості навантаження ТН: 15; 25; 40 і 60 % вказують після умовного позначення режиму. Наприклад: S6 40%. У цьому режимі працюють двигуни пилорами, циркулярки та ін.

**Номінальний переміжний режим з частими реверсами (S7)** — це послідовність однакових робочих циклів, кожний з яких складається з періоду пуску, періоду роботи з постійним навантаженням, періоду електричного гальмування. Період вимкненого стану відсутній. Тривалість цих періодів недостатня для досягнення теплової рівноваги за час одного робочого

циклу (рис.7.4, є). Нормується кількість реверсів за годину (30; 60; 120; 240) і коефіцієнт інерції 1,2; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10. Наприклад: S7, FJ=4, число реверсів за годину 120.

**Номинальний переміжний режим з двома або більше ступенями частот обертання (S8)** – це послідовність однакових робочих циклів, кожний з яких складається з періоду прискорення, періоду роботи з постійним навантаженням, що відповідає заданій частоті обертання, за яким слідує один або кілька періодів роботи з іншим постійними навантаженнями, що відповідають іншим частотам обертання. Період вимкненого стану відсутній.

Тривалість кожного робочого періоду недостатня для досягнення теплової рівноваги за час одного робочого циклу (рис.7.4, ж). У цьому режимі втрати потужності при переході з однієї частоти обертання на іншу суттєво впливають на перевищення температури двигуна.

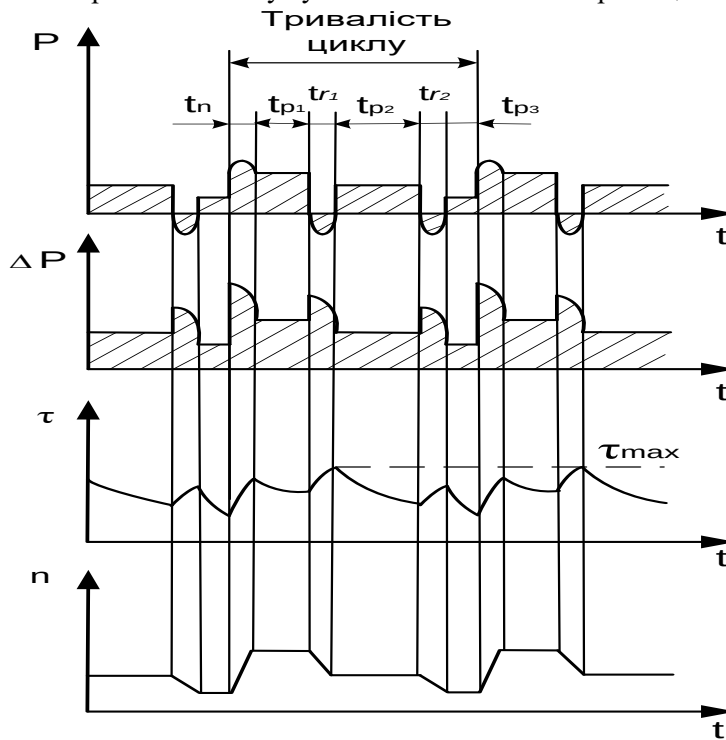


Рис. 7.4.ж. Залежність потужності на валу двигуна  $P$ , потужності втрат  $\Delta P$ , температури  $\tau$  і частоти обертання  $n$  від часу у переміжному режимі роботи з трьома ступенями частот.

Для типового режиму S8 після скороченого позначення вказують коефіцієнт інерції FJ, число циклів за годину, а також навантаження, частоту обертання і тривалість вмикання на кожному ступені частоти обертання. Наприклад: S8 FJ=1,6; число циклів за годину 60;

16 кВт, 740 об/хв., 30 %;

40 кВт, 1460 об/хв., 30 %;

25 кВт, 980 об/хв., 40 %;

Тривалість вмикання на окремих ступенях (рис.7.4, ж) визначається за формулами:

$$TB_1 = \frac{t_n + t_{p1}}{t_n + t_{p1} + t_{r1} + t_{p2} + t_{r2} + t_{p3}} 100\%; \quad (7.27)$$

$$TB_2 = \frac{t_{r1} + t_{p2}}{t_n + t_{p1} + t_{r1} + t_{p2} + t_{r2} + t_{p3}} 100\%; \quad (7.28)$$

$$TB_3 = \frac{t_{r2} + t_{p3}}{t_n + t_{p1} + t_{r1} + t_{p2} + t_{r2} + t_{p3}} 100\%, \quad (7.29)$$

де  $t_{p1}, t_{p2}, t_{p3}$  — тривалість навантаження на кожному ступені обертання;  $t_{z1}, t_{z2}$  — тривалість електричного гальмування при переході з однієї частоти обертання на іншу;  $t_n$  — тривалість пуску.

Визначення необхідної потужності і вибір конкретного ЕД для кожного з можливих режимів роботи повинні забезпечити близький до номінального тепловий режим двигуна, а значить – його нормативне використання за тривалістю служби.

Необхідною умовою для визначення потужності ЕД є наявність діаграми навантаження ЕП або приводного механізму.

#### **Питання для самоконтролю.**

1. Як визначають втрати потужності в колі якоря (ротора) для ДПС НЗ і АД при роботі без навантаження ( $M_c = 0$ )?

2. Як одержати вирази, що дають можливість знайти втрати енергії за час перехідного процесу в колі якоря (ротора) для ДПС НЗ і АД при роботі без навантаження ( $M_c = 0$ ), якщо відомі момент інерції  $J$ , кутова швидкість ідеального холостого ходу (синхронна швидкість)  $\Omega_0$  та межі регулювання  $\delta_{поч}, \delta_{кін}, s_{поч}, s_{кін}$  .?

3. Дати аналіз одержаним виразами (6.51) і (6.52). Які висновки можна зробити при користуванні ними?

4. Чому будуть дорівнювати втрати енергії в роторі при пуску двигуна без навантаження і запасу якої енергії у механічній частині ЕП в кінці пуску вони чисельно дорівнюють?. Чому дорівнюють при цьому початкові і кінцеві значення швидкості і ковзання?

5. Чому будуть дорівнювати втрати енергії в роторі під час динамічного гальмування? Запас якої енергії перетворюється на теплоту в якірному (роторному) колі двигуна? Чому дорівнюють при цьому початкові і кінцеві значення швидкості і ковзання?

6. Чому будуть дорівнювати втрати енергії в роторі під час гальмування противмиканням? Чому дорівнюють при цьому початкові і кінцеві значення швидкості і ковзання? Яке співвідношення між втратами енергії під час гальмування противмиканням і втратами під час розгону і динамічному гальмуванні?

## **Лекція 12**

### **Апарати керування та захисту електроприводів.**

#### **План лекції**

- 1. Класифікація електричних апаратів та вимоги до них**
- 2. Нормовані параметри електричних апаратів**
- 3. Контакти електричних апаратів**
- 4. Апарати керування**

#### **1. Класифікація електричних апаратів та вимоги до них**

Електричні апарати, за допомогою яких виконується замикання та розмикання електричних кіл, називаються комутаційними.

За призначенням і виконавчими функціями апарати поділяють на апарати керування та апарати захисту, а також апарати, які виконують обидві ці функції; обмежувальні апарати, апарати для контролю заданих електричних та неелектричних параметрів, апарати для вимірювання; електричні регулятори.

Якщо в апараті комутація здійснюється шляхом переміщення його контакт-деталей відносно одна одної, то він називається контактним апаратом.

Безконтактним називають електричний апарат, що виконує комутаційну операцію без переміщення і руйнування його деталей (тиристори, транзистори, симістори).

За номінальною напругою електричні апарати поділяють на дві групи: апарати низької напруги (номінальна напруга до 1000 В) та високої напруги (номінальна напруга більше 1000 В).

Апарати класифікують за родом струму, за ступенем захисту від навколишнього середовища, за захистом від впливу механічних факторів.

Електричні апарати повинні відповідати таким вимогам:

1. У номінальному режимі роботи температура апарата і його деталей не повинна перевищувати допустиму.
2. Апарати повинні витримувати струми перевантаження та короткого замикання без пошкоджень.
3. Ізоляція апарата повинна витримувати перенапруги.
4. Контакти апаратів, призначених для вимикання струмів КЗ, повинні бути розраховані на цей режим.
5. Електричні апарати повинні бути надійними в роботі та безпечними для обслуговуючого персоналу.
6. Апарати повинні відповідати екологічним та санітарно-гігієнічним вимогам.
7. Апарати повинні мати невисокі масові та габаритні показники.

## 2. Нормовані параметри електричних апаратів

Стандартами встановлено ряд параметрів електричних апаратів, величини яких нормуються:

- Номінальна та робоча напруга апарата.
- Номінальна частота джерела живлення.
- Номінальний струм апарата.
- Номінальний робочий струм.
- Номінальний режим роботи.
- Допустима кількість вмикань за годину.
- Категорії застосування
- Механічна та електрична стійкість проти спрацювань.
- Комутаційна здатність
- Стійкість проти зовнішніх впливів.
- Надійність роботи.
- Безпека.

Номінальною напругою називають найбільше значення напруги мережі, для якої апарати призначені.

Номінальною робочою називають напругу мережі, при якій апарат може працювати.

В Україні основною частотою мереж змінного струму є 50 Гц.

Номінальним струмом апарата є струм, визначений за умовами його нагрівання в основному конструктивному виконанні при роботі в основному номінальному режимі і при номінальній напрузі.

Номінальним робочим струмом називають допустимий струм через апарат в конкретних умовах його роботи.

Для електричних апаратів встановлено такі номінальні режими роботи (ГОСТ 12434-93): тривалий, переривисто-тривалий, повторно - короткочасний, короткочасний.

Стандартами встановлено діапазон допустимих частот вмикання за годину: 1; 3; 6; 12; 30; 60; 120; 300; 600; 1200; 1800; 2400; 3600; 6000; 12000; 18000; 24000; 45000; 90000; 180000; 360000.

У залежності від умов роботи передбачено такі категорії застосування електричних апаратів (ГОСТ 11206-93):

|                           |                                    |
|---------------------------|------------------------------------|
| Рід струму:               | Категорія застосування:            |
| Змінний -----             | АС- 1,2,3,4,11,14,15,20,21,22,23.  |
| Змінний і постійний ----- | А,В.                               |
| Постійний -----           | ДС-1,2,3,4,5,11,14,15,20,21,22,23. |

Механічна стійкість проти спрацювань визначається кількістю циклів вмикання-вимикання кола зі струмом, після якої потрібна заміна контактів.

Комутаційна здатність електричного апарата – це гранична величина струму.

У типі апарата або його технічній характеристиці обумовлені мікрокліматичні умови, за яких він може працювати: кліматичне виконання (У, УХЛ, Т, О) та категорії розміщення (1,2,3,4,5), а також захищеність від потрапляння сторонніх предметів та води під оболонку апарата – IPXX.

Надійність роботи визначається ймовірністю безвідмовної роботи апарата при певному напруженні до виходу з ладу.

### **3. Контакти електричних апаратів**

Контакт – це місце переходу струму з однієї струмоведучої деталі в іншу.

Контакт-деталлю називають деталь, яка здійснює контакт

За можливістю переміщення контакт-деталей між собою при заданій дії пристрою контакти електричних кіл поділяють на три групи: розбірні, комутуючі і ковзні.

Розбірними називають контакти, у яких у процесі роботи деталі не переміщуються одна відносно іншої, а залишаються надійно скріпленими. Це – болтові з'єднання, приєднання провідників до затискачів та ін.

Комутуючі контакти у процесі роботи замикають і розмикають коло зі струмом або без нього. До них відносять контакти рубильників, вимикачів, перемикачів, автоматичних вимикачів, реле і т.д.

Ковзні контакти є різновидом комутуючих контактів, у яких одна з деталей переміщується (ковзає) по іншій. Наприклад, контакти реостатів, тролей, щіткові контакти електричних колекторних машин.

Розрізняють три режими роботи контактів: вмикання кола, проведення струму в увімкненому стані і вимикання кола. Для виготовлення контактів використовують мідь, алюміній, срібло, вольфрам, золото, платину, паладій.

Низьковольтні електричні апарати мають контакти врубного, важільного або місткового типу. Розмикання електричного кола зі струмом, як правило, супроводжується електричним розрядом між контактами, що розходяться.

### **4. Апарати керування**

8.7. Електричні апарати керування і регулювання служать для автоматичного або ручного вмикання та вимикання електричних кіл при нормальних і аномальних режимах роботи, а також для автоматичного програмного керування.

Найбільше розповсюдження в умовах сільськогосподарського виробництва в системі автоматизованого електропривода одержали такі апарати: контактори, магнітні пускачі, автоматичні вимикачі, запобіжники, реле (струму, напруги, часу, проміжні, теплові), а також рубильники, кнопкові станції, пакетні вимикачі і перемикачі.

Залежно від привода контактів контактори поділяються на електромагнітні, гідравлічні і пневматичні. За родом комутаційного струму контактори бувають постійного струму, змінного струму, а також постійного і змінного струму.

Електромагнітними контакторами називаються двопозиційні комутаційні апарати, призначені для частих вмикань і вимикань силових електричних кіл при нормальних умовах їх роботи.

Електромагнітні контактори, призначені для роботи в колах постійного струму, мають привод від електромагнітів постійного струму. Контактні системи контакторів змінного струму приводяться від електромагнітів постійного або змінного струму.

За кількістю головних кіл контактори можуть бути одно-, дво-, три-, чотири- і п'ятиполюсними. Основними технічними даними контакторів є номінальна напруга, номінальний струм головних і допоміжних контактів, граничний струм вмикання і вимикання, механічна і комутаційна стійкість проти спрацювання, допустима кількість вмикань за годину, власний час вмикання і вимикання.

Стійкість електричних апаратів проти спрацювання поділяють на електричну (комутаційну) і механічну. Механічна стійкість проти спрацювання визначається кількістю циклів вмикання – вимикання апарата при знеструмленому головному колі без ремонту і заміни його вузлів і деталей. Механічна стійкість сучасних контакторів досягає 20 млн. циклів. Комутаційна стійкість проти спрацювання – це кількість операцій вмикання – вимикання кола зі струмом, після якої потрібна заміна контактів. Гранична комутаційна стійкість сучасних електромагнітних контакторів 3 – 5 млн. операцій. Власний час вмикання контактора – це проміжок часу від моменту подачі напруги на котушку електромагніта до замикання магнітопроводу. Власний час вимикання – це час від моменту розмикання кола котушки електромагніта до моменту розмикання контактів апарата.



Контактори складаються з таких основних вузлів: системи головних контактів, дугогасного пристрою, електромагніта і системи допоміжних контактів. Контакти поставляються без внутрішнього монтажу і оболонки. При подачі напруги на котушку електромагніта контактора його яркір притягується до нерухомого осердя і приводить у рух траверсу з рухомими контактами. Унаслідок цього замикаючі контакти замикаються, а розмикаючі – розмикаються. При знеструмленні котушки яркір відпадає під дією пружини або власної ваги. Дугогасний пристрій забезпечує швидке гасіння дуги, чим досягається мале зношення контактів.

Основні характеристики контакторів і пускачів:

*Номинальний струм контактора* – це струм переривисто-тривалого режиму роботи. При цьому режимі роботи контактор знаходиться в увімкненому стані не більше 8 годин, після чого він повинен бути декілька раз увімкненим і вимкненим з метою зачистки контактів від окислів міді. Номинальний струм є основним параметром контактора, який визначає його розміри. Контактори виготовляються на номинальні значення струмів у колі головних контактів від 75 до 630 А.

*Власний час вмикання* складається із часу наростання магнітного потоку, що створюється електромагнітом до значення потоку зрушення і часу руху яркіра. Більша частина часу витрачається на зростання потоку. Для контакторів 2-ої величини ( $I_n=100$  А) власний час вмикання біля 0,14 с, а для контакторів 5-ої величини ( $I_n=630$  А) він збільшується до 0,37 с.

*Власний час вимикання* – час з моменту знеструмлення електромагніта до моменту розмикання контактів. У контакторів 2-ої величини цей час порядку 0,07с; у контакторів 5-ої величини – 0,23с.

*Коефіцієнт повернення контактора* – це відношення напруги відпускання до напруги спрацювання, тобто  $K_n = \frac{U_{нов}}{U_{сп}}$ . Для контакторів постійного струму  $K_n = 0,2...0,3$ , що не дозволяє використовувати їх для захисту двигунів від зниження напруги.

*Механічна зносостійкість контакторів* – це число циклів його роботи при відсутності комутуючого струму без ремонту і зміни вузлів апарата. За механічною зносостійкістю контактори підрозділяються на 5 класів: від  $0,25 \cdot 10^6$  циклів для 1-го класу до  $16 \cdot 10^6$  циклів для 5-го класу.

Контактори постійного струму, як правило, виготовляються однополюсними. Магнітна система в більшості випадків виконується з поворотним яркіром. Головні контакти, як правило, пальцевого типу і закріплюються на важелі, зв'язаному з яркіром електромагніту. Можна виділити три положення головних контактів пальцевого типу: а) розімкнене положення; б) початкове замкнене положення, при якому відбувається початкове зіткнення рухомого контакту з нерухомим; в) кінцеве положення, при якому за рахунок повороту яркіра повертається і зв'язаний з ним важіль рухомого контакту. При цьому збільшується прижимна сила контактів і відбувається перекошування і ковзання рухомого контакту по нерухомому, що сприяє зняттю окислів з контактних поверхонь.

