

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

С. П. Плешков, С.В. Серебренніков

***ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД
У ПРОМИСЛОВОСТІ ТА
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОМУ ВИРОБНИЦТВІ***

Навчальний посібник
для галузі знань 14 «Електрична інженерія»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

Кіровоград 2016

УДК 621.311.4:621.316.1
ББК [31.29-5+31.279.1] (075.8)

Затверджено Вченою радою Кіровоградського національного технічного університету (протокол № 4 від 21. 12. 2015 р.)

Рецензенти:

О.М. Сінчук, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті ДВНЗ «Криворізький національний університет»;

С.І. Осадчий, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів Кіровоградського Національного технічного університету.

ПЛЄШКОВ С. П., СЕРЕБРЕННІКОВ С.В. Енергоефективний електропривод у промисловості та сільськогосподарському виробництві: Навчальний посібник. – Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2016. – 156 с.

У навчальному посібнику розглянуто основні принципи побудови систем управління промисловими та сільськогосподарськими машинами й агрегатами на базі енергоефективних електроприводів і засобів автоматизації.

Викладено основи електроприводу, принципи дії та особливості його розрахунку. Подано заходи з підвищення рівня енергоефективності на стадії проектування та під час експлуатації електромеханічних систем.

Наведено приклади заощадження електричної енергії та побудови автоматизованих електромеханічних систем для основних технологічних процесів промислового та сільськогосподарського виробництва.

Для студентів, магістрантів та аспірантів електроенергетичних спеціальностей вищих навчальних закладів, а також інженерно-технічних працівників, які займаються проектуванням та експлуатацією електромеханічних систем й електроенергетичного устаткування.

УДК 621.311.4: 621.316.1
С. П. ПЛЄШКОВ, С.В. СЕРЕБРЕННІКОВ
© РВЛ КНТУ, 2016

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
I. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИВОДУ.....	8
1.1. Будова електричного приводу.....	8
1.2. Класифікація електроприводів.....	8
1.3. Блок-схема автоматизованого електричного приводу.....	9
1.4. Приводні характеристики робочих машин та електродвигунів.....	10
1.5. Енергетичні перетворення у силовому каналі електроприводу.....	12
1.6. Механічні характеристики робочих машин і електричних двигунів.....	14
1.7. Усталений режим роботи електричного приводу.....	16
1.8. Стійкість роботи електроприводу в усталеному режимі.....	16
1.9. Рівняння динаміки електричного приводу.....	17
1.10. Характер руху електроприводу.....	19
1.11. Неусталений рух електричного приводу.....	19
1.12. Графоаналітичний метод визначення тривалості перехідних процесів.....	20
1.14. Вибір оптимального передавального числа передаточного механізму.....	24
1.15. Класифікація часових режимів роботи електродвигунів.....	25
1.15.1. Тривалий режим (S1) роботи двигуна.....	25
1.15.2. Короткочасний режим (S2) роботи двигуна.....	26
1.15.3. Повторно-короткочасний режим роботи (S3, S4, S5).....	26
1.15.4. Переміжний режим роботи (S6, S7, S8).....	29
1.16. Визначення потужності та вибір двигунів електроприводів.....	32
1.16.1. Вибір двигуна для тривалого режиму роботи.....	33
1.16.2. Вибір двигуна для повторно-короткочасного режиму.....	35
1.17. Побудова навантажувальної діаграми електроприводу та перевірка за умовами нагрівання і припустимого навантаження.....	36
II. ЕЛЕКТРОПРИВОД НА ОСНОВІ ДВИГУНІВ СТАЛОГО СТРУМУ.....	39
2.1. Механічні характеристики двигунів сталого струму незалежного збудження.....	39
2.2. Регулювання частоти обертання двигуна сталого струму.....	40
2.2.1. Регулювання частоти обертання двигуна зміною опору в якірному колі.....	41
2.2.2. Регулювання частоти обертання зміною магнітного потоку незалежного збудження.....	41
2.2.3. Регулювання частоти обертання зміною напруги живлення.....	43

2.3. Графоаналітичний метод розрахунку пускових резисторів двигуна сталого струму.....	44
2.4. Способи гальмування двигунів сталого струму.....	45
2.4.1. Динамічне гальмування.....	46
2.4.2. Гальмування противмиканням.....	47
2.4.3. Гальмування з рекуперацією енергії в мережу.....	48
2.5. Автоматичне керування двигунів сталого струму незалежного збудження при пуску, гальмуванні та реверсі.....	49
2.5.1. Керування пуском у функції часу.....	50
2.5.2. Керування пуском у функції струму.....	50
2.5.3. Керування пуском у функції швидкості.....	51
2.5.4. Керування динамічним гальмуванням по принципу ЕРС.....	52
2.6. Електромеханічні перехідні процеси у електричних приводах.....	52
2.6.1. Перехідні процеси при пуску двигуна сталого струму.....	53
2.6.2. Перехідні процеси при динамічному гальмуванні.....	57
2.6.3. Перехідні процеси при гальмуванні противмиканням.....	58
2.6.4. Зниження втрат електроенергії в перехідних режимах.....	59
ІІІ. ЕЛЕКТРОПРИВОД НА ОСНОВІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА.....	60
3.1. Механічні характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором.....	60
3.2. Побудова механічної характеристики асинхронного двигуна.....	62
3.3. Способи пуску асинхронних двигунів.....	63
3.3.1. Графоаналітичний метод розрахунку пускових резисторів асинхронного двигуна з фазним ротором.....	63
3.4. Види гальмування асинхронних двигунів.....	66
3.4.1. Генераторне (рекупераційне) гальмування.....	66
3.4.2. Гальмування противмиканням.....	66
3.4.3. Динамічне гальмування.....	67
3.5. Розрахунок електромеханічних перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором.....	68
3.6. Регулювання координат асинхронного двигуна за допомогою додаткових резисторів в колі статора.....	71
3.7. Регулювання швидкості асинхронного двигуна зміною числа пар полюсів.....	73
3.8. Імпульсний спосіб регулювання швидкості.....	76
3.9. Регулювання координат електроприводу в системі "тиристорний перетворювач напруги-двигун".....	78
3.10. Регулювання швидкості електричного приводу в системі "Перетворювач частоти-двигун".....	81
3.11. Закон взаємного регулювання частоти та напруги.....	81
3.12. Машинний динамічний перетворювач частоти.....	83

3.13. Статичні (напівпровідникові) перетворювачі частоти.....	84
3.14. Трифазний тиристорний перетворювач частоти з безпосереднім зв'язком живлячої мережі і навантаження.....	84
3.15. Перетворювач частоти з ланкою сталого струму.....	86
4.1. Автоматизований електропривод змінного струму.....	88
4.2. Електроприводи з автоматичним пуском у функції струму.....	90
4.3. Електропривод з автоматичним пуском у функції часу.....	92
4.4. Частотно-регульований електропривод змінного струму.....	94
4.4.1. Інвертор струму.....	94
4.4.2. Інвертор напруги.....	100
4.5. Синтез енергоефективних систем управління електроприводом змінного струму і вибір керованого джерела живлення.....	105
4.6. Сучасний стан розвитку частотно-регульованого електроприводу.....	107
4.7. Регулювання швидкості двигунів сталого струму незалежного збудження за допомогою керованих тиристорних випрямлячів.....	110
4.7.1. Регулювання швидкості двигунів за допомогою однофазного тиристорного випрямляча.....	111
4.7.2. Регулювання швидкості двигунів за допомогою трифазної нульової схеми.....	113
4.7.3. Регулювання швидкості двигунів за допомогою мостових схем.....	113
V. ЕФЕКТИВНЕ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ УСТАНОВКАХ.....	115
5.1. Електромеханічні споживачі.....	115
5.2. Визначення факторів впливу на енергоефективність і технічний стан електромеханічних систем.....	117
5.3. Заощадження електричної енергії у двигунах.....	119
5.3.1. Впровадження енергоефективних двигунів.....	119
5.3.2. Заміна недовантажених електродвигунів двигунами меншої потужності.....	119
5.3.3. Техніко-економічне обґрунтування ефективності використання електромеханічних систем.....	121
5.3.4. Визначення енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами.....	121
5.3.5. Заощадження електричної енергії за рахунок перемикання обмоток статора за схемою «трикутник-зірка».....	123
5.3.6. Впровадження автоматичних обмежувачів неробочого ходу двигунів.....	124

5.3.7. Енергозаощаджуючі режими роботи асинхронних двигунів.....	126
5.4. Заощадження електричної енергії в помпових установках.....	130
5.4.1. Підвищення коефіцієнта корисної дії pomp.....	131
5.4.2. Вдосконалення регулювання роботи pomp.....	131
5.4.3. Впровадження енергоефективного частотно-регульованого електропривода pomp.....	132
5.5. Заощадження електричної енергії у вентиляційних установках.....	138
5.5.1. Вибір вентиляторів та систем регулювання подавання повітря.....	138
5.5.2. Заміна застарілих вентиляторів на сучасні.....	140
5.5.3. Впровадження енергоефективного регулювання подавання вентиляторів.....	140
5.5.4. Покращення роботи вентиляторів зміною режиму їхньої роботи.....	142
5.5.5. Впровадження автоматичного керування вентиляційними установками.....	142
5.6. Заощадження електричної енергії в компресорних установках.....	142
5.6.1. Визначення потужності, яку споживають компресори.....	143
5.6.2. Визначення потужності, яку споживають компресори.....	145
5.6.3. Підігрівання стисненого повітря перед пневмоприймачами.....	145
5.6.4. Зменшення витоків стисненого повітря.....	145
VI. СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ У	
ПРОМИСЛОВОСТІ ТА СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ.....	146
6.1. Системи автоматизованого керування електричним приводом у промисловості.....	146
6.1.1. Система автоматичного керування електрозварюванням.....	146
6.1.2. Система автоматичного керування шліфувальним верстатом.....	147
6.1.3. Система автоматичного керування графобудувачем.....	148
6.1.4. Система автоматичного керування подавання стрижня до реактору.....	148
6.2. Характеристика технологічних комплексів сільськогосподарського виробництва.....	149
6.3. Автоматизація технологічного процесу вентиляції та керування помповими установками.....	150
6.4. Комплектні пристрої керування помповими установками.....	152
6.5. Автоматизовані системи контролю і управління енергоспоживанням.....	154
ЛІТЕРАТУРА.....	158

ВСТУП

Електропривод є невід'ємною складовою практично всіх сучасних робочих машин і агрегатів, що використовують у промисловості та сільськогосподарському виробництві. Від правильності вибору електроприводу залежать продуктивність, точність, надійність та швидкість робочих машин, особливо під час пуску та гальмування.

Правильне поєднання механічних характеристик виконавчих органів робочих машин і електроприводу є умовою оптимального конструктивного і технологічного рішення. Актуальним є питання раціонального використання електроенергії та енергозаощадження засобами електроприводу.