Контактори змінного струму, призначені для роботи в трифазних мережах, як правило, виготовляються трьохполюсними, а в деяких випадках і з більшим числом полюсів. Привод контакторів змінного струму виконується зазвичай з електромагнітом змінного струму, а у випадках великого числа комутацій застосовується електромагніт постійного струму. Сердечники електромагнітів змінного струму виготовляються шихтованими з розчепленими полюсами, обладнаними короткозамкнутими витками для попередження вібрації яркіра. Обмотки електромагнітів змінного струму виконуються з малим числом витків товстого проводу. Індуктивний опір таких обмоток набагато більший від їхнього активного опору і різко (в 5...10 разів) змінюється після спрацювання електромагніту. В наслідок цього початковий струм електромагнітів у 5...10 разів більший від його усталеного струму. Особливістю роботи контакторів змінного струму є також те, що при живленні електромагніта змінним струмом сила тяги безперервно змінюється з подвійною частотою мережі.

Магнітні пускачі – це електромагнітні контактори, призначені для дистанційного керування трифазними асинхронними двигунами, потужністю від 1,1 кВт до 75 кВт при напрузі до 500 В. Наявність електромагніта в магнітному пускачі забезпечує нульовий захист асинхронного двигуна при значному зниженні напруги живлення. При установлених теплових реле магнітний пускач захищає асинхронний двигун від тривалих невеликих перевантажень, а також від роботи в однофазному режимі. За принципом керування магнітні пускачі можуть бути реверсивними і нереверсивними. Конструкція магнітного пускача серії ПАЕ зображена на рис.8.1. Магнітний

пускач ПАЕ має якорь поворотного типу 1. Кожен полюс контактора обладнаний двома нерухомими контактами 2 і одним містковим контактом 3. Місця дотику облицьовані металокерамічним матеріалом (срібло – окис кадмію). Натиснення контактів створюється пружиною 4. Сердечник електромагніта також підпружинений (пружина 6) з метою уникнення ударних механічних навантажень і додаткового зниження вібрації при спрацьовуванні пускача. Повернення якоря у вихідний стан здійснюється з допомогою пружини 7. Утягуючі котушки електромагнітних пускачів установлюються на напругу 127, 220, 380 В. Пускачі можуть бути укомплектовані тепловим реле, закріпленим на одній основі з ними.

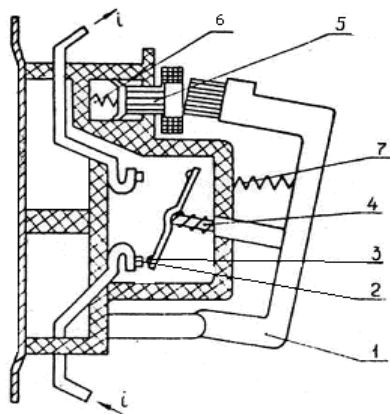


Рисунок 8.1 – Схема магнітного пускача серії ПАЕ.

Теплове реле призначене для захисту електродвигуна та іншого електрообладнання від струмів перевантаження. Принцип дії теплових реле оснований на деформації біметалевої пластини при нагріванні її струмом навантаження. Деформація пластинки передається на механізм розчеплення, який розмикає контакт, що увімкнений у коло виконавчого органу (котушки пускача, контактора). Зазвичай нагрівання біметалевої пластинки здійснюється безпосередньо від нагрівальних елементів, увімкнених у розрив електричного кола, що захищається. Маркування теплових реле складається з 3 букв і цифр. Перші дві букви ТР є аббревіатурою слів „теплове реле”. Третя буква означає серію реле. Цифри після букв вказують найбільший номінальний струм змінного нагрівача, який може бути установлений в реле даного типу. В електроприводах, що використовуються в сільськогосподарському виробництві нерідко використовуються теплові реле типів: ТРН, ТРП, ТРА і ТРВ. У реле типу ТРН регулятором можна змінювати струм у межах  $\pm 25\%$  від номінального струму, значення якого виштамповано на його поверхні нагрівального елемента. При правильному підборі нагрівального елемента реле не спрацьовує при номінальному струмі. При струмі навантаження, що дорівнює 1,35 номінального, реле спрацьовує за час, що не перевищує 30 хвилин, а при шестикратному струмі навантаження - не більше, ніж 2...10 с.

Автоматичні вимикачі – це електричні апарати, які служать для вимикання електричного кола при аномальних та аварійних режимах: перевантаженнях, коротких замиканнях, значному зниженні напруги живлення, зміні напрямку потужності тощо. Вони можуть також використовуватись для рідкісних вмикань і вимикань номінальних струмів навантаження. Автоматичні вимикачі призначені для роботи в колах змінного струму напругою до 500 В і постійного – напругою до 220 В. У кожному автоматичному вимикачі мають місце такі основні вузли: струмоведуче коло, дугогасильна система, привод автомата, механізм автомата, механізм вільного розчеплення і елементи захисту розчіплювачів. Автоматичні вимикачі закриті пластмасовим кожухом, з-під якого практично не викидається дуга. Вони випускаються на номінальну напругу до 500В і струм до  $10^3$  А. Принципова схема автоматичного вимикача на струм більше 200 А представлена на рис.8.2.

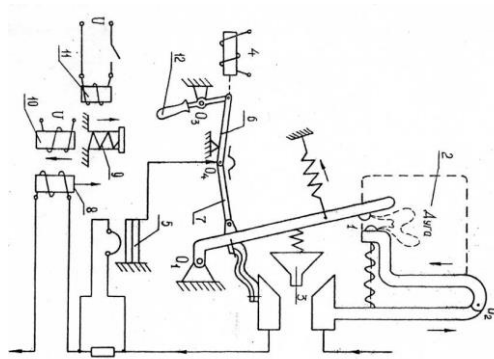


Рисунок 8.2 – Принципова схема автоматичного вимикача.

Струмоведаче коло має основні 3 і дугогасильні 1 контакти. Вмикання вимикача може здійснюватися вручну (рукояткою) 12 або електромагнітом 4.

Ланки 6 і 7 є механізмом вільного розчеплення. Вимикання автоматичного вимикача може здійснюватися вручну рукояткою 12 або від розчіплювачів 5, 8, 10, 11. Швидкість розходження контактів забезпечується пружиною 9. Гасіння дуги, яка утворюється при вимиканні, відбувається в камері 2.

Реле – це електричний апарат, характеристикою його керування є залежність вихідного параметра  $Y$  від вхідного  $X$ . В електроприводах реле використовується для виконання функцій керування та захисту.

Реле класифікують за такими ознаками:

- за родом вихідної величини;
- за родом струму керування;
- за величиною напруги кола керування;
- за кількістю і видом контактів;
- за категорією застосування;
- за засобом приєднання провідників;
- за конструктивним виконанням;
- за принципом дії.

Під реле розуміють електричні апарати, в яких при плавній зміні керуючої величини відбувається стрибкоподібна зміна керованої (вихідної) величини. Максимально-струмовим реле називають реле, що реагує на зростання струму в керуючому (вхідному) колі. За допомогою таких реле здійснюються максимально-струмові захисти, що вимикають електроустановки при перевантаженнях і коротких замиканнях, управління пуском електродвигунів і ін. Основні характеристики струмових реле – це струм спрацювання, тобто мінімальний струм, при якому реле спрацює ( $I_{сп}$ ), і струм повернення ( $I_{в}$ ) – максимальний струм, при якому реле повертається

у вихідне положення. Відношення  $\frac{I_{в}}{I_{сп}} = K_{е}$  називається коефіцієнтом вороття. Чим більший

струм, який проходить по реле ( $I_{роб}$ ) порівняно зі струмом його спрацювання ( $I_{сп}$ ), тим надійніше спрацювання реле.

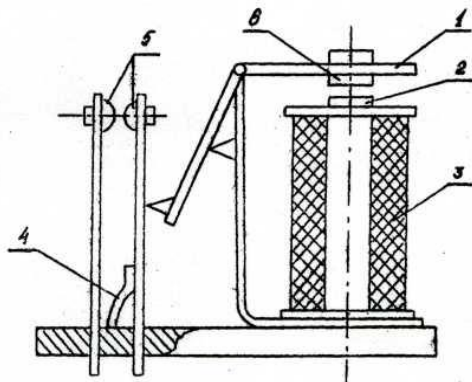


Рисунок 8.3 – Електромагнітне реле постійного струму.

На рис.8.3 зображено реле постійного струму. При досягненні напруженості магнітного поля в котушці 3, достатньої для спрацювання реле, якор 1 притягується до сердечника 2 і контакти 5 замикаються. У вихідне положення контакти 5 повертаються під дією пружини 4 після того, як котушка 3 обезструмлюється і перестає притягувати сердечник 1.

Крім контактних, розроблені безконтактні апарати керування асинхронними електродвигунами на базі напівпровідникових елементів. Основними перевагами безконтактних апаратів є відсутність силових контактів, мале споживання електроенергії, безшумність роботи, підвищена швидкодія. На рис. 8.4 представлена схема тиристорного пускача. Пускач працює так. При натисканні на кнопку SB2 допоміжний малопотужний тиристор VS4 відкривається, оскільки на його керуючий електрод подається додатний потенціал. Після відкриття тиристора VS4 кнопка SB2 може бути відпущена. При цьому тиристор залишається у відкритому стані, адже через нього проходить постійний струм, випрямлений діодами VD1...VD3, який ніде через нуль не проходить (трифазне випрямлення).

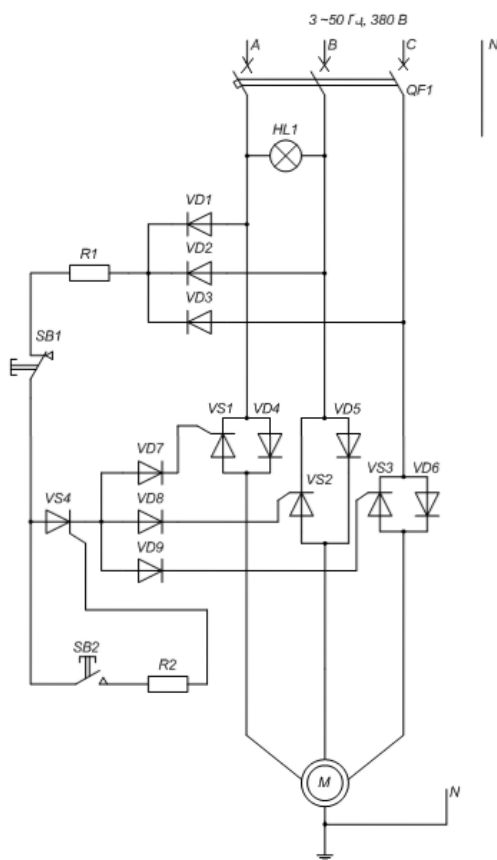


Рисунок 8.4 – Схема електрична принципова тиристорного пускача

При подачі потенціалу на керуючі електроди тиристорів VS1...VS3 (через відкритий тиристор VS4 і діоди VD1...VD9), вони відкриваються. У результаті через обмотки двигуна починає протікати 3-фазний струм (один півперіод через діоди VD4...VD6, другий – через тиристори VS1...VS3), двигун М запускається.

Для зупинки двигуна необхідно натиснути кнопку SB1, в результаті чого допоміжний тиристор VS4 замкнеться, перестане подаватись потенціал на керуючі електроди тиристорів VS1...VS3, які теж замкнуться, і двигун зупиниться.

Колійні вимикачі і перемикачі призначені для перимикання в колах керування залежно від просторового положення робочого органу машини або керованого чи захищаного механізму. Якщо такі апарати використовуються для перемикання електричних кіл при крайніх положеннях контрольованих механізмів, то їх називають кінцевими вимикачами. За принципом дії колійні вимикачі поділяються на контактні та безконтактні. Контактні вимикачі складаються з групи контактів у різних комбінаціях і привода, змонтованих у металевому корпусі. Залежно від виду привода вимикачі поділяються на натискні (кнопкові), важільні, шпindelельні й обертові.

Основними вузлами цієї серії є геркон, постійний магніт і пластинка з магнітом'якої сталі, жорстко з'єднана з контрольованим робочим органом. При переміщенні робочого органа пластинка входить у вузьку щілину між герконом і постійним магнітом та замикає на себе магнітний потік, унаслідок чого геркон перемикається. Більш швидкодіючими і довговічними є безконтактні колійні вимикачі, в яких робочий орган діє не на контакти, а на безконтактні датчики. За принципом дії датчики можуть бути індуктивними, індукційними, магнітотехнічними, оптичними та ін.

Приводом контактів у більшості контактних електричних апаратів з дистанційним керуванням є електромагніт. За родом струму електромагніти бувають постійного та змінного струму, за характером руху якоря – поворотні та прямо ходові. Для магнітопроводів електромагнітів застосовують матеріали з високою магнітною проникністю, високою індукцією насичення та низькою коерцитивною силою (малою шириною петлі гістерезису). Магнітопроводи електромагнітів постійного струму виготовляють із суцільного шматка сталі, а змінного – з метою зменшення втрат на вихрові струми та гістерезис – набирають із ізолюваних одна від одної пластин електротехнічної сталі.

Тягова характеристика електромагніта – це залежність сили притягання електромагніта від величини робочого зазору  $\delta$  при незмінному значенні струму в його обмотці. При вмиканні апарата рух якоря починається тоді, коли електромагнітна сила притягування при  $\delta = \delta_1$  стане більшою за протидіючу  $P_1$ . Для чіткого і надійного вимикання апарата тягова характеристика повинна лежати вище механічної і відповідати їй.

В електромагнітах постійного струму тягове зусилля зростає зі зменшенням зазору  $\delta$ . В електромагнітах же змінного струму магнітний потік змінюється за синусоїдальним законом. При відривному зусиллі механічної протидії  $P_{відр}$  двічі за період в одній точці якір буде відпадати, а в іншій – знову притягуватися, тобто буде вібрувати з подвійною частотою. Вібрація супроводжується сильним гудінням і спричиняє спрацювання магнітної системи. Для усунення вібрації електромагніти змінного струму обладнують короткозамкненими витками з провідникових матеріалів (мідь, латунь), які охоплюють частину полюса електромагніта (70...80%).

Рубильники призначені для ручної комутації електричних кіл номінальною напругою до 660 В змінного і до 440 В постійного струму. За конструкцією поділяються на одно-, дво- і триполюсні; з приводом центральною або боковою рукояткою через вал, центральною рукояткою через систему важелів; з дугогасними пристроями і без них; з переднім або заднім приєднанням проводів; з одинарними або подвійним розривом кола. За ступенем захисту бувають відкритими (IP00), захищеними (IP32) і закритими (IP54).

Комутаційна здатність рубильників залежить від роду струму, величини напруги і конструкції апарата. Вибір рубильників здійснюється за номінальною напругою, номінальним струмом, допустимим комутованим струмом, конструктивним виконанням і ступенем захисту.

Пакетні вимикачі і перемикачі серії ПВ і ПП призначені для нечастих (до 30 за годину) комутацій електричних кіл напругою до 220 В постійного струму або до 380 В змінного струму. Апарати використовуються як ввідні в низьковольтних комплектних пристроях, як комутуючі в колах автоматики та для керування асинхронними електродвигунами. Номінальний струм пакетних вимикачів і перемикачів залежить від їх габаритів і напруги електричних кіл, які вони комутують. У колах постійного і змінного струму напругою 220 В – від 10 до 400 А; у колах змінного струму напругою 380 В – від 6.3 до 250 А.

Інтенсивне гасіння дуги в апараті забезпечується висотою рухомого контакту, подвійним розривом кола і наявністю фібрових дугогасних щічок. Пакетні вимикачі і перемикачі виготовляються з різними ступенями захищеності від впливу оточуючого середовища: IP00, IP56, IP67. Пакетні вимикачі і перемикачі вибирають за кількістю полюсів, кількістю напрямків і ступенем захисту від дії оточуючого середовища. Перевага пакетних апаратів над рубильниками в їх невеликих габаритах.

Пакетно – кулачкові вимикачі і перемикачі типів ПКВ, ПКП, ПКУ, ПВП та інші мають більш досконалу конструкцію, завдяки чому їх стійкість проти електричного спрацювання досягає 200-400 тисяч циклів вмикання-вимикання, а стійкість проти механічного спрацювання – від 1 до 6 млн. циклів. Їх застосовують як комутаційні апарати в електроустановках змінного струму напругою до 380 В, для перемикачів кіл керування та автоматики, а також для керування асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором. Перемикач складається з одного або кількох комутуючих пакетів, механізму фіксації і рукоятки, складених на квадратному валу.

Комутуючі пакети і механізм фіксації стягнені шпильками. Вал від поздовжніх переміщень утримується упорною шайбою. При повороті рукоятки перемикача повертається квадратний вал, а разом з ним і кулачки комутуючих пакетів, що спричиняє розмикання і замикання контактів. Пакетно – кулачкові вимикачі і перемикачі вибираються за робочим струмом керованого кола за умовою:  $I_{п.ном} \geq I_{роб}$ ,

де  $I_{п.ном}$  – номінальний струм перемикача, А.