Основними споживачами електроенергії в промисловості та сільському господарстві є електромеханічні системи (ЕМС), електричне освітлення та електротехнологічні установки (електронагрівання, електроліз, електрозварювання тощо).

Понад 60% виробленої у світі електричної енергії споживають електроприводи; при цьому частка ЕМС з асинхронними двигунами (АД) становить близько 80%.

Вартість електроенергії, яку споживає ЕМС протягом строку експлуатації, значно перевищує вартість устаткування і витрати на обслуговування і тому важливо досягти економії електроенергії та її оплати.

Рівень ефективності використання електричної енергії у промисловості та сільськогосподарському виробництві визначають відношенням результатів використання енергії до витрат енергії на отримання цих результатів. Показниками рівня ефективності використання енергії можуть бути: **енерговіддача** – прямий показник та **енергомісткість** – зворотний показник рівня ефективності.

Визначення енергоефективності ЕМС змінного струму здійснюють за двома основними складниками: **енергоспоживанням** (за критерій енергоспоживання обирають коефіцієнт потужності $\cos\varphi$) та **енерговикористанням** (перетворенням) спожитої енергії (критерієм енерговикористання слугує ККД η).

Підвищувати рівень ефективності використання електричної енергії можна шляхом зменшення питомих витрат енергії на одиницю продукції за рахунок раціоналізації режиму роботи електроустаткування, вдосконалення технологій виробництва та зменшення втрат енергії під час її транспортування та перетворення.

У навчальному посібнику показано шляхи і засоби енергозаощадження в електроприводі.

Навчальний посібник орієнтовано на студентів, магістрантів та аспірантів електроенергетичних спеціальностей вищих навчальних закладів, також він буде корисним для підвищення рівня кваліфікації інженерно-технічних працівників, які займаються проектуванням та експлуатацією електромеханічних систем й електроенергетичного устаткування.

I. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИВОДУ

Передумовою успішного розроблення заходів з підвищення рівня ефективного використання електричної енергії у промисловості та сільськогосподарському виробництві є опанування основних положень теорії та практики електричного приводу в ЕМС.

1.1. Будова електричного приводу

Електропривод – це електромеханічна система, що виконує перетворення електричної енергії в механічну для приведення в рух робочих машин і керування цим рухом.

Електропривод містить:

- електричний двигун, призначений для перетворення електричної енергії в механічну;
- передавальний пристрій, який передає механічну енергію від двигуна до робочих машин і узгоджує вид та швидкість їхнього руху;
- перетворювач, який змінює параметри електроенергії (U, I, f тощо) для передачі на електричний двигун (автотрансформатори, магнітні підсилювачі, тиристорні перетворювачі електричної енергії) для керування рухом виконавчих органів;
- керуючий пристрій використовується для керування 1, 2 та 3 складовими (апарати керування, захисту, сигналізації).

1.2. Класифікація електроприводів

Електроприводи класифікують за такими ознаками:

1. За родом струму електроприводи підрозділяють на електроприводи сталого (постійного) струму та змінного струму.
2. За типом електромеханічних перетворювачів – асинхронні з короткозамкнутим або фазним ротором, синхронні, крокові, лінійні, двигуни сталого струму з незалежним і послідовним збудженням.
3. За призначенням – головні й допоміжні.
4. За кількістю робочих машин, які приводить у рух один електропривод – індивідуальні та групові.
5. За наявністю зв'язків з іншими електроприводами – незалежні і взаємопов'язані. Розрізняють 2 види взаємопов'язаних електричних приводів – багатодвигунні, в яких двигуни працюють спільно на загальний виконавчий механізм, і електричні вали, в яких забезпечується синхронне обертання двох і більше двигунів, вали яких механічно не зв'язані.
6. За видом руху розрізняють електроприводи обертального й поступального односпрямованого та реверсивного руху, а також електроприводи зворотно-поступального руху.
7. За можливістю зміни напрямку руху – реверсивні та нереверсивні (рух в одному напрямі).

8. За наявності автоматизації регулювання швидкості та ступеня керованості електроприводи підрозділяють на:

- нерегульований електропривод, який не забезпечує керовану зміну координат руху виконавчого органу робочої машини, а параметри руху змінюються тільки внаслідок впливів, що збурюють (зміни навантаження на вату двигуна, напруги живлення та ін.);

- регульований електропривод, що забезпечує керовану зміну координат руху виконавчого органу робочої машини під впливом керуючого пристрою у відповідності до вимог технологічного процесу;

- автоматизований слідкуючий електропривод, який забезпечує переміщення виконавчого органу робочої машини відповідно до сигналу завдання;

- програмно-керований електропривод, що забезпечує переміщення виконавчого органу робочої машини відповідно до заданої програми;

- адаптивний електропривод, який автоматично пристосовується до параметрів, що змінюються, та впливів, що збурюють, шляхом зміни структури та параметрів системи керування.

9. За видом перетворювального пристрою – вентильні електроприводи, системи „генератор-двигун”, системи „магнітний перетворювач-двигун”, каскадні електроприводи, в яких потужність ковзання асинхронного двигуна за допомогою перетворювачів повертають до електричної мережі.

1.3. Блок-схема автоматизованого електричного приводу

Класичний електричний привод є розімкнутим і містить 4 складові: джерело живлення, двигун, передавальний пристрій (редуктор), виконуючий механізм.

Вперше в Україні електроприводи було реалізовано в 1892 році – у Києві відкрито трамвайний рух.

На сучасному етапі електричні приводи виконують з автоматичним керуванням – програмовані, слідкуючі, адаптивні.