Ручні пускачі типу ПНВ (пусак натискний вібростійкий) призначені для ручного керування трифазним, а ПНВС – однофазними асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором малої потужності при напрузі 500 В змінного струму частотою 50 Гц. Складається з прямо ходової контактної схеми місткового типу і кнопкового з засчкокою, яка фіксує положення «ввімкнено» і «вимкнено». Відмінність ПНВ від ПНВС полягає в тому, що в останніх середній пліус, призначений для комутування пускової обмотки однофазного асинхронного електродвигуна, у положенні «ввімкнено» не фіксується. Найбільша потужність електродвигунів, керованих ПНВ при напрузі 380 В – 4,5 кВт, а ПНВС – 0,6 кВт. Новою розробкою є триполюсний кнопковий вимикач з блокуванням серії ВКИ, призначений для ручного керування одно- та трифазними споживачами електроенергії потужністю від 0,6 до 3,7 кВт і номінальною напругою 230/400 В.

### Питання для самоконтролю.

1. Які апарати називаються комутаційними? Як поділяють апарати за призначенням і виконуваними функціями? Які апарати відносяться до контактних, а які до безконтактних? [1 с.340]

2. Як поділяють електричні апарати за номінальною напругою? За якими показниками класифікують електричні апарати? Яким вимогам повинні відповідати електричні апарати?

3. Для яких параметрів електричних апаратів, встановлених стандартами, нормується величина? Яку напругу називають номінальною напругою апарата? Яку напругу називають номінальною робочою? На яку частоту виготовляються електричні апарати в Україні?

4. Який струм є номінальним струмом апарата? Який струм називають номінальним робочим струмом апарата? Які номінальні режими роботи встановлено для електричних апаратів? Який діапазон допустимих частот вмикань апаратів за годину встановлено стандартами?

5. Які категорії застосування електричних апаратів передбачено залежно від умов роботи? Що таке механічна та електрична стійкість проти спрацювань електричних апаратів? Що таке комутаційна здатність електричного апарата?

6. Які мікрокліматичні умови для роботи електричного апарата обумовлені в його типі або технічній характеристиці? Чим визначається надійність роботи електричного апарата?

7. Що таке контакт у контактному апараті? Яка деталь у контактному апараті називається контакт-деталлю? Як поділяють контакт-деталі контактних апаратів за можливістю їх переміщення між собою?

8. Як розрізняють режими роботи контактів електричних апаратів? Які матеріали використовують для виготовлення контактів? Якого типу контакти мають низьковольтні електричні апарати? Чим, як правило, супроводжується розмикання електричного кола зі струмом?

9. Яке призначення апаратів керування і регулювання? Які апарати керування називають електромагнітними контакторами? Які основні характеристики контактників і пускачів? Яку конструкцію мають контактники постійного струму? Яке конструктивне виконання контактників змінного струму? Які апарати керування відносять до магнітних пускачів? Якими вони можуть бути за принципом керування та яке їх конструктивне виконання?

## Лекція 13

### Автоматизоване керування електроприводами

План лекції

#### 1. Загальні відомості

#### 2. Системи автоматичного регулювання кутової швидкості ДПС НЗ.

#### 3. Системи автоматичного регулювання моменту ДПС НЗ

#### 4. Автоматичне регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів зміною напруги живлення з від'ємним зворотним зв'язком по швидкості

#### 5. Автоматичне частотне регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів

## 1. Загальні відомості

Одним із основних недоліків розімкнених систем регулювання кутової швидкості приводів постійного та змінного струму є невеликий діапазон регулювання, що пояснюється зменшенням коефіцієнта жорсткості механічних характеристик двигунів при параметричному регулюванні. У розімкнених системах неможливо також одержати високу стабільність регулювання, оскільки збурення з боку навантаження призводить до коливання кутових швидкостей. Отже, в розімкнених системах задана кутова швидкість не стабілізується і залежить від параметрів двигуна і характеру навантаження на його валу. У ряді випадків виникає необхідність задавати певні значення кутової швидкості і відповідні моменти двигуна при цьому, тобто здійснювати регулювання координат.

Усі зазначені недоліки розімкнених систем регулювання відсутні в замкнених системах. У таких системах передбачаються керовані перетворювачі і регулятори, які дають можливість автоматично під дією зворотних зв'язків змінювати напругу, опір, частоту, струм та інші параметри.

Характерною ознакою замкненої системи є зворотні зв'язки, що з'єднують її вихід із входом. Вони можуть бути жорсткі і гнучкі.

4. Жорсткі зворотні зв'язки діють в усталеному і перехідному режимах, а гнучкі - лише в перехідному.

За впливом на вихідну величину зворотні зв'язки поділяють на від'ємні і додатні. При від'ємному зворотному зв'язку сигнал у вигляді напруги подається в протифазі до задаючого сигналу, а при додатному — узгоджено.

Для формування зворотних зв'язків використовують такі вихідні величини: струм, напругу, частоту обертання тощо. Аналіз і синтез замкнених систем регулювання координат електропривода виконуються методами теорії автоматичного регулювання.

## 2. Системи автоматичного регулювання кутової швидкості ДПС НЗ

Структурна схема замкненої системи автоматичного регулювання кутової швидкості з від'ємним жорстким зв'язком по кутовій швидкості зображена на рис. 5.1. Сигнал зворотного зв'язку в схемі формується за допомогою тахогенератора *ТГ*, з'єданого з валом двигуна *М*. Живлення двигуна — автономне від тиристорного перетворювача напруги *ПН*. На вхід системи подається задаючий сигнал кутової швидкості  $U_3$  та сигнал зворотного зв'язку  $k_{зи}\omega$ . На вході підсилювача формується різниця згаданих сигналів:

$$U_{ex} = U_3 - k_{зи}\omega \quad (5.1)$$

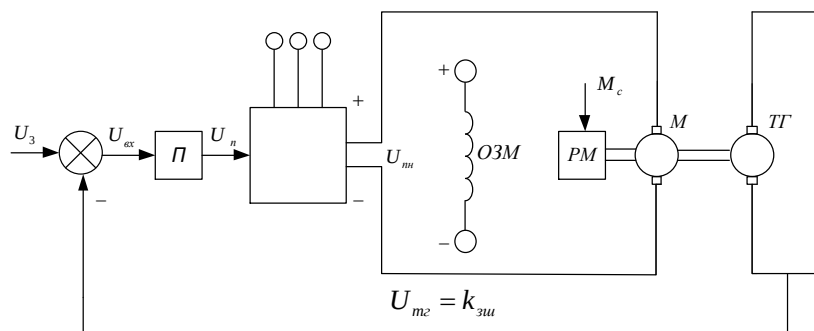


Рис. 5.1. Структурна схема системи автоматичного регулювання кутової швидкості з жорстким від'ємним зворотним зв'язком по кутовій швидкості

Принцип дії системи зі зворотним від'ємним зв'язком по швидкості полягає в тому, що при збільшенні навантаження на двигун *М* (рис. 5.1) зменшується кутова швидкість тахогенератора *ТГ* і, як наслідок, зменшується сигнал зворотного зв'язку  $k_{зи}\omega$ . Сигнал на вході і відповідно на виході підсилювача  $\Pi$  зростає, в результаті чого на виході перетворювача *ПН* напруга  $U_{ин}$  збільшується. Відбудеться автоматично компенсація зниження кутової швидкості.

У режимі неперервних струмів статична характеристика тиристорного перетворювача напруги близька до лінійної, а його динамічні властивості описуються рівнянням:

$$k'_n U_{ex} = (1 + T_n p) U_{nn} \quad (5.2)$$

де  $k'_n = U_{nn} / U_{ex}$  — коефіцієнт передачі перетворювача з підсилювачем;  $T_n$  — стала часу перетворювача ( $T_n \approx 0,01$  с).

З (5.1) і (5.2) отримуємо рівняння для швидкості ідеального холостого ходу двигуна:

$$k'_n (U_3 - k_{zu} \omega) = (1 + T_n p) \omega_0 \quad (5.3)$$

де  $k'_n = k_n / c_{ном}$ ,  $\omega_0 = U_n / c_{ном}$ ;  $c_{ном}$  — коефіцієнт ЕРС двигуна при номінальному магнітному потоці.

Рівняння електричної рівноваги для кола якоря в операторній формі має вигляд:

$$U_{nn} = E + i_{я} R_{я\Sigma} + L_{я\Sigma} p i_{я} \quad (5.4)$$

де  $R_{я\Sigma}$  — сумарний активний опір якірного кола;  $L_{я\Sigma}$  — сумарна індуктивність якірного кола.

Рівняння (5.4) можна записати як:

$$U_{nn} - E = R_{я\Sigma} (1 + T_e p) i_{я} \quad (5.5)$$

де  $T_e = L_{я\Sigma} / R_{я\Sigma}$  — електромагнітна стала часу.

Рівняння механічної характеристики електродвигуна при  $\Phi = \Phi_{ном}$  отримуємо із (5.5):

$$\beta_o (\omega_0 - \omega) = (1 + T_e p) M \quad (5.6)$$

де  $\beta_o = c^2 / R_{я\Sigma}$ .

Механічні перехідні процеси в електроприводі описуються рівнянням руху електропривода:

$$M_o - M_c = J p \omega = \beta_o T_m p \omega, \quad (5.7)$$

де  $T_m = J / \beta_o$  — електромеханічна стала часу.

На основі (5.1), (5.3), (5.6) і (5.7) розроблена структурно- алгоритмічна схема системи автоматичного регулювання швидкості ДПС НЗ, яка показана на рис. 5.2.

Рівняння (5.3) і (5.6) описують механічну характеристику електродвигуна в регульованому електроприводі. У результаті перетворень отримуємо:

$$\omega = \frac{k'_n U_3}{(T_n + 1) + k_{zu} k'_n} - \frac{(T_n + 1)(T_e + 1)}{\beta_o [(T_n + 1) + k_{zu} k'_n]} M, \quad (5.8)$$



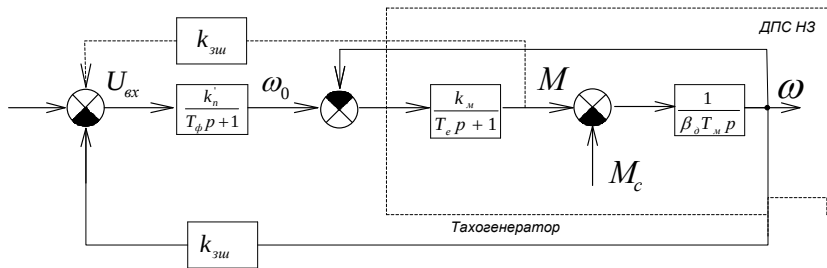


Рис. 5.2. Структурно-алгоритмічна схема системи автоматичного регулювання швидкості ДПС НЗ

При  $p = 0$  рівняння (5.8) представляє рівняння статичної механічної характеристики:

$$\omega = \frac{k'_n U_3}{1 + k_{зи} k'_n} - \frac{1}{\beta_\partial (1 + k_{зи} k'_n)} M = \omega_{0зи} - \frac{M}{\beta_{зи}} \quad (5.9)$$

Як випливає із виразу (5.9), збільшення коефіцієнта зворотного зв'язку  $k_{зи}$  при однакових інших умовах призводить до зменшення кутової швидкості ідеального холостого ходу та збільшення жорсткості характеристики (рис. 5.3). Механічна характеристика 1 є природною за відсутності зворотного зв'язку, тобто в розімкненій системі. Задаючий сигнал при цьому  $U_{30}$  такої величини, при якій напруга перетворювача ПН дорівнює номінальній. При введенні сигналу зворотного зв'язку знаменник правої частини виразу (5.9) збільшується і, як відзначалося, зменшується швидкість ідеального холостого ходу при одночасному збільшенні жорсткості механічної характеристики 2. Для підтримання кутової швидкості необхідно збільшити задаючий сигнал  $U_3$  (характеристика 3). При досить великому значенні загального коефіцієнта підсилення механічна характеристика наближається до абсолютно жорсткої, що дає можливість збільшити діапазон регулювання до 2000 : 1.

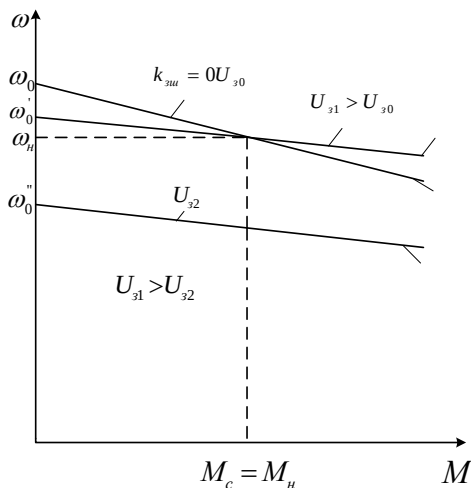


Рис.5.3. Механічні характеристики ДПС НЗ замкненої системи з від'ємним зворотним зв'язком по кутовій швидкості

Оскільки  $k'_n k_{зи} \neq \infty$ , то в системі існує статична похибка регулювання, величина якої залежить від коефіцієнта зворотного зв'язку по швидкості. Тому доцільно вводити додатний зворотний зв'язок по моменту (струму якоря).

13. Структурна схема замкненої системи з додатним зворотним зв'язком зображена на рис. 5.4.

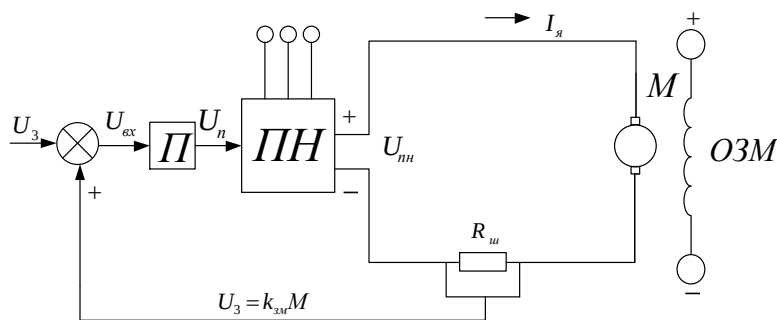


Рис 5.4. Структурна схема системи автоматичного регулювання кутової швидкості з жорстким зворотним зв'язком по струму

Вхідний сигнал на підсилювач П в схемі з додатним зворотним зв'язком визначається залежністю:

$$U_{ex} = U_3 + k_{3M} M. \quad (5.10)$$

Тоді для швидкості ідеального холостого ходу двигуна можна записати:

$$k'_n (U_3 + k_{3M} M) = (1 + T_n p) \omega_0 \quad (5.11)$$

а механічна характеристика має вигляд:

$$\omega = \frac{k'_n U_3}{T_n + 1} - \frac{(T_n + 1)(T_e + 1) - \beta_o k'_n k_{3M}}{\beta_o (T_n + 1)} M \quad (5.12)$$

Статична механічна характеристика описується рівнянням:

$$\omega = k'_n U_3 - \frac{1 - \beta_o k'_n k_{3M}}{\beta_o} M \quad (5.13)$$

Якщо вважати добуток коефіцієнтів  $\beta_o k'_n k_{3M}$  незмінним, то залежність (5.13) є лінійною. Змінюючи величину опору  $R_{ш}$ , змінюють величину коефіцієнта зворотного зв'язку. Як додатковий опір  $R_{ш}$  іноді використовують обмотку додаткових полюсів та компенсаційну обмотку електродвигуна.

Стабілізація напруги на виході перетворювача ПН здійснюється за рахунок подачі на вхід підсилювача, узгодженого із задаючим, сигналу зворотного зв'язку. При збільшенні навантаження напруга на затискачах двигуна М знижується за рахунок втрат її в якорному колі. При цьому збільшується спад напруги на опорі  $R_{ш}$ , сигнал з якого узгоджено подається на вхід підсилювача. Напруга на виході автоматично збільшується. Жорсткість механічних характеристик у цій замкненій системі залежить від сигналу зворотного зв'язку. Так, при  $k_{3M} = 0$  має місце механічна характеристика 1 розімкненої системи (рис. 5.5). При співвідношенні  $\beta_o k'_n k_{3M} < 1$  характеристика 2 має більшу жорсткість, ніж характеристика 1. При  $\beta_o k'_n k_{3M} = 1$  характеристика 3 має безкінечно велику жорсткість (паралельна осі моментів) і, нарешті, при  $\beta_o k'_n k_{3M} = 1$  характеристика 4 має додатний коефіцієнт жорсткості. Слід відзначити, що в реальних замкнених системах з додатним зворотним зв'язком коефіцієнт передачі  $\beta_o k'_n k_{3M} > 1$  при певному значенні струму якоря (моменті) зменшується і тому механічні характеристики втрачають лінійність (характеристика 5). Ось чому зворотні додатні зв'язки по струму використовують у поєднанні з від'ємними зворотними зв'язками по швидкості.

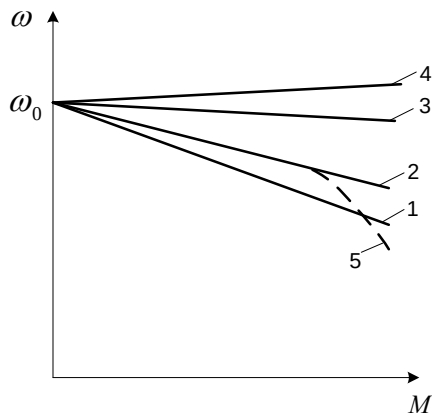


Рис.5.5. Механічні характеристики ДПС НЗ в замкненій системі з додатним зворотним зв'язком по струму:

$$1 - k_{zm} = 0; \quad 2 - \beta_o k_n' k_{zm} < 1; \quad 3 - \beta_o k_n' k_{zm} = 1; \\ 4 - \beta_o k_n' k_{zm} > 1; \quad 5 - \beta_o k_n' k_{zm} = \text{var}$$

У комбінованій системі регулювання швидкість ідеального холостого ходу двигуна визначається рівнянням:

$$k_n'(U_3 - k_{zm}\omega + k_{zm}M) = (1 + T_n p)\omega_0 \quad (5.14)$$

а статична механічна характеристика має вигляд:

$$\omega = \frac{k_n' U_3}{1 + k_n' k_{zu}} - \frac{1 - \beta_o k_n' k_{zm}}{\beta_o (1 + k_n' k_{zu})} M \quad (5.15)$$

Застосування додатного зворотного зв'язку по моменту в комбінованій системі регулювання швидкості дає можливість до нескінченності збільшити модуль жорсткості механічної характеристики шляхом підбору  $k_{zm}$  із умови  $\beta_o k_n' k_{zm} = 1$ . Таким чином, виключається статична похибка при збереженні динамічних показників регулювання, які визначаються коефіцієнтом підсилення і зворотного зв'язку по швидкості.

### 3. Системи автоматичного регулювання моменту ДПС НЗ

У системі автоматичного регулювання моменту ДПС НЗ застосовується від'ємний зворотний зв'язок по моменту (струму якоря). На вході підсилювача П (рис. 5.6) формується різниця задаючого сигналу  $U_3$  та сигналу зворотного зв'язку  $k_{zm}M$

$$U_{ex} = U_3 - k_{zm}M \quad (5.16)$$

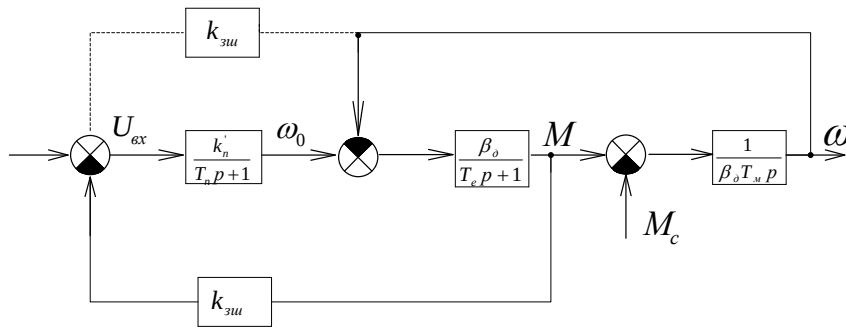


Рис. 5.6. Структурно-алгоритмічна схема системи автоматичного регулювання моменту

Для даної системи можна записати:

$$k'_n (U_3 k_{зм} M) = (1 + T_n p) \omega_0 \quad (5.17)$$

$$\beta_o (\omega_0 - \omega) = (1 + T_e p) M \quad (5.18).$$

Розв'язавши (5.17) і (5.18) відносно  $\omega_0$ , отримуємо рівняння механічної характеристики електродвигуна:

$$\omega = \frac{k'_n U_3}{T_n + 1} - \frac{(T_n + 1)(T_e + 1) + \beta_o k'_n k_{зм}}{\beta_o (T_n + 1)} M \quad (5.19)$$

Статична механічна характеристика описується рівнянням:

$$\omega = k'_n U_3 - \frac{1 + \beta_o k'_n k_{зм}}{\beta_o} M \quad (5.20)$$

Як впливає із виразу (5.20), збільшення коефіцієнта зворотного зв'язку по моменту  $k_{зм}$  призводить до зменшення жорсткості механічної характеристики (рис. 5.7). При необмеженому його зростанні жорсткість механічної характеристики наближається до нуля.

У даній системі статична точність регулювання моменту обмежена сильним збуренням, викликаним зміною швидкості. Чим менший коефіцієнт зворотного зв'язку по моменту, тим зміна швидкості істотніше впливає на момент двигуна.

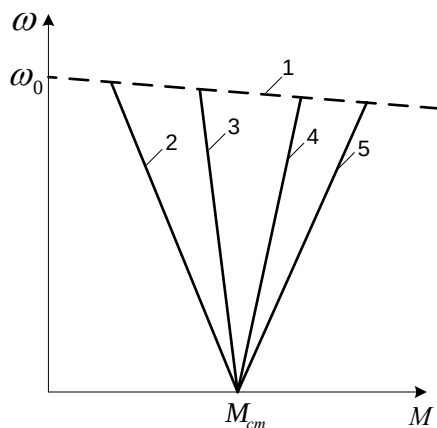


Рис.5.7. Механічні характеристики ДПС НЗ:

1-природна; 2-з від'ємним зворотним зв'язком по моменту;

3,4,5-з від'ємним зворотним зв'язком по моменту і додатним зворотним зв'язком по швидкості при

$$k'_n k_{зи} < 1 \quad (3), \quad k'_n k_{зи} = 1 \quad (4), \quad k'_n k_{зи} > 1 \quad (5)$$

Тому для зменшення залежності моменту від швидкості двигуна вводять додатний зворотний зв'язок по швидкості, який показаний на рис. 5.6 пунктирною лінією. Рівняння статичної механічної характеристики для комбінованої системи регулювання моменту отримують із рівнянь:

$$k'_n (U_3 + k_{зи} \omega - k_{зм} M) = \omega \quad (5.21)$$

$$\beta_o (\omega_0 - \omega) = M, \quad (5.22)$$

де  $k_{зи}$  — коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості.

Звідки

$$\omega = \frac{k'_n U_3}{1 - k'_n k_{зи}} - \frac{1 + \beta_o k'_n k_{зм}}{\beta_o (1 - k'_n k_{зи})} M \quad (5.23)$$

Як випливає із (5.23), модуль статичної жорсткості механічної характеристики в замкненій системі залежить від коефіцієнта зворотного зв'язку по швидкості. При зростанні  $k_{зи}$  жорсткість механічної характеристики зменшується і при критичному значенні коефіцієнта додатного зворотного зв'язку по швидкості  $k_{зи.кр} = 1/k'_n$  дорівнює нулю. При цьому статична похибка, викликана зміною швидкості, виключається і система забезпечує регулювання моменту без введення у коло регулювання регуляторів з інтегральною характеристикою. Подальше збільшення коефіцієнта зворотного зв'язку по швидкості призводить до зміни знака жорсткості механічної характеристики.

#### 4. Автоматичне регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів зміною напруги живлення з від'ємним зворотним зв'язком по швидкості

Замкнена система регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів дає можливість одержати якісно нові характеристики електропривода. Якщо в розімкненій системі робота двигуна при ковзанні, більшому за критичне, є статично нестійкою, то в замкненій системі при згаданому ковзанні робота двигуна може бути стійкою. Як видно з рис. 5.11, б), переважувальна здатність двигуна в замкненій системі лишається високою, жорсткість характеристик стала, плавність регулювання висока, діапазон регулювання має значення до 20. Схема системи регулювання кутової швидкості проста. Але разом з цим у неї є суттєвий недолік. При низьких частотах обертання двигуна зростають значення ковзання і, як наслідок, великі втрати потужності. У тривалому режимі роботи двигун буде перегріватись. Якщо при цьому використовується двигун із фазним ротором і в роторне коло увімкнений додатковий резистор, то втрати енергії винесені за межі двигуна. Отже, він не буде перегріватися.

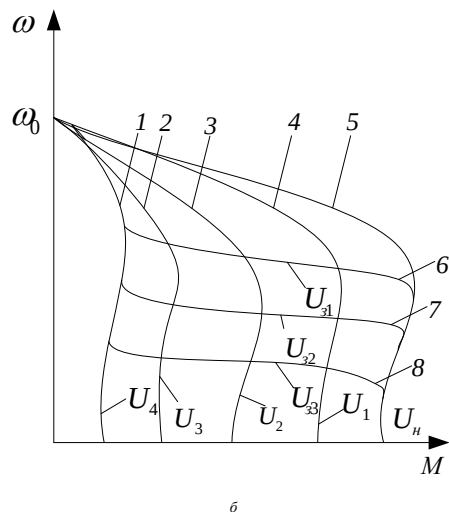
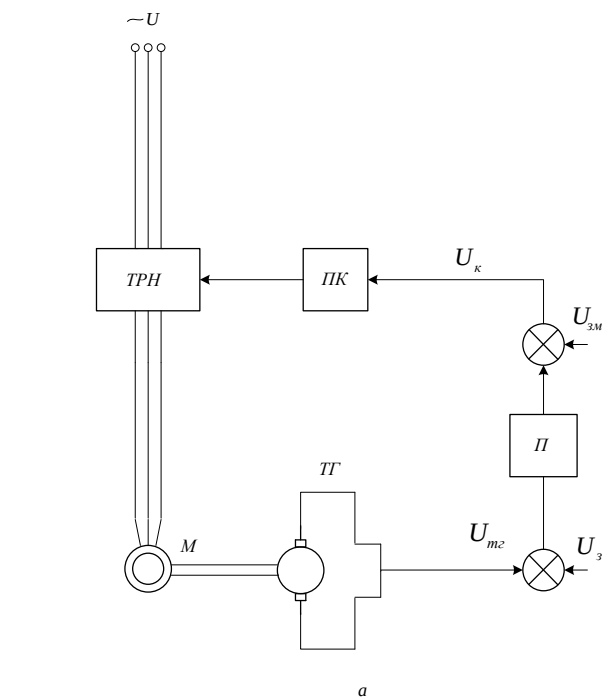


Рисунок 5.11. Регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна зміною напруги на статорі в замкненій системі

а- схема регулювання; б- механічні характеристики:

а- 1-5-в розімкненій системі  $U_{31} > U_{32} > U_{33}$ ,  $U_n > U_1 > U_2 > U_3 > U_4$ ; 6-8-в замкненій системі П-підсилювач; ПК-пристрій керування

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором у замкнених системах регулювання кутової швидкості зміною напруги на статорній обмотці використовують в установках, де низькі швидкості відпрацьовуються короткочасно перед зупинкою механізму. У тривалому режимі даний спосіб регулювання не використовується внаслідок перегрівання двигуна при великих значеннях ковзання.

19. Тиристорні регулятори напруги можуть мати реверсивне виконання, а також здійснювати динамічне гальмування.

Напруга на виході тиристорного перетворювача напруги несинусоїдальна, залежить від кута регулювання  $\alpha$  та від кута активно-індуктивного навантаження  $\omega$ , яким для тиристорного перетворювача напруги є асинхронний двигун при певних ковзаннях. Електромагнітний момент двигуна визначається першою гармонікою напруги, а впливом вищих гармонік можна знехтувати.

Статичні характеристики тиристорного перетворювача напруги (рис. 5.12) є нелінійними та неоднозначними у зв'язку із суттєвою залежністю напруги від кута навантаження. При  $s_k < s < 1$

зміни кута  $\varphi$  є несуттєвими і знаходяться у межах  $40-60^\circ$ . Для цієї області статичну характеристику перетворювача можна лінеаризувати:

$$U_n = k_n U_{ex} = k_n (U_3 - k_{зи} \omega) \quad (5.27)$$

де  $k_n$  - коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача напруги,  $k_{зи}$  — коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості.

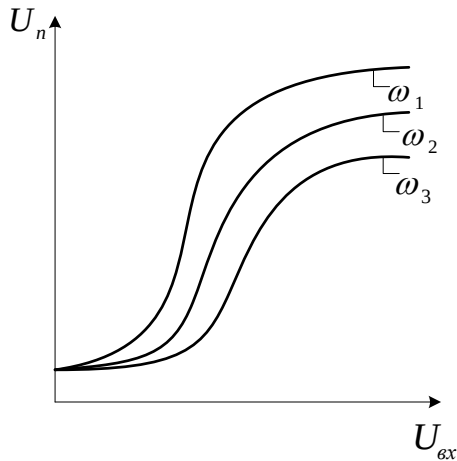


Рис. 5.12. Статичні характеристики тиристорного перетворювача напруги

Момент асинхронного електродвигуна пропорційний квадрату напруги. Але для режимів малих відхилень від точки статичної рівноваги дану залежність можна лінеаризувати:

$$M = k_m U. \quad (5.28)$$

Підставивши (5.28) у (5.27), отримаємо рівняння механічної характеристики електродвигуна:

$$\omega = \frac{U_3}{k_{зи}} - \frac{M}{k_m k_n k_{зи}} = \omega_{03} - \frac{M}{\beta_3} \quad (5.29)$$

Таким чином, при прийнятих допущеннях у замкненій системі формується лінійна механічна характеристика зі швидкістю ідеального холостого ходу і жорсткістю, які визначаються коефіцієнтом зворотного зв'язку по швидкості  $k_{зи}$ . При досить великих значеннях  $k_{зи}$  рівняння (5.29) задовільно описує реальну механічну характеристику. Як показано на рис. 5.11, б), відмінності виявляються лише у режимі, близькому до холостого ходу, і при значеннях напруги, близьких до номінальної.

## 5. Автоматичне частотне регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів

Частотно-регульовані приводи мають високі показники: діапазон регулювання, плавність, коефіцієнт жорсткості механічних характеристик. Робота на штучних механічних характеристиках відбувається при ковзаннях, близьких до номінальних. Отже, втрати ковзання в роторі не перевищують номінальних.

У замкненій системі регулювання частотний привод автоматично підтримує переважувальну здатність та частоту обертання в заданих межах.

Структурна схема замкненої системи автоматичного частотного регулювання зображена на рис. 5.13. У схемі використовується перетворювач частоти з автономним інвертором струму АІС, що дає можливість без доповнення схеми переводити двигун  $M$  у режим рекуперативного гальмування. Схема має від'ємний зворотний зв'язок по кутовій швидкості (сигнал  $U_\omega$  та від'ємний зворотний зв'язок по струму (сигнал  $U_i$ ), що формується датчиком струму ДС. Керований

випрямляч  $KB$  та автономний інвертор струму  $AIC$  мають відповідні системи керування  $CKB$  та  $CKI$ .

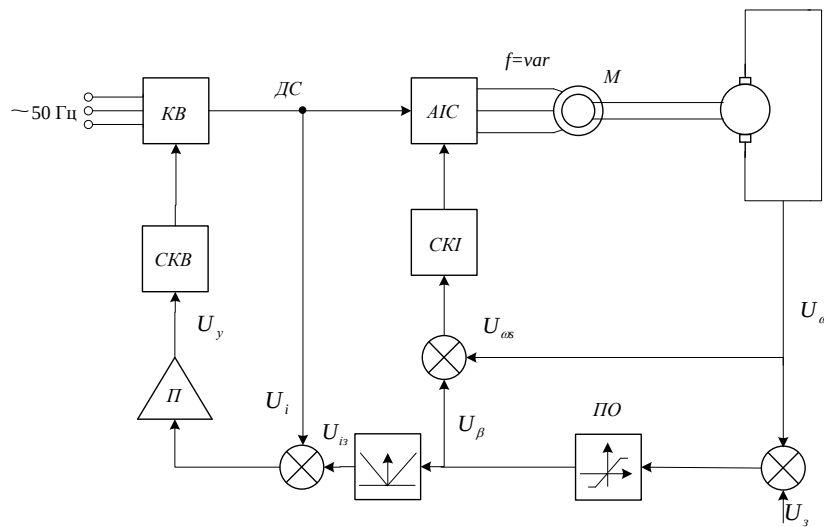


Рис.5.13. Спрощена схема замкненої системи частотного регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна

Частота струму регулюється задаючим сигналом  $U_3$ . Різниця сигналів  $U_3$  і  $U_w$  дає сигнал абсолютного ковзання  $U_\beta$ , який, пройшовши через пристрій обмеження  $ПО$ , додається до сигналу  $U_w$ , і в результаті формується сигнал  $U_{os}$  на вході  $CKI$ . Крім того, сигнал  $U_p$  після функціонального перетворювача  $\Phi\P$  створює задаючий сигнал по струму  $U_{i3}$ . Останній разом із сигналом зворотного зв'язку по струму  $U_\beta$  надходить через підсилювач  $\Pi$  на вхід системи керування вентилями у вигляді сигналу  $U_\gamma$ .

Пристрій обмеження  $ПО$  формує вихідний сигнал  $U_\beta$ , лінійний при певних значеннях задаючого сигналу і сигналу зворотного зв'язку. При різкому зростанні  $U_3$  або перевантаженнях двигуна  $ПО$  обмежує сигнал  $U_\beta$ , а значить і  $U_{i3}$ . У цьому режимі обмежується момент, і характеристика двигуна стає абсолютно м'якою.

При частотному регулюванні швидкості необхідно змінювати напругу для забезпечення незмінною перевантажувальної здатності двигуна та формування рівномірно прискореного протікання перехідних процесів. Тому система регулювання повинна містити контур регулювання моменту.

У даному випадку система регулювання містить регулятор

швидкості та від'ємний зворотний зв'язок по швидкості. Структурно-алгоритмічна схема представлена на рис. 5.14. У ній у передаточній функції пропорційного регулятора врахована мала стала часу фільтру  $T\phi$ , а передаточна функція лінеаризованого асинхронного двигуна отримана з рівняння:

$$(1 + T_e p)M = k_m U \quad (5.30)$$

----- де  $T_e = \frac{1}{2\pi f s_k}$  — електромагнітна стала часу асинхронного двигуна.