1. **Слідкуючий** електричний привод є замкненою автоматичною системою, яка забезпечує рух робочої машини у відповідності з довільним сигналом керування (застосовується у антенах радіотелефонів, копіювальних верстатах, маніпуляторах тощо)

2. Електричні приводи з **програмним** керуванням забезпечують рух робочої машини за наперед заданою програмою (наприклад верстата з ЧПК). У замкненій системі за допомогою «Давача положення» (рис. 1.1) вимірюють дійсну координату робочої машини і цю інформацію через зворотній зв'язок $U_{з.з}$ порівнюють із заданим сигналом $U_{з.ад}$ від програмного «Задавального пристрою» (ЗП). У разі розбіжності до «Системи Керування» електроприводом подають додатковий корегуючий сигнал $\Delta U = U_{з.ад} - U_{з.з}$. Система керування виробляє керуючий сигнал U_K у функції сигналів $U_{з.ад}$ і зворотних зв'язків $U_{з.з}$ за: температурою обмоток («Давач t^o »), силою струму («Давач I ») та напругою («Давач U »), швидкістю двигуна («Давач ω »). Сигнали зворотних зв'язків можуть також подаватись на обробку до ЗП (ЕОМ) для врахування в $U_{з.ад}$.

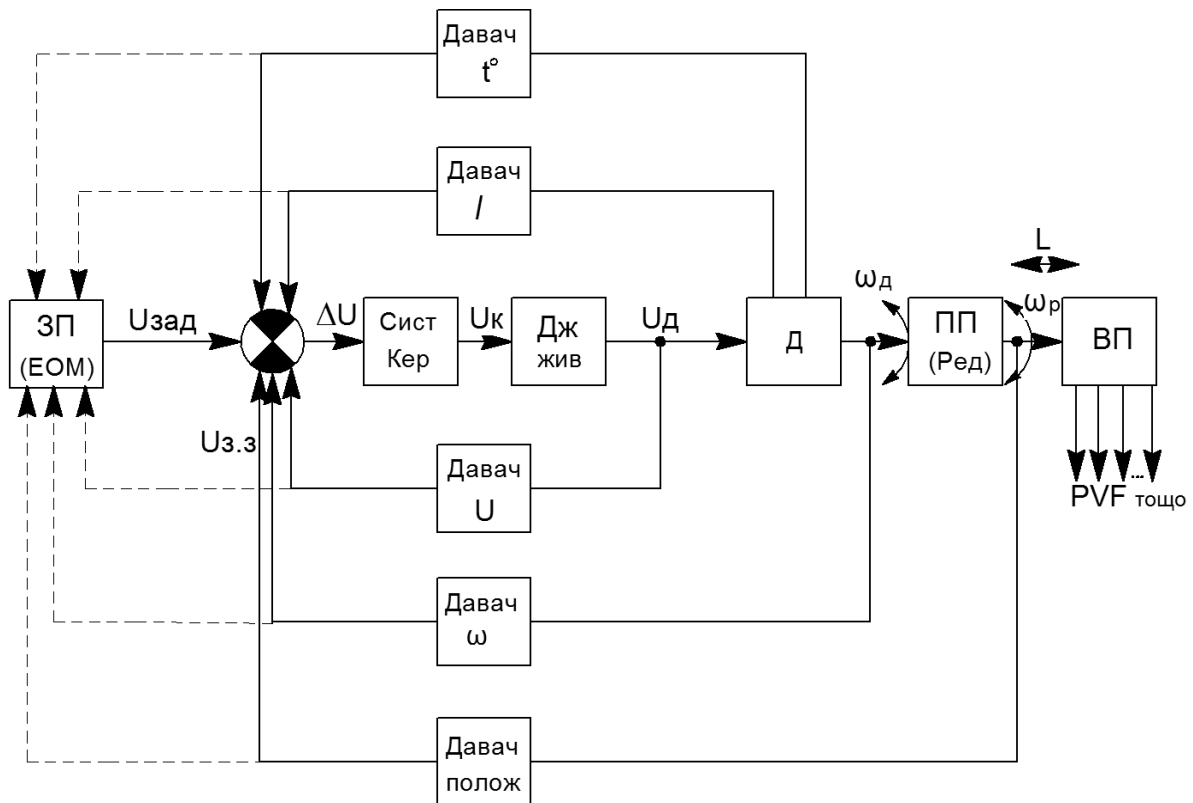


Рис. 1.1

Система керування складається з підсилювача і силового перетворювача (наприклад, тиристорного), які разом із «Джерелом живлення» забезпечують потрібний закон зміни живлячої напруги двигуна у часі $U_d(t)$.

1.4. Приводні характеристики робочих машин та електродвигунів

Вибір раціонального електропривода до будь-якої робочої машини провадять на підставі її приводних характеристик, до яких належать: технологічні, кінематичні, інерційні, механічні, навантажувальні, енергетичні [1].

Технологічну характеристику зображують функціональною схемою процесу та вимогами до електропривода щодо якості продукції. Наводять залежність продуктивності машини та якості перероблюваної продукції від кутової (лінійної) швидкості робочого органа. Аналіз технологічної характеристики дає змогу сформулювати вимоги до схеми керування електроприводом (необхідні блокування, регулювання кутової швидкості, захист від можливих аварійних режимів тощо) і вибрати електричний двигун відповідно до умов навколишнього середовища.

Наприклад, використовуючи регульований електропривод, можна плавно запустити насосну установку і запобігти можливому збуренню води у водозаборі. Отже, технологічні характеристики повинні відображати всі особливості технологічного процесу.

Кінематичну характеристику подають у вигляді кінематичної схеми. На схемі повинна бути інформація щодо швидкості всіх елементів машини, а також розподілу потужності двигуна між окремими робочими органами. Кінематична схема в більшості випадків являє собою багатомасову, пружну механічну схему із зазорами. Розв'язання рівняння руху за такою схемою досить складне. У сільськогосподарських електроприводах при інженерних розрахунках використовують одномасові жорсткі механічні схеми без зазорів. Кінематична схема повинна мати всі параметри для визначення зведеного до вала двигуна статичного моменту та моменту інерції робочої машини, що дає можливість одержати одномасову механічну схему. Крім цього, кінематична характеристика дає можливість вибрати передавальний пристрій та конструктивне виконання електричного двигуна.

Інерційна характеристика робочої машини показує, як змінюється момент інерції залежно від часу або кута повороту рухомих частин. При обертальному русі і незмінному навантаженні робочої машини момент інерції є незмінним. Натомість, машини з кривошипно-шатунним механізмом мають момент інерції, залежний від кута повороту шатуна.

Момент інерції виявляє себе лише в перехідних режимах: пуск машини, гальмування, коливання кутової швидкості при зміні навантаження. Отже, інерційна характеристика дає можливість визначити час пуску і гальмування системи двигун-робоча машина, підрахувати втрати електричної енергії в перехідних режимах. Момент інерції також впливає на рівномірність ходу машини при змінному навантаженні. За великого моменту інерції з метою зменшення часу пуску приймають двигун із підвищеним пусковим моментом.

Із максимальним зведеним моментом інерції робочої машини двигун, нагрітий до усталеної температури, допускає один пуск, а з холодного стану – два поТребаовні пуски. При цьому температура обмотки двигуна з класом стійкості від нагрівання F досягає 225°C , що відповідає температурі спрацювання вмонтованого температурного захисту. Таким чином, динамічний момент інерції в перехідних режимах зумовлює температурний режим двигуна.

Механічною характеристикою робочої машини називають залежність моменту статичних опорів M_C машини від її кутової швидкості ω .

Залежність статичних опорів від кутової швидкості розглядають при пуску машини без навантаження.

Механічні характеристики робочих машин дають можливість обрати електродвигун за пусковими властивостями, а також розв'язувати рівняння руху графічним способом.

Навантажувальною характеристикою (навантажувальною діаграмою) робочої машини називають залежність статичного опору або споживаної потужності від часу. Більшість сільськогосподарських машин мають випадковий характер навантажувальних діаграм, наприклад, різкозмінний характер навантажувальної діаграми мають подрібнювачі грубих кормів. Аналітично розраховують навантажувальні діаграми з постійним характером – вентиляторів, відцентрових насосів, вакуум-насосів, транспортерів сипучих матеріалів, зерноочисних машини, млинів, зернодробарок з автоматичними регуляторами

завантаження (АРЗ). Слабкозмінний характер навантажувальної діаграми мають подрібнювачі соковитих кормів, зернодробарки без АРЗ, змішувачі вологих кормів.

Навантажувальна діаграма є основною для визначення номінального режиму роботи двигуна та вибору його за потужністю. Крім того, при різкозмінній діаграмі навантаження піки статичного моменту або потужності використовують для перевірки двигуна за перевантажувальною здатністю або пусковим моментом. Характер навантажувальної діаграми використовують при виборі системи захисту від тривалих перевантажень. При постійному та слабкозмінному навантаженні захист від тривалих перевантажень забезпечують за допомогою теплових реле, а при різкозмінному - пристроями вмонтованого температурного захисту, який також використовують при короткочасному та повторно-короткочасному режимах.

Енергетична характеристика робочої машини – це залежність питомих витрат енергії від продуктивності машини. За ними визначають оптимальний режим роботи з точки зору енергетичних витрат.

1.5. Енергетичні перетворення у силовому каналі електроприводу

Електрична енергія перетвориться у механічну в силовому каналі електроприводу. Розглянемо **силовий канал** електроприводу помпи з регульованою витратою рідини (рис. 1.2.а). Силовий канал містить наступні елементи: силовий трансформатор (Тр) з лічильником обліку електроенергії (*Wh*); електрична мережа (ЕМ); електродвигун (ЕД); робочий орган - насос (Н); засувка, що регулює витрату рідини (Зас); технологічна частина - гідравлічна магістраль (Маг) із вимірювачами спожитої енергії – лічильником води (ЛВ) і манометром (М).

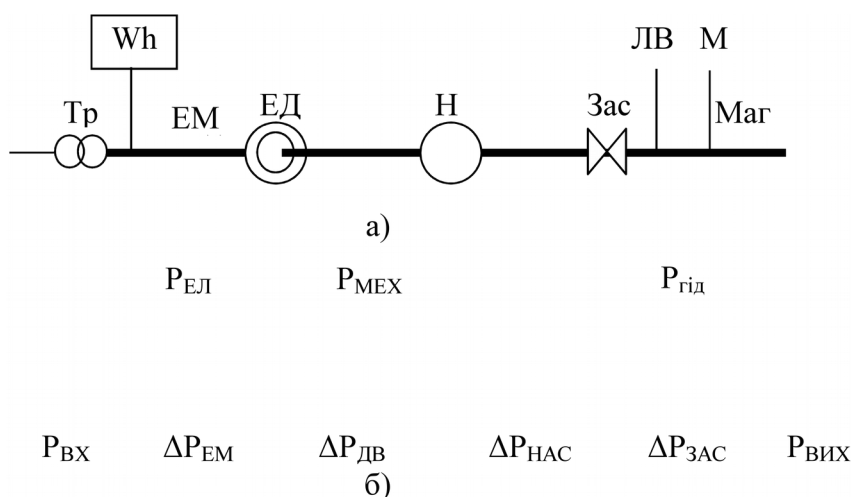


Рис. 1.2. Силовий канал електропривода помпи (а) і діаграма передачі потужності від джерела живлення до помпи (б)

Діаграму передачі потужності від джерела живлення до помпи зображено на рис. 1.2.б.