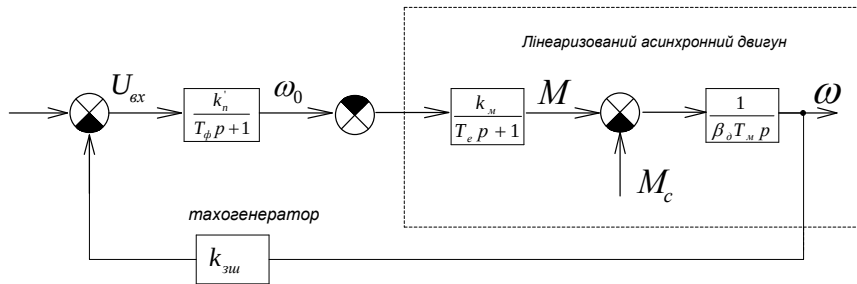


Рис.5.14. Структурно-алгоритмічна схема системи автоматичного регулювання швидкості асинхронного двигуна при частотному регулюванні

За допомогою структурно-алгоритмічної схеми системи автоматичного регулювання швидкості (рис. 5.14) можна записати:

$$(1 + T_\phi p)(1 + T_e p)M = k_p k_m (U_z - k_{zh} \omega) \quad (5.31)$$

звідки при  $p = 0$  отримаємо рівняння статичної механічної характеристики:

$$\omega = \frac{U}{k} - \frac{M}{k_m k_p k_{zh}} = \omega_{0z} - \frac{M}{\beta} \quad (5.32)$$

Таким чином, при прийнятих допущеннях у замкненій системі частотного регулювання швидкості формується лінійна механічна характеристика зі швидкістю ідеального холостого ходу і жорсткістю, які визначаються коефіцієнтом зворотного зв'язку по швидкості  $k_{zh}$

Орієнтовні механічні характеристики при частотному регулюванні кутової швидкості зображені на рис. 5.15. Діапазон регулювання становить близько 30:1.

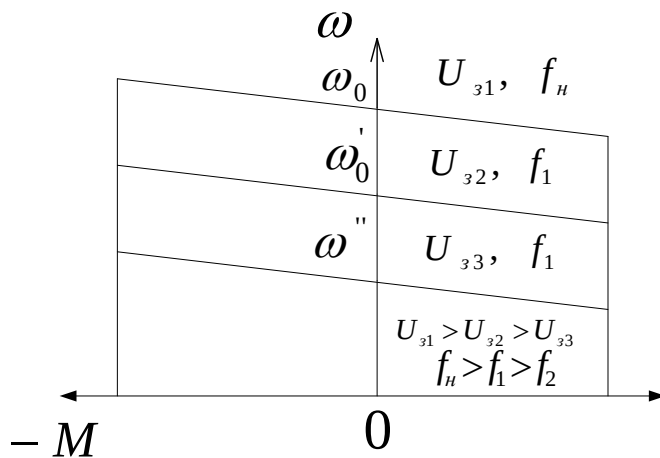


Рис. 5.15. Механічні характеристики асинхронного двигуна в замкненій системі при частотному регулюванні

#### Питання для самоконтролю.

1. Що таке керування електроприводом?
2. Як розрізняють керування електроприводами в залежності від участі людини в діях, спрямованих на їхні керуючі пристрої?
3. Яке керування електроприводом називають не автоматичним (ручним)?
4. Які недоліки має неавтоматичне (ручне) керування?
5. Яке керування електроприводом називають автоматизованим?
6. Яке керування електроприводом називають автоматичним?
7. Що дає автоматичне керування електроприводами?
8. Які апарати, пристрої та елементи використовуються в системах автоматичного керування електроприводами?

9. Що розуміють під системою автоматичного керування електроприводом?

10. Які бувають системи автоматичного керування приводом залежно від того, як змінюється заданий режим роботи зі зміною збурюючої дії?

#### Лекція 14

#### Вибір електропривода в цілому.

##### План лекції

1. Вибір електродвигунів за потужністю для тривалого режиму роботи

2. Обґрунтування можливості застосування методів середніх втрат потужності та еквівалентних величин

3. Метод еквівалентного моменту

4. Вибір двигунів за потужністю для короткочасного режиму роботи

5. Вибір двигунів за потужністю для повторно короткочасного режиму роботи. Допустиме число вмикань асинхронного двигуна

#### 1. Вибір електродвигунів за потужністю для тривалого режиму роботи

**Незмінне навантаження.** Навантажувальна діаграма РМ з незмінним навантаженням зображена на рис.7.4.а. При відомій потужності РМ  $P_M$  розрахункова потужність двигуна  $P_{\text{дв.розр}}$  визначається :

$$P_{\text{дв.розр}} = \frac{K_{\text{зан}} P_M}{\eta_{\text{пер}}}, \quad (7.30)$$

де  $K_{\text{зан}}$  — коефіцієнт запасу;  $\eta_{\text{пер}}$  - ККД механічного передавального пристрою.

Номінальна потужність двигуна повинна бути не меншою за розрахункову, тобто:

$$P_{\text{дв.ном}} \geq P_{\text{дв.розр}}. \quad (7.31)$$

При виконанні цієї умови максимальне перевищення температури обмоток буде не вище гранично допустимого:  $\tau_{\text{max}} \leq \tau_{\text{доп}}$ .

Якщо навантажувальна діаграма РМ задана функцією  $M_c = f(t)$ , то потужність двигуна розраховується за формулою:

$$P_{\text{дв.розр}} = K_{\text{зан}} \frac{M_c \omega}{\eta_{\text{пер}}}, \quad (7.32)$$

де  $M_c$  - момент статичних опорів на приводному валу машини, Н·м;  $\omega$  – кутова швидкість приводного вала РМ, рад/с.

Потужності, споживані РМ при незмінному навантаженні, у багатьох випадках розраховуються за простими формулами. Так, потужність, кВт, для приводу насоса визначають з виразу:

$$P_M = \frac{Q \rho H g 10^{-3}}{\eta_{\text{нас}}}, \quad (7.33)$$

де  $Q$  – подача насоса, м<sup>3</sup>/с;  $\rho$  - густина рідини, що подається насосом, кг/м<sup>3</sup>;  $H$  – розрахунковий напір, м;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Потужність, кВт, для приводу вентилятора:

$$P_M = \frac{L p 10^{-3}}{\eta_v}, \quad (7.34)$$

де  $L$  – подача вентилятора, м<sup>3</sup>/с;  $p$  – напір вентилятора, Па;  $\eta$  – ККД вентилятора.

Потужність, споживана скребковим конвеєром при транспортуванні суцільним потоком:

$$P_M = Q g (L f \cos \alpha + H) 10^{-3}, \quad (7.35)$$

де  $Q$  — розрахункова продуктивність конвеєра, кг/с;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $H$ —висота підйому продукту, м;  $L$  —довжина конвеєра, м;  $f_c$  — коефіцієнт опору рухові;  $\alpha$  — кут нахилу конвеєра.

У тому випадку, якщо пусковий момент (момент зрушення) робочої машини дуже великий, необхідна перевірка вибраного двигуна за умовами пуску. Двигун успішно запуститься, якщо:

$$M_n = M_{ном} M_n^* \geq (1,2...1,3) M_{с.зв.}, \quad (7.36)$$

де  $M_n$ ,  $M_{ном}$  — відповідно пусковий і номінальний моменти двигуна, Н·м;  $M_n^*$  — кратність пускового моменту;  $M_{с.зв.}$  —зведений до вала двигуна, момент зрушення РМ, Н·м.

Для приводів з великим коефіцієнтом інерції необхідна також перевірка двигуна на нагрівання під час пуску. З цією метою визначають час пуску привода  $t_n$  і порівнюють з допустимим часом пуску  $t_{дон}$  за умовою:

$$t_n \leq t_{дон}. \quad (7.37)$$

Перевірити двигун на нагрівання під час пуску можна й іншим способом. Перегрівання двигуна понад допустиму температуру не буде при умові:

$$\tau_{дон} \geq V_t t_n, \quad (7.38)$$

де  $\tau_{дон}$  - допустиме перевищення температури обмотки над температурою охолоджуючого середовища, °C;  $V_t$  - швидкість наростання температури обмотки при загальмованому роторі (якорі), °C/с;  $t_n$  - час пуску приводу, с.

Для деяких серій двигунів величина  $\mathcal{G}_i$  наводиться у довідниках. Орієнтовно швидкість наростання температури обмоток двигуна можна визначити за формулою:

$$V_t = \frac{(K_i j)^2}{200}, \quad (7.39)$$

де  $j$  – щільність струму в обмотці з мідного проводу при номінальному режимі, А/мм<sup>2</sup>;  $K_i$  - кратність пускового струму.

**Змінне навантаження.** Вибір ЕД за потужністю для тривалого режиму роботи зі змінним навантаженням, коли послідовно змінюються робочі цикли і паузи, являє собою складну задачу. Дійсно, якщо вибрати ЕД за максимальним значенням навантаження, то ЕД в тепловому відношенні буде недовантаженим, навпаки, вибір ЕД за мінімальним значенням навантаження призведе до його перегрівання. Як перший, так і другий випадки не можуть бути раціональним розв'язанням поставленої задачі.

Вибір потужності за середніми значеннями навантаження допустимий тільки при незначних коливаннях навантаження. В іншому випадку ЕД може перегріватися, оскільки при цьому не враховують квадратичну залежність втрат потужності в ЕД від струму, що протікає в обмотках.

Відомо, що довговічність ізоляції залежить від її температури, тому при змінному навантаженні потужність ЕД слід вибирати таку, щоб у момент максимальних навантажень температура ізоляції обмоток не перевищувала допустимої:

$$\tau_{max} \leq \tau_{don} \quad (7.40)$$

Тому для тривалого режиму зі змінним навантаженням спочатку орієнтовано розраховують потужність (момент) на валу ЕД за середнім значенням статичної діаграми навантаження РМ, помноживши його на коефіцієнт, який наближено враховує перевищення потужності (моменту) ЕД над середньою потужністю (моментом) навантаження:

$$P_{ном} \geq (1,2...1,3)P_{ср.дгр} = (1,2...1,3) \frac{\sum_{i=1}^n P_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (7.41)$$

або

$$M_{ном} \geq (1,2...1,3)M_{ср.дгр} = (1,2...1,3) \frac{\sum_{i=1}^n M_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}, \quad (7.42)$$

де  $P_{ср.дгр}$ ,  $M_{ср.дгр}$  відповідно номінальні значення потужності і моменту двигуна;  $P_{ср.дгр}$ ,  $M_{ср.дгр}$  — відповідно середнє значення потужності і моменту за навантажувальною діаграмою.

Користуючись каталожними даними попередньо вибраного двигуна і даними робочої машини, розраховують перехідні процеси в приводі і будують навантажувальну діаграму двигуна. За допомогою останньої можна розрахувати і побудувати криву нагрівання двигуна, за якою визначають максимальне перевищення температури обмотки  $\tau_{max}$ . Якщо мати на увазі, що усталене перевищення температури обмотки над температурою охолоджуючого середовища ЕД у такому режимі роботи можливе через велику кількість циклів, то метод остаточного вибору потужності ЕД за кривими нагрівання стає дуже трудомістким і малопридатним, тим більше, значення сталої нагрівання в каталожних даних двигунів не приводиться, а її обчислення занадто наближене.

На практиці для перевірки попередньо вибраного двигуна користуються простішими методами, до яких відносять метод середніх втрат потужності і метод еквівалентних значень величин (струму, потужності або моменту).

## **2. Обґрунтування можливості застосування методів середніх втрат потужності та еквівалентних величин**

Теоретично обґрунтувати правомірність цих методів можна, розглядаючи процес нагрівання ЕД, який працює в тривалому режимі зі змінним навантаженням.

Припустимо, що робочий цикл будь-якої РМ складається із  $n$  ділянок з навантаженням  $P_1, P_2, \dots, P_n$  на проміжках часу  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , (рис.7.5)

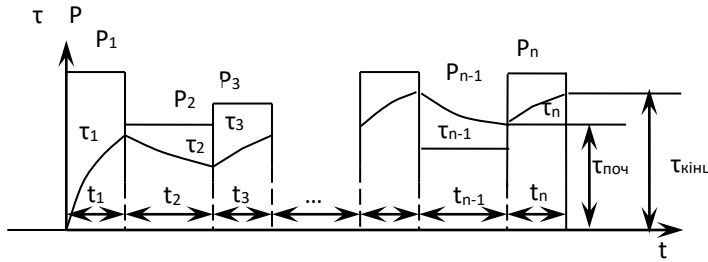


Рис. 7.5. Графік нагрівання двигуна у тривалому режимі змінного навантаження

Тривалість одного циклу набагато менша сталої часу нагрівання

$T_n$  ЕД, а кількість робочих циклів і пауз, які повторюються, необмежена. Тоді, починаючи з деякого віддаленого циклу, процес нагрівання двигуна носитиме усталений характер, а це означає, що температура в кінці наступного циклу мало відрізняється від температури в кінці попереднього циклу. Знайдемо закон зміни температури ЕД в кінці кожної ділянки графіка втрат, показаного на рис.7.5. вважаючи, що стала часу нагрівання  $T_n$  і тепловіддача двигуна відомі, а температура навколишнього середовища за весь період роботи ЕД залишається сталою.

Перевищення температури ЕД в кінці першої ділянки графіка втрат, тобто за час  $t_1$ .

$$\tau_1 = \frac{\Delta P_1}{A} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{T_n}} \right) + \tau_{поч} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_n}}. \quad (7.43)$$

в кінці другої ділянки

$$\begin{aligned} \tau_2 &= \frac{\Delta P_2}{A} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_2}{T_n}} \right) + \tau_1 \cdot e^{-\frac{t_2}{T_n}} = \\ &= \frac{\Delta P_2}{A} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_2}{T_n}} \right) + \frac{\Delta P_1}{A} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{T_n}} \right) \cdot e^{-\frac{t_2}{T_n}} + \\ &+ \tau_{поч} \cdot e^{-\frac{(t_1+t_2)}{T_n}}, \end{aligned} \quad (7.44)$$

Нехтуючи відхиленням перевищення температури у середині циклу, виразимо максимальне перевищення температури ЕД в кінці віддаленого циклу через середнє за величиною і тією ж

тривалістю за часом втрат, тобто при  $\tau_{кінець} = \frac{\Delta P_{cp}}{A}$  одержимо:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_{cp}}{A} \left( 1 - e^{-\frac{t_y}{T_n}} \right) &= \frac{\Delta P_1}{A} \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{T_n}} \right) e^{-\frac{t_y - t_1}{T_n}} + \frac{\Delta P_2}{A} \left( 1 - e^{-\frac{t_2}{T_n}} \right) e^{-\frac{t_y - t_1 - t_2}{T_n}} + \dots + \\ &+ \frac{\Delta P_{n-1}}{A} \left( 1 - e^{-\frac{t_{n-1}}{T_n}} \right) e^{-\frac{t_y - t_1 - t_2 - \dots - t_{n-1}}{T_n}} + \frac{\Delta P_n}{A} \left( 1 - e^{-\frac{t_n}{T_n}} \right), \end{aligned} \quad (7.45)$$

Із рівняння (7.45) видно, що нагрівання ЕД викликане втратами при роботі в тривалому режимі зі змінним навантаженням можна замінити таким же нагріванням, але при сталому тривалому навантаженні. На цьому положенні базується метод визначення потужності ЕД за середніми втратами потужності і метод еквівалентного струму, моменту або потужності.

Використовуючи порядок розкладання в ряд Маклорена показникової функції вигляду  $e^{-y} = 1 - y + \frac{y^2}{2!} - \frac{y^3}{3!} + \dots + \frac{(-y)^n}{n!}$ , що стоять у лівій і правій частинах рівняння (7.45), та обмежуючись двома складовими цього ряду, з огляду на малість інших  $\left(e^{-y} \approx 1 - \frac{y}{1!}\right)$ , після перетворень вираз матиме вид:

$$\frac{\Delta P_{cp} t_u}{AT_n} = \frac{\Delta P_1 t_1}{AT_n} + \frac{\Delta P_2 t_2}{AT_n} + \dots + \frac{\Delta P_n t_n}{AT_n}, \quad (7.46)$$

звідки

$$\Delta P_{cp} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}, \quad (7.47)$$

де  $y = \frac{t}{T_n}$  – відношення тривалості циклу або його частини до сталої часу нагрівання ЕД.

Вираз (7.43) використовують при виборі потужності ЕД з незалежною вентиляцією та самовентиляцією, якщо останні працюють з постійною швидкістю. Якщо ЕД з самовентиляцією працюють із змінною швидкістю (пуск, гальмування, зупинка), необхідно враховувати вплив погіршення умов охолодження на номінальну потужність ЕД.

Відомо, що стала часу нагрівання при зменшенні частоти обертання або при зупинці двигуна збільшується, оскільки зменшується тепловіддача.

Значення коефіцієнтів зміни тепловіддачі при перехідних процесах  $\beta_{n,n}$  і при зупинці  $\beta_0$  визначаються відповідно до (7.14) і (7.15).

При врахуванні коефіцієнтів зміни тепловіддачі формула для визначення середніх втрат потужності, що відповідають графіку (рис.7.6), має вигляд:

$$\Delta P_{cp} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \Delta P_3 t_3 + \Delta P_4 t_4}{\beta_{n,n} (t_1 + t_3) + t_2 + \beta_0 t_0}, \quad (7.48)$$

де  $P_4 = 0$ ;  $\Delta P_4 \cdot t_4 = 0$ ;  $t_4 = t_0$ ;  $\beta_{n,n} = \frac{1 + \beta_0}{2}$ ;  $t_1$  і  $t_3$  – відповідно час пуску і гальмування;  $t_2$  і  $t_4$  – відповідно час роботи і паузи.

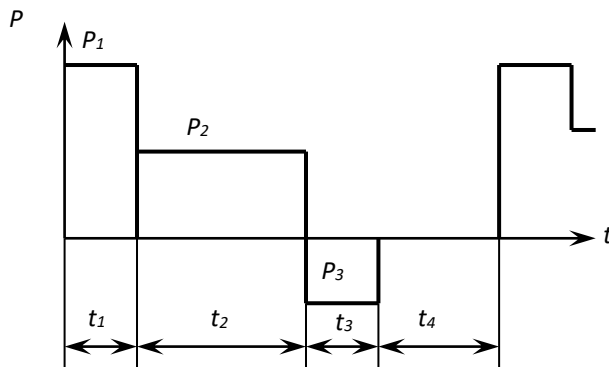


Рис. 7.6. Графік робочого циклу

Для номінального режиму роботи ЕД справедливий вираз  $\tau_{don} = \frac{\Delta P_{ном}}{A}$ . Якщо ЕД вибрано правильно, то виконується умова:

$$\Delta P_{cp} \leq \Delta P_{ном}. \quad (7.49)$$

При цьому середнє перевищення температури двигуна буде не більшим за допустиме  $\tau_{cp} \leq \tau_{дон}$ . При виконанні цієї умови перевірку ЕД за нагріванням закінчують. Якщо середні втрати за цикл виявляються більшими за номінальні або набагато меншими ( $\Delta P_{cp} \ll \Delta P_{ном}$ ), це значить, що у першому випадку двигун вибраний заниженої потужності і при роботі він перегріватиметься. У другому випадку потужність двигуна завищена. В обох випадках необхідно вибрати інший ЕД і повторити розрахунки  $\Delta P_{cp}$ .

Методика перевірки потужності попередньо вибраного двигуна за методом середніх втрат:

1. Користуючись навантажувальною діаграмою РМ  $P_c = f(t)$  або  $M_c = f(t)$ , каталожними даними попередньо вибраного ЕД за умовою (7.41) або (7.42) і зведеним до його вала моментом інерції системи ЕД-РМ, розраховують перехідні процеси ЕП і будують навантажувальну діаграму двигуна  $P = f(t)$ .

Якщо графік останньої має криволінійний характер, його замінюють ступінчастим (рис.7.7,а). При цьому середню потужність на трапецієподібних ділянках рис.7.7,в) визначають за формулою:

$$P_{cp,trap} = \frac{P_2 + P_3}{2}, \quad (7.50)$$

а на трикутних (рис.7.7,в):

$$P_{cp,трик} = \frac{P_1}{2}. \quad (7.51)$$

2. За формулою (6.19) визначають ККД ЕД при  $i$ -тих навантаженнях.
3. За формулою (6.20) розраховують втрати потужності для кожної ділянки діаграми навантаження і будують графік втрат.
4. За формулою (7.47) або (7.48) (залежно від режиму роботи) визначають середнє значення втрат і вибраний двигун перевіряють на нагрівання під час роботи за умовою (7.49).
5. Після перевірки теплового режиму вибраний ЕД треба перевірити на перевантажувальну здатність:

$$M_{max.diag} \leq M_{дон}, \quad (7.52)$$

де  $M_{max.diag}$  — максимальний момент із діаграми навантаження ЕД;  $M_{дон}$  — допустимий за перевантаженням момент двигуна.

Різні типи двигунів мають різну перевантажувальну здатність. Так для асинхронних двигунів максимальний допустимий момент визначається з умови можливого зниження напруги живлення на 10 %:

$$M_{дон} = K_U^2 M_{ном} M_k^* \geq M_{max.diag}, \quad (7.53)$$

де  $M_k^*$  - кратність максимального моменту ЕД;  $K_U$  - коефіцієнт запасу за встановленою потужністю електропривода, необхідний для врахування відхилення напруги живлення.

Перевантажувальна здатність синхронних двигунів знаходиться в межах (2,5-3)  $M_n$ , а при форсуванні збудження її можна збільшити до 4  $M_{ном}$ .

Перевантажувальна здатність двигунів постійного струму обмежується умовами комутації на якорі і залежить від конструкції двигуна, системи збудження і швидкості обертання якоря. Так для двигунів загального призначення незалежного і паралельного збудження наближено можна прийняти  $M_{доп} = (2,0..2,5)M_{ном}$ , а для послідовного і змішаного збудження  $M_{доп} = (2,5..3,0)M_{ном}$ .

6. Асинхронні короткозамкнені двигуни додатково перевіряються за умовами пуску при можливому зниженні напруги живлення на 10 %:

$$M_{n(u)} = K_U^2 M_{ном} M_n^* > M_{p.diag.}, \quad (7.54)$$

де  $M_{n(u)}$  – пусковий момент ЕД при зниженні напруги живлення;  $M_n^*$  – кратність пускового моменту;  $M_{p.diag.}$  – момент зрушення ВОРМ, визначений за механічною її характеристикою.

Метод середніх втрат є універсальним і найбільш точним методом перевірки вибраного двигуна за умовами нагрівання. Але користування цим методом ускладнюється тим, що залежність ККД від ступеня завантаження двигуна в довідковій літературі, як правило, не наводиться. Тому на практиці частіше користуються методами еквівалентних величин.

Еквівалентними називають такі незмінні в часі значення струму, моменту або потужності, які викликають у двигуні такі ж втрати потужності, як і реально змінні ці величини.

**Метод еквівалентного струму.** Відомо, що втрати потужності в електродвигунах поділяють на постійні та змінні. Постійні втрати не залежать від ступеня завантаження двигуна. Змінні втрати пропорційні квадратові струму головного кола: струмові якоря у двигунів постійного струму, струмові статора і ротора – в асинхронних машинах.

Виходячи з цього, можна записати, що при використанні двигуна постійного струму середня потужність, яка в ньому втрачається при завантаженні еквівалентним струмом, дорівнює:

$$\Delta P_{cp} = \Delta P_c + \Delta P_v = \Delta P_c + I_e^2 R, \quad (7.55)$$

де  $\Delta P_c$  – потужність постійних втрат;  $\Delta P_v$  – змінні втрати потужності;  $I_e$  – еквівалентний струм головного кола;  $R$  – опір обмотки двигуна.

Замінімо втрати потужності на кожній ділянці у виразі (7.47) через відповідні постійні та змінні складові:

$$\Delta P_c + I_e^2 R = \frac{(\Delta P_c + I_1^2 R)t_1 + (\Delta P_c + I_2^2 R)t_2 + \dots + (\Delta P_c + I_n^2 R)t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (7.56)$$



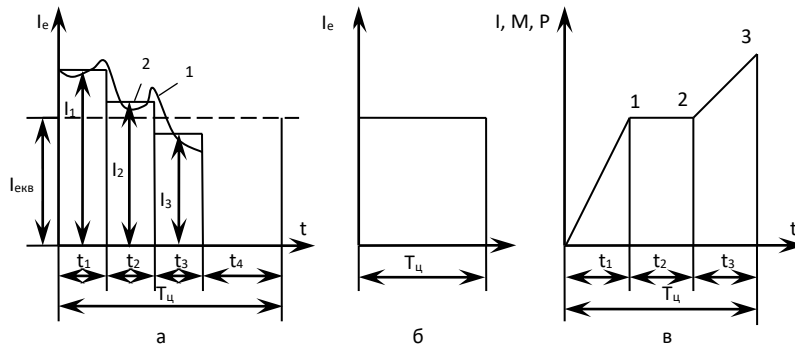


Рис. 7.7. а,б) діаграма еквівалентного струму; в) діаграма навантаження двигуна з ділянками трикутної, прямокутної і трапецієподібної форми.

Після нескладних перетворень виразу (7.56) знайдемо еквівалентний струм, що відповідає наведеному графіку на рис.7.7,б:

$$I_e = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + I_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot t_i}{T_u}}, \quad (7.57)$$

де  $n$  – число ділянок у робочому циклі;  $T_u = t_1 + t_2 + t_3$  – тривалість робочого циклу.

При погіршенні умов охолодження ЕД, наприклад при перехідних процесах і під час пауз, вводять коефіцієнти, які скорочують відповідні періоди, враховуючи тим самим погіршення умов охолодження.

$$T'_u = \beta_{n,n} \cdot (t_n + t_z) + \beta_o \cdot t_o + \sum t_{pi}, \quad (7.58)$$

де  $t_n$ ,  $t_z$ ,  $t_o$ ,  $t_{pi}$  – відповідно періоди, пуску гальмування, паузи, роботи на  $i$ -тій ділянці графіка.

Оскільки  $T'_u < T_u$ , то розрахункове значення еквівалентного струму зростає.

Якщо на графіку струм змінюється плавно, то його еквівалентне значення визначається за формулою:

$$I_e = \sqrt{\frac{\int_0^{T_u} I_{(t)}^2 dt}{T_u}}, \quad (7.59)$$

У тому випадку, коли графік навантажувальної діаграми ЕД представлений у вигляді кривої (рис.7.7, а, крива 1) або ламаної лінії, його слід перетворити у ступінчастий (рис.7.7,а, лінія 2) так, щоб останній охоплював таку ж площу, як і реальний. Для цього ділянки трапецієподібної форми (рис.7.7,в) замінюють еквівалентним прямокутником за виразом

$$I_e = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_2 I_3 + I_3^2}{3}}. \quad (7.60)$$

Еквівалентний струм ділянки трикутної форми (рис.7.7,в) знаходять з рівняння:

$$I_e = \frac{I_1}{\sqrt{3}}. \quad (7.61)$$

Перевірка попередньо вибраного ЕД за потужністю методом еквівалентного струму проводиться за умовою:

$$I_e \leq I_{ном}, \quad (7.62)$$

де  $I_{ном}$  – номінальний струму електродвигуна.

Якщо вираз (7.62) не виконується, то приймають ЕД більшої потужності і розрахунок повторюють. Після цього ЕД перевіряють на допустиме перевантаження (7.52) і (7.53). Коли умова по перевантаженню не виконується, потрібно взяти ЕД більшої потужності, але тоді за нагріванням він використовується не повністю.

При виведенні рівняння (7.57) прийняті допущення, що на всіх ділянках навантажувальної діаграми втрати потужності на збудження, втрати в сталі і механічні, а також опір головних кіл двигуна незмінні. З урахуванням указаних допущень метод еквівалентного струму можна застосовувати для перевірки на нагрівання майже всіх типів електродвигунів з достатньою для практики точністю. Метод дає велику похибку при перевірці двигуна з перемиканням головних кіл і АД з обмоткою ротора, виконаною у вигляді подвійної клітки або з глибоким пазом, що працюють у режимах з частими пусками і гальмуваннями (S3, S4 і S5).

Порівняно з методом середніх втрат перевагою методу еквівалентного струму є те, що при відомому навантаженні ЕД  $I = f(t)$  знайти струм значно легше, ніж втрати потужності. Однак метод еквівалентного струму потребує незмінності опору силового кола ЕД, а для АД – незмінності кутової швидкості, що гарантує сталість параметрів роторного кола.

**3. Метод еквівалентного моменту** доцільно застосовувати в тому випадку, коли вибір потужності ЕД бажано пов'язати безпосередньо з режимом роботи РМ, поклавши в основу графік статичного моменту  $M_c = f(t)$  і відповідний до нього графік моменту ЕД. Формулу для еквівалентного моменту виводять безпосередньо з формули еквівалентного струму за умови, що потік збудження практично не змінюється зі зміною навантаження. Помноживши ліву і праву частини виразу  $I_e$  на величину  $k \Phi_{ном}$ , матимемо вираз для еквівалентного моменту:

$$M_e = \sqrt{\frac{\sum_1^n M_i^2 t_i}{T_y}} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (7.63)$$

Якщо графік зміни моменту має вигляд нерівнобічної трапеції, то еквівалентний момент визначають аналогічно (7.60) за формулою:

$$M_e = \sqrt{\frac{(M_1^2 + M_1 \cdot M_2 + M_2^2)}{3}}, \quad (7.64)$$

де  $M_1, M_2$  - моменти, що відображені на діаграмі навантаження боковими сторонами трапеції.

Для трикутних ділянок графіка аналогічно (7.61):

$$M_e = \frac{M_1}{\sqrt{3}} \quad (7.65)$$

При правильному виборі ЕД повинна задовольнятися умова:

$$M_{ном} \geq M_{e.}, \quad (7.66)$$

тобто номінальний момент вибраного ЕД повинен дорівнювати або бути більшим за еквівалентний момент.

Зважаючи на вказані раніше обмеження, метод можна застосовувати для перевірки ДПС НЗ, якщо вони працюють з незмінним магнітним потоком. З певними допущеннями метод може бути використаний і для АД та синхронних двигунів, які працюють із навантаженням, близьким до номінального, тобто коли момент двигуна приблизно пропорційний струмові.

**Методом еквівалентної потужності** зручно користуватися при перевірці потужності електродвигунів, що працюють зі швидкістю, яка мало змінюється, тобто  $\omega = const = \omega_{ном}$ . У цьому випадку потужність пропорційна моменту:  $P = M\omega_{ном}$ . Коли кутова швидкість ЕД на окремих ділянках циклу мало змінюється, то нагрівання ЕД можна оцінити, використовуючи цей метод. Помноживши праву і ліву частину рівняння (7.63) на  $\omega_{ном}$ , одержимо вираз для визначення еквівалентної потужності  $P_e$ :

$$P_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{T_u}} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots + P_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}, \quad (7.67)$$

де  $P_e$  - еквівалентна потужність.

Двигун за потужністю вибраний правильно, якщо:

$$P_e \leq P_{ном}. \quad (7.68)$$

Метод еквівалентної потужності може бути використаний для перевірки на нагрівання синхронних і асинхронних двигунів, а також двигунів постійного струму паралельного або незалежного збудження, якщо вони працюють із номінальною або близькою до номінальної швидкістю і номінальним магнітним потоком.

Методом еквівалентної потужності можна скористатися і при змінній швидкості обертання.

Для цього потужність  $P_i$  при швидкості  $\omega_i$  потрібно привести до еквівалентної потужності  $P_{ei}$  при швидкості  $\omega_{ном}$ :

$$P_{ei} = P_i \frac{\omega_{ном}}{\omega_i} \quad (7.69)$$

і ввести в рівняння (7.67) замість  $P_1, P_2, \dots, P_n$ .

Якщо зі зміною швидкості обертання змінюється і тепловіддача двигуна, то в рівняння (7.67) слід також ввести коефіцієнт погіршення тепловіддачі  $\beta$ .

Тоді еквівалентна потужність визначається за формулою:

$$P_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left( P_i \frac{\omega_{ном}}{\omega_i} \right)^2 t_i}{\sum_{i=1}^m \beta_i t_i}}. \quad (7.70)$$

Порядок розрахунку потужності двигуна методом еквівалентних величин такий. Розраховують або одержують експериментально навантажувальну діаграму робочої машини  $M_c=f(t)$  або  $P_c=f(t)$ .

Визначають середнє значення потужності або моменту і за формулами (7.41) або (7.42) з каталогу попередньо вибирають електродвигун.

Користуючись технічними даними двигуна, зведеним до його вала моментом інерції системи “електродвигун – робоча машина” і навантажувальною діаграмою робочої машини, розраховують перехідні процеси, на основі яких будують навантажувальну діаграму двигуна.

Для більшості сільськогосподарських машин через випадковий характер навантаження статичну навантажувальну діаграму одержати неможливо. У такому разі попередньо вибирають двигун з певним перебільшенням потужності (іноді потужність двигуна приймають за аналогіями з подібними машинами), а потім при номінальному навантаженні робочої машини самописними приладами експериментально записують навантажувальну діаграму двигуна: споживаний струм  $I=f(t)$  або споживану потужність  $P_1=f(t)$ .

Одержану навантажувальну діаграму двигуна обробляють раніше описаним методом і визначають еквівалентні значення струму  $I_e$  або споживаної двигуном потужності  $P_{1e}$ .

Перевіряють вибраний електродвигун за тепловим режимом:

$$I_{ном} \geq I_e \text{ або } \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}} \geq P_{1e}, \quad (7.71)$$

де  $I_{ном}$ ,  $P_{ном}$ ,  $\eta_{ном}$  – номінальні значення струму, потужності і ККД двигуна.

Після перевірки на нагрівання двигун перевіряють на перевантажувальну здатність і за умовами пуску.

Методами еквівалентного моменту та еквівалентної потужності можна користуватися для попереднього вибору потужності двигуна за навантажувальною діаграмою робочої машини або за спрощеною навантажувальною діаграмою двигуна. Остання будується без урахування моменту інерції системи, тобто з припущенням, що момент або потужність двигуна в кожний момент часу дорівнюють відповідним статичним значенням. Такий вибір точніший, ніж за середніми значеннями.

#### 4. Вибір двигунів за потужністю для короткочасного режиму роботи

Двигуни, призначені для короткочасного режиму роботи, розраховані так, що при номінальному навантаженні в кінці робочого періоду їх температура дорівнює гранично допустимій. Усталеної температури в реальних умовах вони не досягають.