Потужність $P_{вх}$, яку споживає електропривод:

$$P_{ex} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cdot \cos \varphi \quad (1.1)$$

де U_{ϕ}, I_{ϕ} – фазна напруга і струм, φ – кут зсуву між напругою та струмом.

Механічну потужність P_{mex} визначають за кутовою швидкістю ω і моментом

M :

$$P_{mex} = M \cdot \omega \quad (1.2)$$

Гідравлічна потужність $P_{гидр}$ залежить від напору H і витрати Q :

$$P_{гидр} = \frac{HQ}{367} \quad (1.3)$$

Кожна ступінь перетворення й передачі енергії, незалежно від способу реалізації, супроводжується втратами потужності ΔP (рис. 1.2.б).

Втрати енергії визначають у такий спосіб:

$$\Delta W = \int_0^T \Delta P(t) dt \quad (1.4)$$

Розглянемо, яким чином можна розрахувати втрати потужності в силовому каналі електроприводу.

Втрати потужності в електричній мережі:

$$\Delta P_{EM} = 3I_{EM}^2(t)R_{EM} \quad (1.5)$$

де I_{EM} – струм електричної мережі; R_{EM} – активний опір електричної мережі.

$$\Delta P_{TP} = \Delta P_{XX} + \Delta P_{K3}(K_3)^2 \quad (1.6)$$

де $\Delta P_{XX}, \Delta P_{K3}$ – втрати неробочого ходу і короткого замкнення трансформатора, K_3 – коефіцієнт завантаження трансформатора. Втрати $\Delta P_{ДВ}$ в двигуні визначають за його коефіцієнтом корисної дії (ККД):

$$\eta_{ED} = \frac{P_{ED} - \Delta P_{ED}}{P_{ED}} \quad (1.7)$$

Втрати в двигунах несуттєві, так як сучасні двигуни мають високий ККД $\eta_{ED}=0,8 \div 0,9$.

Втрати $\Delta P_{НАС}$ в насосі також визначають за його ККД:

$$\eta_H = \frac{\Delta P_{НАС}}{P_{НАС} + \Delta P_{НАС}} \quad (1.1)$$

Максимального значення ККД помпи (70÷75%) досягають за номінального навантаження; ККД різко зменшується при зниженні навантаження.

Втрати в засувці $\Delta P_{ЗАС}$ можуть бути значимими.

Сумарну потужність втрат можна подати у вигляді:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{TP} + \Delta P_{EM} + \Delta P_{ED} + \Delta P_{НАС} + \Delta P_{ЗАС} \quad (1.9)$$

Узагальнюючи результати розглянутого енергетичного процесу електроприводу, можна намітити два шляхи підвищення енергоефективності:

1. оптимізація підведеної до споживача (помпи) потужності у відповідності з технологічним процесом;
2. зменшення втрат потужності в технологічному процесі.

Повну і достовірну характеристику енергетичної ефективності силового каналу електроприводу, можна зробити на основі ККД технологічного циклу:

$$\eta_y = \frac{W_{кор}}{W_{en}} = \frac{W_{кор}}{W_{кор} + \Delta W_y} \quad (1.2)$$

де $W_{кор}$ – необхідна корисна енергія за цикл; $W_{сп}$ – спожита енергія за цикл.

У ряді випадків не завжди можливо визначити необхідну корисну енергію, тому потрібно використовувати фактичну енергію, зареєстровану лічильником Wh (рис. 1.2.а).

1.6. Механічні характеристики робочих машин і електричних двигунів

Механічною характеристикою робочої машини називають залежність моменту M_c їх опорів, призведених до валу двигуна, від швидкості ω : $M_c=f(\omega)$ (рис. 1.3).

Для різноманітних робочих машин ці характеристики можуть бути поділені на 4 групи і описані формулою:

$$M_c = M_{тер} + (M_{с.ном} - M_{тер}) \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^{\alpha} \quad (1.11)$$

де $M_{тер}$ – момент сил тертя, які також навантажують двигун; $M_{тер}=M_{с.поч}$ – початковий момент опору;

$M_{с.ном}$ – момент статичного опору за номінальної кутової швидкості $\omega_{ном}$;

α – показник степеня, який залежить від типу робочої машини (механізму) і характеризує зміну статичного моменту опорів від кутової швидкості (рис. 1.3).