На рис.7.8 наведені графіки процесів нагрівання ЕД при короткочасному (криві 1 і 2) і тривалому (криві 1' і 2') режимах роботи.

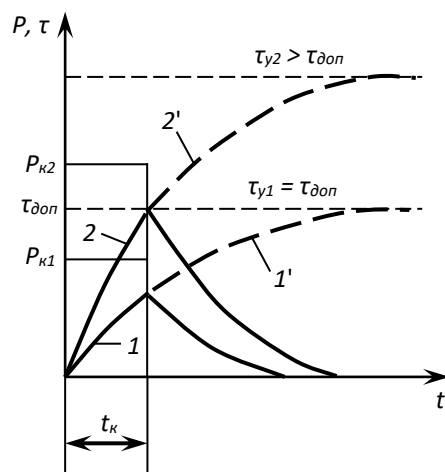


Рис. 7.8. Графік роботи двигуна в короткочасному режимі: 1–крива нагрівання двигуна, вибраного за номінальною потужністю;

2–крива нагрівання двигуна, вибраного з перевантаженням

Припустимо, що у тривалому режимі ЕД працює з номінальним навантаженням  $P_{ном}$  (крива 1'). Усталена температура ЕД дорівнює гранично допустимій, тобто  $\tau_{дон} = \frac{\Delta P_{ном}}{A} = \tau_y$ . Якщо цей ЕД, розрахований для тривалого режиму, буде працювати в короткочасному режимі з навантаженням  $P_k = P_{ном}$ , то за час роботи  $t_k$  його температура не досягне гранично допустимого значення, тобто ЕД у тепловому відношенні буде недовантаженим.

Для повного використання цього ЕД за нагріванням в короткочасному режимі необхідно встановити йому більше навантаження, при якому втрати потужності  $\Delta P_k$  в кінці робочого періоду  $t_k$  будуть такими, що перевищення температури ЕД досягне допустимого значення  $\tau_{дон}$  (крива 2 на рис.7.8), яке описується рівнянням:

$$\tau_{дон} = \tau_{y1} = \tau_2 (1 - e^{-\frac{t_k}{T_n}}) = \frac{\Delta P_k}{A} (1 - e^{-\frac{t_k}{T_n}}), \quad (7.72)$$

звідки визначаємо втрати потужності  $\Delta P_k$  при навантаженні  $P_k$ :

$$\Delta P_k = \frac{A \tau_{дон}}{1 - e^{-\frac{t_k}{T_n}}}. \quad (7.73)$$

Промисловість виготовляє спеціальні двигуни для короткочасного режиму. Основними параметрами, що їх характеризують, є номінальна потужність  $P_n$  і тривалість короткочасної роботи  $t_k$ .

Стандартом передбачено тривалості роботи 10,30, 60 і 90хв і налагоджено випуск двигунів з іншими тривалостями роботи, 1; 2,5; 3; 5; 8; 13; 18,5 хв.

Електродвигуни, спеціально призначені для короткочасного режиму роботи, мають ряд особливостей: у них збільшена перевантажувальна здатність; змінене співвідношення втрат у міді і сталі; двигуни з малою тривалістю короткочасної роботи не мають спеціального вентилятора для охолодження, завдяки чому зменшуються механічні втрати і знижується вартість двигунів.

Потужність спеціальних двигунів для короткочасного режиму роботи вибирається за умовами:

$$P_n \geq P_k; t_{k.kam} \geq t_k \quad (7.74)$$

де  $P_n$  - номінальна потужність двигуна в короткочасному режимі роботи;  $P_k$  - потужність навантаження, визначена за діаграмою навантаження;  $t_{k.kam}$  - каталожне значення тривалості роботи двигуна;  $t_k$  - фактична тривалість короткочасної роботи за навантажувальною діаграмою.

При роботі двигуна зі змінним навантаженням потужність навантаження  $P_k$  визначається методами середніх втрат або еквівалентних величин. Навантажувальна діаграма може бути задана залежностями  $M = f(t)$  або  $I = f(t)$ . У таких випадках умова (7.74) перевіряється залежностями:

$$M_n \geq M_k \text{ або } I_n \geq I_k, \quad (7.75)$$

де  $M_n$ ,  $I_n$  - відповідно номінальний момент і номінальний струм двигуна;  $M_k$ ,  $I_k$  - відповідно момент і струм за навантажувальною діаграмою.

Якщо час роботи двигуна  $t_k$  не збігається з каталожними значеннями  $t_{k.kam}$ , навантаження  $P_k$ , при якому двигун буде повністю використаний за нагрівостійкістю, може бути знайдене в таких розрахунках.

Перевищення температури ЕД, що працює з номінальним навантаженням нормований період часу  $t_{k.kam}$ , дорівнює:

$$\tau = \tau_{don} = \frac{\Delta P_n}{A} \left( 1 - e^{-\frac{t_{k.kam}}{T_n}} \right), \quad (7.76)$$

де  $\Delta P_n$  - номінальні втрати в ЕД;  $A$  - тепловіддача ЕД;  $T_n$  - стала часу нагрівання.

За час фактичної роботи  $t_k$  ЕД досягне допустимого перевищення температури, розвиваючи потужність  $P_k$ , відмінну від номінальної. При цьому:

$$\tau_{don} = \frac{\Delta P_k}{A} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_k}{T_H}} \right), \quad (7.77)$$

де  $\Delta P_k$  - втрати в двигуні при потужності  $P_k$ .

Прирівнявши (7.76) і (7.77), одержимо:

$$\frac{\Delta P_n}{A} \left( 1 - e^{-\frac{t_{k.kam}}{T_n}} \right) = \frac{\Delta P_k}{A} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_k}{T_H}} \right), \quad (7.78)$$

звідси

$$\frac{\Delta P_k}{\Delta P_n} = \frac{1 - e^{-\frac{t_{k.kam}}{T_n}}}{1 - e^{-\frac{t_k}{T_H}}}. \quad (7.79)$$

Втрати потужності у ЕД поділяються на постійні  $\Delta P_c$  і змінні  $\Delta P_v$ . Оскільки змінні втрати пропорційні квадратові потужності навантаження ЕД, то можна записати:

$$\frac{\Delta P_k}{\Delta P_n} = \frac{\Delta P_c + \Delta P_{v.nom} \cdot \left( \frac{P_k}{P_n} \right)^2}{\Delta P_c + \Delta P_{v.v}} = \frac{\alpha + \left( \frac{P_k}{P_n} \right)^2}{\alpha + 1} \quad (7.80)$$

де  $\Delta P_{v.n}$  - змінні втрати при номінальному навантаженні двигуна;  $\alpha = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_{v.n}}$  - відношення постійних втрат до номінальних змінних.

Підставивши значення (7.78) в (7.79):

$$\frac{\alpha + \left(\frac{P_k}{P_n}\right)^2}{\alpha + 1} = \frac{1 - e^{-\frac{t_{k.kam}}{T_n}}}{1 - e^{-\frac{t_k}{T_n}}}, \quad (7.81)$$

визначимо потужність  $P_k$  :

$$P_k = P_n \sqrt{(\alpha + 1) \frac{1 - e^{-\frac{t_{k.kam}}{T_n}}}{1 - e^{-\frac{t_k}{T_n}}} - \alpha}. \quad (7.82)$$

При практичних розрахунках визначення потужності  $P_k$  за формулою (7.82) ускладнюється відсутністю точних значень  $\alpha$  і  $T_n$ . Тому з достатньою для практики точністю перерахунок потужності на іншу тривалість роботи проводять за спрощеною формулою, в основу якої покладено рівність еквівалентної потужності при різних тривалостях роботи:

$$P_k = P_n \sqrt{\frac{t_{k.kam}}{t_k}}. \quad (7.83)$$

Якщо навантажувальна діаграма ЕД задана моментом або струмом, то відповідно:

$$M_k = M_n \sqrt{\frac{t_{k.kam}}{t_k}}; \quad (7.84)$$

$$I_k = I_n \sqrt{\frac{t_{k.kam}}{t_k}}. \quad (7.85)$$

Після вибору за потужністю ЕД при потребі перевіряють за умовами пуску і на перевантажувальну здатність. Двигуни, спроектовані для роботи в короткочасному режимі, не рекомендується використовувати для тривалого режиму роботи. У цих ЕД підвищені постійні втрати потужності, що при тривалому режимі роботи може призвести до недопустимого перегрівання ЕД і без навантаження. ЕД, спроектовані для тривалого режиму роботи, можна використовувати для роботи в короткочасному режимі. При цьому розрахунок потужності проводиться за допустимих умов нагрівання і механічного перевантаження.

Для кількісної оцінки перевантаження використовуються коефіцієнти термічного  $\rho_m$  і механічного  $\rho_m$  перевантаження.

Коефіцієнт термічного перевантаження являє собою відношення втрат потужності при короткочасному режимі до втрат потужності при номінальному режимі за умови однакової величини перевищення температури ЕД ( $\tau_k = \tau_y = \tau_{don}$ ).

$$\rho_m = \frac{\Delta P_k}{\Delta P_n} = \frac{\tau_y}{\tau_y} = \frac{A \cdot \tau_{don}}{(1 - e^{-\frac{t_k}{T_n}}) \cdot A \cdot \tau_{don}} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_k}{T_n}}} \quad (7.86)$$

Розв'язавши рівняння (7.86) відносно  $t_k$ , визначимо час, за який температура ЕД досягає  $\tau_{don}$  при навантаженні  $P_k$ .

$$t_{\kappa} = T_{\text{н}} \cdot \ln \frac{\rho_m}{\rho_m - 1} \quad (7.87)$$

Тоді

$$T_{\text{н}} = \frac{t_{\kappa}}{\ln \frac{\Delta P_{\kappa}}{\Delta P_{\kappa} - \Delta P_{\text{н}}}}. \quad (7.88)$$

На рис.7.9  
термічного

показана залежність коефіцієнта  
перевантаження від відношення  $\frac{t_{\kappa}}{T_{\text{н}}}$ .

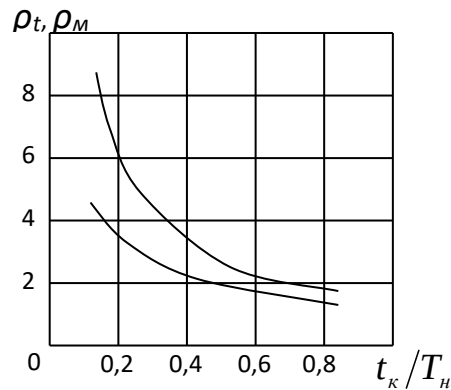


Рис.7.9. Залежність коефіцієнтів термічного ( $\rho_m$ ) і механічного ( $\rho_{\text{м}}$ ) перевантаження ЕД при короткочасному режимі роботи ( $\alpha=1$ ) від відносної тривалості робочого періоду

Користуючись цією кривою, можна визначити допустиме теплове перевантаження ЕД та оцінити його зміну в залежності від  $T_{\text{н}}$ .

Виразимо коефіцієнт термічного перевантаження через сталі і змінні втрати потужності тривалого режиму роботи ЕД:

$$\rho_m = \frac{\Delta P_{\kappa}}{\Delta P_{\text{н}}} = \frac{\Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{н.в}} \cdot K_3^2}{\Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{н.в}}} = \frac{\alpha + K_3^2}{\alpha + 1}. \quad (7.89)$$

Підставивши (7.85) у (7.83), одержимо час короткочасної роботи при заданих значеннях відношення сталих і змінних втрат, ступеня перевантаження ЕД за струмом:

$$t_{\kappa} = T_{\text{н}} \cdot \ln \frac{\alpha + K_3^2}{K_3^2 - 1} \quad (7.90)$$

Знаючи тривалість роботи ЕД в короткочасному режимі, можна із виразу (7.90) визначити ступінь його можливого перевантаження за струмом у тривалому режимі:

$$K_3 = \sqrt{\frac{1 + \alpha \cdot e^{-\frac{t_{\kappa}}{T_{\text{н}}}}}{1 - e^{-\frac{t_{\kappa}}{T_{\text{н}}}}}}. \quad (7.91)$$



Відношення допустимого за умовою нагрівання моменту навантаження при короткочасному режимі роботи до номінального моменту ЕД при тривалому режимі називають коефіцієнтом механічного перевантаження.

$$\rho_m = \frac{M_\kappa}{M_H} = \frac{\Delta P_\kappa}{\Delta P_H} = K_3 \quad (7.92)$$

Замінивши у виразі (7.85)  $K_3$  на  $\rho_m$ , одержимо:

$$\rho_m = \frac{\alpha + \rho_m^2}{\alpha + 1} \quad (7.93)$$

Звідси коефіцієнт механічного перевантаження:

$$\rho_m = \sqrt{\rho_m \cdot (\alpha + 1) - \alpha} \quad (7.94)$$

або, замінивши  $\rho_m$  у виразі (7.94) значенням із (7.86), одержимо:

$$\rho_m = \sqrt{\frac{\alpha + 1}{1 - e^{-\frac{t_\kappa}{T_H}}} - \alpha} \quad (7.95)$$

Тоді

$$P_\kappa = \rho_m \cdot P_H = P_H \cdot \sqrt{\frac{\alpha + 1}{1 - e^{-\frac{t_\kappa}{T_H}}} - \alpha} \quad (7.96)$$

Якщо у виразах (7.93) і (7.98) знехтувати сталими втратами, тобто припустити що  $\alpha = 0$ , то коефіцієнт термічного перевантаження:

$$\rho_m = K_3^2 = \frac{I_\kappa^2}{I_H^2} \quad (7.97)$$

а коефіцієнт механічного перевантаження:

$$\rho_m = \sqrt{\rho_m} = \frac{I_\kappa}{I_H} = \frac{M_\kappa}{M_H} = \frac{\Delta P_\kappa}{\Delta P_H} \quad (7.98)$$

Таке припущення дозволяє використовувати метод еквівалентних величин при багатоступеневій діаграмі навантаження.

Таким чином, для роботи в короткочасному режимі S2 необхідна потужність двигуна режиму S1 із (7.96) повинна бути:

$$P_H \geq \frac{P_\kappa}{\rho_m} = \frac{P_e}{\rho_m} \quad (7.99)$$

## 5. Вибір двигунів за потужністю для повторно короткочасного режиму роботи. Допустиме число вмикань асинхронного двигуна

Для роботи в повторно короткочасному режимі використовують спеціальні двигуни, які порівняно із звичайними, як і двигуни короткочасного режиму роботи, мають підвищений пусковий момент і підвищену перевантажувальну здатність, зменшену інерційність роторів та інші особливості, що дозволяють використати їх більш повно за нагрівостійкістю.

Як відомо, момент інерції тіла обертання пропорційний четвертому ступеню його діаметра і першому ступеню довжини. Тому для зниження втрат енергії при частих пусках і гальмуваннях двигуни краново - металургійних серій і тягові виготовляють з видовженими роторами (якорями) зменшеного діаметра. З метою рівномірнішого перерозподілу втрат між ротором і статором обмотки роторів асинхронних короткозамкнених електродвигунів мають підвищений опір.

Крім загальних даних, на паспортах таких ЕД вказується номінальна відносна тривалість вмикання їх в електромережу  $TB_n = 15, 25, 40, 60 \%$ . Номінальні дані двигунів, призначених для повторно короткочасного режиму, в каталогах наводяться при стандартних тривалостях вмикання. Тривалість циклу не повинна перевищувати 10 хв, Основним режимом S3 сучасних двигунів є режим при  $TB = 40 \%$ .

Стандартна навантажувальна діаграма ЕД, що працює в повторно короткочасному режимі, характеризується величиною регулярного навантаження  $P$  (рис.7.10), тривалістю роботи  $t_p$  і тривалістю паузи  $t_o$ . Навантаження двигуна може бути задане величиною потужності  $P$ , моменту  $M$  або струму  $I$ . Крім того, режим характеризується тривалістю вмикання, яка визначається із залежності (7.25).

Припустимо, що величина навантаження ЕД, призначеного для роботи в тривалому режимі, в повторно короткочасному режимі роботи дорівнює потужності  $P$ . При цьому теплові втрати за час роботи ЕД залишаються сталими, так як  $P = const$ .

Користуючись виразом (7.12) або (7.43) і (7.44), визначимо температуру ЕД в кінці кожного періоду роботи і паузи та побудуємо графік її зміни. Із графіка (рис.7.10) видно, що при роботі ЕД в повторно-короткочасному режимі температура його обмоток змінюється за відрізками експоненціальної кривої, і після роботи протягом  $t > 4T_n$  можна вважати, що закінчиться перехідний процес.

У наступних циклах усталений тепловий режим буде характеризуватися повторними змінами перевищення температури: від максимального значення  $\tau_{max}$  в кінці періоду навантаження до мінімального значення  $\tau_{min}$  в кінці паузи.

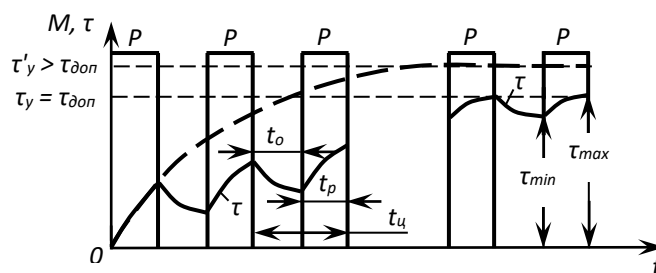


Рис.7.10. Навантажувальна діаграма та графік зміни температури ЕД при повторно - короткочасному режимі роботи.