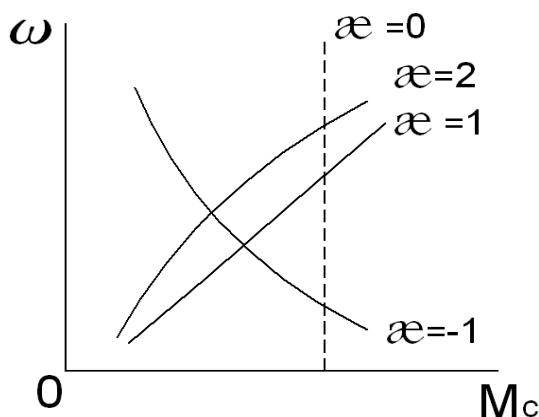


Рис. 1.3

1. ($\alpha = 0$) тут статичний момент опорів $M_c=const$ не залежить від кутової швидкості. До цієї групи машин належать підйомники, стрічкові транспортери, конвеєри з постійним навантаженням та інші транспортні механізми;

2. ($\alpha = 1$) статичний момент опорів $M_c(\omega)$ змінюється за лінійним законом. Таку механічну характеристику мають зерноочисні машини, генератор сталого струму з постійним навантаженням;

3. ($\alpha = 2$) момент зростає параболічно. До цієї групи належать вентилятори, відцентрові помпи, сепаратори, дробарки;

4. ($\alpha = -1$) механічна характеристика має гіперболічний характер, що характерний для металорізальних верстатів та зернових норій.

Механічною характеристикою електродвигуна називають залежність його швидкості від електромагнітного обертаючого моменту $\omega=f(M)$ (рис. 1.4).

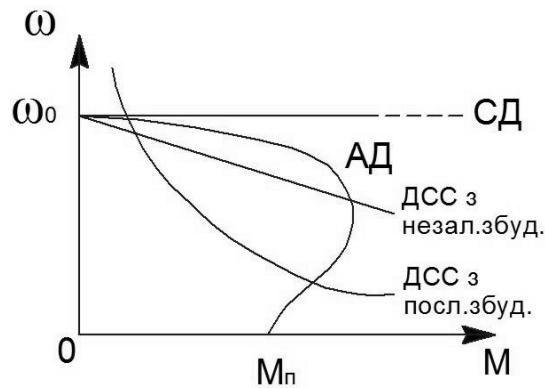


Рис. 1.4

Майже всі двигуни характеризують тим, що при зростанні моменту M швидкість ω знижується. Інтенсивність зниження залежить від жорсткості β механічних характеристик: $\beta=\Delta M/\Delta\omega$.

У разі нелінійних характеристиках їх жорсткість є змінною і тому β визначають у кожній точці як частинну похідну:

$$\beta = \frac{\partial M}{\partial \omega} \cdot \quad (1.12)$$

На робочих ділянках характеристик двигунів жорсткість є від'ємною $-\beta < 0$.

При проектуванні ЕП механічні характеристики приводного двигуна і робочої машини мають бути **сумісні**, тобто механічні характеристики мають перетинатися (точка, в якій $M = M_{C1}$ на рис. 1.5.а).

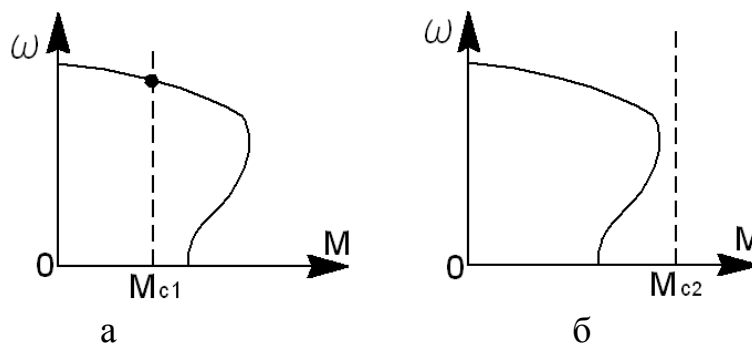


Рис. 1.5

На рис. 1.5.б показано випадок несумісних механічних характеристик, коли немає точки їх перетину ($M < M_{C2}$).

1.7. Усталений режим роботи електричного приводу

Усталений режим визначається **точкою перетину** механічних характеристик двигуна і робочої машини, де $M = M_C$.

Якщо момент опору M_C на валу двигуна зміниться, то автоматично зміниться швидкість двигуна ω_D та його момент M , і система знову набуде стійкої рівноваги, за якої $M = M_C$.

В електродвигунах роль автоматичного регулятора виконує проти-ЕРС двигуна: наприклад, характеристика (1) підйомного крану з M_{C1} на рис. 1.6 відповідає неробочому ходу крану з ω_1 . При його навантаженні M_{C2} зростає і характеристика набуває вигляду (2). При цьому двигун гальмується до ω_2 , завдяки чому знижується проти-ЕРС ($E=k\omega_D\Phi$), зростає струм якоря $I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}}$ і, відповідно, – момент двигуна $M = k \cdot I_{\text{я}} \cdot \Phi$. Момент M зростає доти, поки не зрівняється з M_{C2} (точка ω_2 на рис. 1.6).

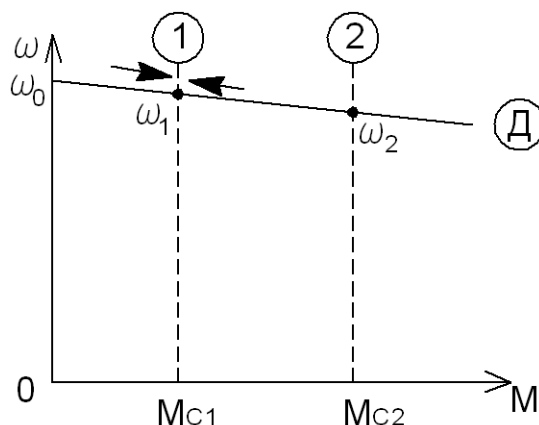


Рис. 1.6

Під час проектування електроприводів механічна характеристика робочої машини є заданою (рис. 1.3), тому для отримання стійкої роботи в усталеному режимі треба підібрати механічну характеристику двигуна відповідної форми (рис. 1.4) і розміру (рис. 1.5.a).