Практично повторною температурою будь-якої частини електричної машини при повторно-короткочасному режимі або в проміжний режимі називається температура цієї частини в кінці робочого періоду або в кінці паузи, зміна якої від одного робочого періоду до другого не перевищує  $2^\circ\text{C}$  за 1 годину при тому, що навантаження електричної машини за час робочих циклів, а також тривалість вмикання або тривалість навантаження і температура навколишнього середовища залишаються практично незмінними.

Потужність двигуна вважається правильно вибраною за умовами нагрівання, коли  $\tau_{\max}$  дорівнює допустимому перевищенню температури:  $\tau_y = \tau_{\text{дон}}$

Потужність ЕД у повторно - короткочасному режимі роботи S3 визначається для двох випадків: коли в режимі роботи S3 використовується ЕД, призначений для режиму S3 і коли в режимі роботи S3 використовується ЕД, призначений для роботи в режимі S1.

Якщо параметри діаграми навантаження (потужність,  $TB$ ) однакові або близькі до номінальних ( $P_{\text{ном}} \geq P_{\text{н.к}}, TB_{\text{ном}} \geq TB_{\phi}$ ), то перевірку ЕД за нагріванням не проводять тому, що в такому випадку відсутність перегрівання гарантується заводом-виготовлювачем.

Навантаження ЕД в межах циклу повторно - короткочасного режиму роботи часто не є сталим. У такому випадку реальна діаграма навантаження замінюється еквівалентною зі сталими потужністю, моментом або струмом і еквівалентними тривалостями роботи, пауз і  $TB_e$ . Для її побудови необхідно знайти еквівалентні значення потужності (7.67) (моменту (7.63), струму (7.57), тривалості роботи (7.101) і тривалості паузи 7.102).

У тому випадку, коли зі зміною навантаження змінюється частота обертання і, як наслідок, тепловіддача двигуна, еквівалентну потужність визначають за формулою:

$$P_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (P_i \frac{\omega_{\text{ном}}}{\omega_i})^2 t_{pi}}{\sum_{i=1}^m \beta_i t_{pi}}}, \quad (7.100)$$

де  $m$  — кількість робочих ділянок у циклі.

Еквівалентні значення тривалості роботи  $t_{p,e}$  і паузи  $t_{0,p}$  визначаються за виразами:

$$t_{p,e} = \sum_{i=1}^m t_{pi}, \quad (7.101)$$

$$t_{0,e} = \sum_{i=1}^m t_{0i}, \quad (7.102)$$

де  $n$  — кількість пауз у циклі.

Номінальна потужність спеціального двигуна при фактичній тривалості вмикання, яка дорівнює одному зі стандартних значень ( $TB_{\phi} = TB_{\text{ст}}$ ), вибирається за умовою:

$$P_{\text{ном}} \geq P_e, \quad (7.103)$$

де  $P_e$  — еквівалентна потужність навантаження, визначена за навантажувальною діаграмою.

Якщо фактична  $TB_{\phi}$  з діаграми навантаження відрізняється від стандартної, то потужність ЕД необхідно перерахувати на реальну  $TB$ . Прийнемо, що  $M_1$ ,  $t_{p1}$ ,  $t_{01}$  (рис.7.11) відповідають реальній діаграмі навантаження з реальною  $TB_{\phi}$ , а  $M_{\text{ном}}$ ,  $t_p$ ,  $t_0$  - стандартному  $TB_{\text{ст}}$ .

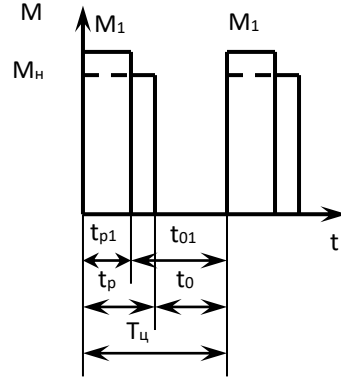


Рис. 7.11. Розрахункові графіки моменту при повторно - короткочасному режимові.

З рівності середніх втрат потужності знаходимо, що середнє перевищення температури ЕД в нестандартному циклі не буде перевищувати допустиме, якщо середні втрати потужності в двигуні при роботі з фактичним навантаженням  $\Delta P_\phi$  не будуть перевищувати середніх втрат при номінальному режимі  $\Delta P_{ном}$ :

$$\frac{\Delta P_1 t_{p1}}{t_{p1} + t_{01}} \leq \frac{\Delta P_{ном} t_p}{t_p + t_0}, \quad (7.104)$$

або

$$\Delta P_\phi TB_\phi \leq \Delta P_{ном} TB_{ном}. \quad (7.105)$$

Таким чином, умова перевірки потужності двигуна за методом середніх втрат запишеться:

$$\Delta P_{ном} \geq \Delta P_\phi \frac{TB_\phi}{TB_{ном}}. \quad (7.106)$$

Перевірку попередньо вибраного двигуна можна зробити і за методом еквівалентних величин. Втрати потужності  $\Delta P$  можна виразити через постійні  $\Delta P_c$  і змінні

$\Delta P_{v.ном} \left( \frac{I}{I_{ном}} \right)^2$  складові. Тоді вираз (7.103) запишеться:

$$\Delta P_c + \Delta P_{v.ном} \geq \left[ \Delta P_c + \Delta P_{v.ном} \left( \frac{I_\phi}{I_{ном}} \right)^2 \right] \frac{TB_\phi}{TB_{ст}}. \quad (7.107)$$

Після перетворень одержимо умови для перевірки попередньо вибраного двигуна за струмом:

$$I_{ном} \geq I_\phi \sqrt{\frac{TB_\phi}{\alpha(TB_{ст} - TB_\phi) + TB_{ст}}}, \quad (7.108)$$

де  $I_{ном}$  — номінальний струм двигуна;  $I_{\phi}$  — фактичний струм навантаження;  
 $\alpha = \Delta P_c / \Delta P_{v.ном}$  — відношення постійних втрат потужності у двигуні до номінальних змінних.

Згідно з методикою, описаною раніше, можна одержати аналогічні співвідношення між моментами і потужностями:

$$M_{ном} \geq M_{\phi} \sqrt{\frac{TB_{\phi}}{\alpha(TB_{ст} - TB_{\phi}) + TB_{ст}}}. \quad (7.109)$$

$$P_{ном} \geq P_{\phi} \sqrt{\frac{TB_{\phi}}{\alpha(TB_{ст} - TB_{\phi}) + TB_{ст}}}. \quad (7.110)$$

Якщо фактична тривалість вмикання незначно відрізняється від стандартної, то величиною  $\alpha(TB_{ст} - TB_{\phi})$  можна знехтувати. Тоді формули (7.108)-(7.110) матимуть простіший вигляд:

$$I_{ном} \geq I_{\phi} \sqrt{\frac{TB_{\phi}}{TB_{ном}}}. \quad (7.111)$$

$$M_{ном} \geq M_{\phi 1} \sqrt{\frac{TB_{\phi}}{TB_{ном}}}. \quad (7.112)$$

$$P_{ном} \geq P_{\phi} \sqrt{\frac{TB_{\phi}}{TB_{ном}}}. \quad (7.113)$$

Виразами (7.112) і (7.113) можна користуватися також для попереднього розрахунку потужності двигуна.

Вибрати двигун за потужністю можна графічним методом (рис. 7.11). Якщо розрахунками встановлено, що еквівалентна потужність навантаження  $P_e = 7,5$  кВт при фактичній  $TB_{\phi} = 36\%$  (точка А на рис. 7.12), то, як видно з графіка, потрібно вибрати двигун АИРСІ32S4, номінальна потужність якого при стандартній  $TB_{ст} = 40\%$  дорівнює 8,5 кВт.

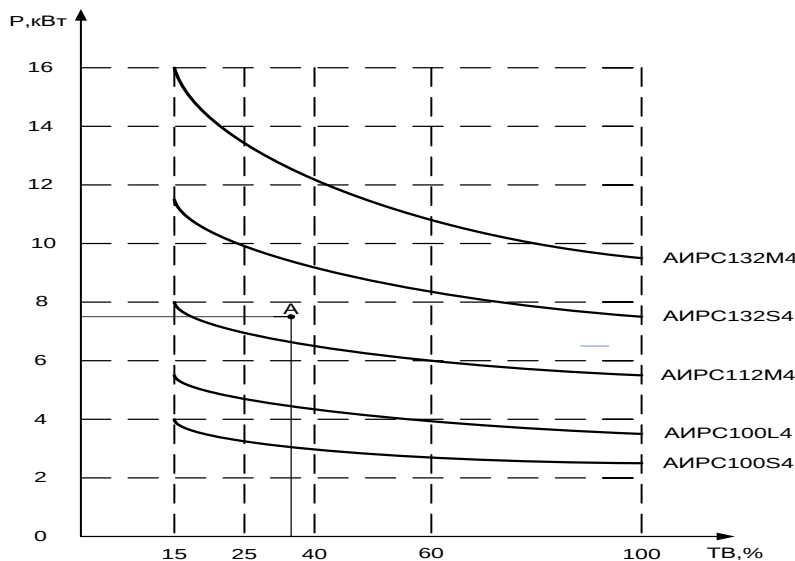


Рис.7.12. Залежності потужності двигунів серії АИРС від тривалості вмикання

Методика вибору потужності спеціального двигуна для роботи в повторно - короткочасному режимі така. За навантажувальною діаграмою робочої машини, поданою у вигляді  $M_c = f(t)$  або  $P_c = f(t)$ , визначають середній статичний момент  $M_{c,ср}$  або статичну потужність  $P_{c,ср}$  за робочі періоди циклу та фактичну тривалість вмикання двигуна  $TB_{\phi}$ .

З каталогу попередньо вибирають двигун за умовами (7.41) або (7.42) та  $TB_{ст} \geq TB_{\phi}$ . Попередньо двигун можна вибрати також за аналогією з іншими робочими машинами.

Користуючись каталожними даними вибраного двигуна, діаграмою навантаження робочої машини і зведеним до вала двигуна моментом інерції системи “електродвигун – робоча машина”, розраховують перехідні процеси і будують навантажувальну діаграму двигуна  $I = f(t)$  або  $M = f(t)$ .

Оскільки повторно - короткочасний режим характеризується частими пусками і гальмуваннями, за яких частота обертання змінюється в широких межах, тепловіддача двигуна не залишається постійною. Тому перевірка вибраного двигуна за його навантажувальною діаграмою  $P = f(t)$  без додаткового її коригування не дає достатньої точності.

Навантажувальну діаграму двигуна можна одержати також експериментально.

За навантажувальною діаграмою двигуна визначають фактичні значення тривалості вмикання  $TB_{\phi}$ , середніх втрат  $P_{ср.ф.}$  або еквівалентні величини ( $I_{с.ф.}$ ,  $M_{с.ф.}$ ).

Користуючись залежностями (7.96), (7.98 – 7.100), перевіряють відповідність вибраного двигуна. При невиконанні вказаних умов вибирають двигун іншої потужності і перевіряють його за умовами пуску і перевантажувальною здатністю.

При невеликому значенні електромеханічної сталої часу системи “електродвигун – робоча машина” або при слабких коливаннях навантаження навантажувальні діаграми робочої машини і двигуна практично збігаються. У такому випадку потреба у побудові навантажувальної діаграми двигуна відпадає, а двигун вибирають і перевіряють за навантажувальною діаграмою робочої машини з урахуванням передаточних чисел і ККД передач.

При цьому слід упевнитися, що при розрахунках можна користуватися методом еквівалентного моменту або еквівалентної потужності.

У повторно - короткочасному режимі можуть працювати двигуни, призначені для роботи в тривалому режимі. Оскільки в період паузи втрати потужності у двигуні відсутні, то в робочий період навантаження на нього можна збільшити порівняно з тривалим режимом.

Двигун буде повністю використаний за нагрівостійкістю, коли втрати енергії за період циклу у повторно-короткочасному режимі дорівнюють втратам за такий же період у тривалому режимі роботи з номінальним навантаженням:

$$\Delta P_{нк} t_{\phi} = \Delta P_{ном} t_{ц}. \quad (7.114)$$

У повторно - короткочасному режимі втрати енергії у двигуні мають місце лише в робочий період, тобто:

$$\Delta P_{нк} t_{\phi} = \left[ \Delta P_c + \Delta P_{v,ном} \left( \frac{I_{нк}}{I_{ном.тр}} \right)^2 \right] t_p, \quad (7.115)$$

де  $I_{нк}$  — струм при повторно - короткочасному режимі;  $I_{ном.тр}$  — номінальний струм тривалого режиму.

При роботі в усталеному тривалому режимі вся енергія, що втрачається у двигуні, віддається в навколишнє середовище. Тоді праву частину рівняння (7.114) можна записати так:

$$\Delta P_{ном} t_{\phi} = \Delta P_{ном} t_p + \Delta P_{ном} \beta_0 t_0 = (\Delta P_c + \Delta P_{v,ном}) (t_p + \beta_0 t_0) \quad (7.116)$$

де  $\beta_0$  — коефіцієнт погіршення тепловіддачі в період паузи.

Прирівнюємо рівняння (7.105) і (7.106)

$$\left[ \Delta P_c + \Delta P_{v.ном} \left( \frac{I_{нк}}{I_{ном.тр}} \right)^2 \right] t_p = (\Delta P_c + \Delta P_{v.ном}) (t_p + \beta_0 t_0) \quad (7.117)$$

Розділивши (7.107) на  $t_p$  і замінивши відношення постійних до змінних втрати через  $\alpha$ , одержимо:

$$\alpha + \left( \frac{I_{нк}}{I_{ном.тр}} \right)^2 = (\alpha + 1) \left( 1 + \beta_0 \frac{t_0}{t_p} \right). \quad (7.118)$$

Щоб знайти залежність струму від тривалості вмикання ТВ, рівняння (7.108) запишемо так:

$$\alpha + \left( \frac{I_{нк}}{I_{ном.тр}} \right)^2 = (\alpha + 1) \left( 1 + \beta_0 \frac{t_0 + t_p - t_p}{t_p} \right). \quad (7.119)$$

або після перетворень:

$$\alpha + \left( \frac{I_{нк}}{I_{ном.тр}} \right)^2 = (\alpha + 1) \left[ 1 + \beta_0 \left( \frac{1}{TB} - 1 \right) \right], \quad (7.120)$$

звідки

$$I_{ном.тр} = I_{нк} \sqrt{\frac{TB}{TB + \beta_0(1 + \alpha)(1 - TB)}}, \quad (7.121)$$

Значення номінального струму для тривалого режиму (7.121) порівнюють із номінальним струмом вибраного двигуна за умовою:

$$I_{ном.тр} \leq I_{дов.ном}. \quad (7.122)$$

Якщо знехтувати постійними втратами, то для двигунів з незалежним охолодженням ( $\beta_0 = 1$ ) рівняння (7.111) запишемо так:

$$I_{ном.тр} = I_{нк} \cdot \sqrt{TB}. \quad (7.123)$$

Користуючись припущеннями, при виведенні рівнянь (7.63) і (7.67) одержують залежності для вибору двигуна за моментом або потужністю.

#### Питання для самоконтролю.

1. Які особливості мають спеціальні ЕД для роботи в повторно-короткочасному режимі порівняно зі звичайними?
2. Якими величинами характеризується навантажувальна діаграма ЕД, що працює в повторно – короткочасному режимі?
3. Покажіть на рисунку навантажувальну діаграму, графік зміни температури ЕД при повторно – короткочасному режимі роботи, повторні зміни перевищення температури від

максимального значення  $\tau_{\max}$  в кінці періоду навантаження до мінімального значення  $\tau_{\min}$  в кінці паузи в наступних циклах усталеного теплового режиму. Що називають повторною температурою ЕД при повторно-короткочасному режимі роботи?

4. Коли потужність двигуна при повторно – короткочасному режимі роботи вважається правильно вибраною за умовами нагрівання?

5. Чому перевірку ЕД за нагріванням не проводять, якщо параметри діаграми навантаження (потужність,  $TB$ ) однакові або близькі до номінальних ( $P_{ном} \geq P_{н.к}, TB_{ном} \geq TB_{\phi}$ )?

6. Як діють у випадку, коли навантаження ЕД в межах циклу повторно-короткочасного режиму роботи не є сталим?

7. У тому випадку, коли зі зміною навантаження змінюється частота обертання, за якими формулами визначаються еквівалентні значення потужності, тривалості роботи  $t_{p.e}$  і паузи  $t_{o.p}$ ?

8. За якою умовою вибирається номінальна потужність спеціального двигуна, коли фактична тривалість вмикання дорівнює і коли не дорівнює одному із стандартних значень, тобто ( $TB_{\phi} = TB_{ст}$ ) і ( $TB_{\phi} \neq TB_{ст}$ )?



Конспект лекцій  
з дисципліни  
“Основи електропривода”

для здобувачів першого (бакалаврського) РВО, денної та заочної форми навчання спец.  
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Упорядники:

**ЛИСИЧЕНКО** Микола Леонідович,

**ХАНДОЛА** Юрій Миколайович,

**СОРОКІН** Максим Сергійович,

**СОТНІК** Ольга Василівна,

**ГУЗЕНКО** Віталій Вікторович,

**МІЛЕНІН** Дмитро Миколайович.

Формат 60x84 1/16. Гарнітура Times New Roman

Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.

Ум. друк. арк. 2,5

Наклад 30 пр.

Державний біотехнологічний університет