1.8. Стійкість роботи електроприводу в усталеному режимі

Стійкість роботи – це здатність двигуна відновлювати частоту обертання після нетривалих збурень, викликаних зміною навантаження, стрибком живлячої напруги тощо.

Критерій стійкості: привод статично стійкий, якщо в точці усталеного режиму виконується умова

$$\frac{\partial M}{\partial \omega} < \frac{\partial M_C}{\partial \omega} \quad (1.13)$$

Тобто, якщо при додатному прирості швидкості $\Delta\omega$ зберігається умова $M < M_C$, то після усунення збурень електропривод загальмується до попереднього значення ω .

На рис. 1.7 механічна характеристика підйомного крану має дві точки перетину з характеристикою асинхронного двигуна, тобто в обох точках режим є

усталеним, – перевіримо їх на стійкість. При сталому $M_c = \text{const}$ похідна $\frac{\partial M_c}{\partial \omega} = 0$, тому стійкість визначається лише жорсткістю механічної характеристики двигуна: якщо $-\beta < 0$, то робота в усталеному режимі є стійкою (точка перетину з $\omega_{уст1}$) і, навпаки – в точці $\omega_{уст2}$ робота в усталеному режимі є нестійкою, тобто при порушенні рівноваги привод не повертається у вихідну точку, натомість, або розженеться до $\omega_{уст1}$, або загальмується до $\omega = 0$.

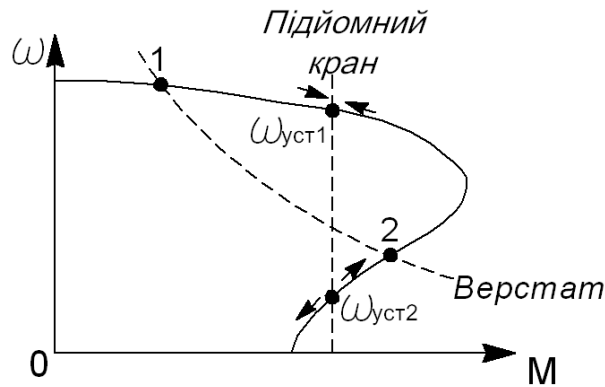


Рис. 1.7

Завдання. Якщо використовувати асинхронний двигун навантаживши його різними механізмами (наприклад, металорізальним верстатом на рис. 1.7) і є дві точки рівноваги (точки 1 та 2 на рис. 1.7), то в якій з них робота буде стійкою?

1.9. Рівняння динаміки електричного приводу

1. При рівномірному **поступальному** русі робота dA по здолянню сил F опору:

$$dA = F \cdot dS.$$

Потужність P цього руху:

$$P = \frac{dA}{dt} = F \cdot \frac{dS}{dt} = F \cdot V.$$

Для поступального руху баланс потужностей системи:

$$P = P_c + P_{дин} = P_c + P_j, \quad (1.14)$$

де P_j – динамічна потужність, що витрачається на зміну кінетичної енергії системи, $P_j = \frac{dW_j}{dt}$. Враховуючи, що кінетична енергія $W_j = \frac{mV^2}{2}$, отримаємо:

$$\frac{dW_j}{dt} = m \cdot V \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{V^2}{2} \cdot \frac{dm}{dt}.$$

Тоді з (1.14):

$$F \cdot V = F_c \cdot V + m \cdot V \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{V^2}{2} \cdot \frac{dm}{dt};$$

$$F = F_c + m \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{V}{2} \cdot \frac{dm}{dt};$$

$$\frac{dm}{dt} = \frac{dm}{dS} \cdot \frac{dS}{dt};$$

$$F = F_c + m \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{V^2}{2} \cdot \frac{dm}{dS}. \quad (1.15)$$

При $m = \text{const}$:

$$F = F_c + m \cdot \frac{dV}{dt}. \quad (1.16)$$

2. Для **обертального** руху робота:

$$dA = F \cdot r \cdot d\varphi = M \cdot d\varphi,$$

де r – радіус обертання; $d\varphi$ – кут повороту.

Потужність обертального руху:

$$P = \frac{dA}{dt} = M \cdot \frac{d\varphi}{dt} = m \cdot \omega.$$

Баланс потужностей системи:

$$P = P_c + P_j,$$

де P_j – динамічна потужність, що витрачається на зміну швидкості ω , $\left[\omega = \frac{d\varphi}{dt} \right]$.

Кінетична енергія системи при обертальному русі:

$$A_j = \frac{J\omega^2}{2},$$

де J – момент інерції системи. Тоді:

$$P_j = \frac{dA}{dt} = J \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ}{dt}.$$

Динамічний момент:

$$M_j = \frac{P_j}{\omega} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{d\varphi} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ}{d\varphi}.$$

За II-м законом Ньютона рівняння обертального руху:

$$\Sigma \vec{M} = J \cdot \frac{d\omega}{dt}.$$

У скалярній формі повне рівняння руху електричного приводу:

$$M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ}{d\varphi}. \quad (1.17)$$

У (1.17) враховано, що наприклад, при обертанні кривошипно-шатунного механізму $\varphi = \text{var}$ і $J = \text{var}$.

Якщо ж при $\varphi = \text{var}$ зберігається $J = \text{const}$, то $\frac{dJ}{d\varphi} = 0$, і тоді (1.17) спроститься:

$$M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (1.18)$$

(Обертаючий момент двигуна M врівноважується моментом опору M_c на валу двигуна і динамічним моментом M_j).

Знак „-” перед M_c вказує на гальмівну дію, що відповідає: підняттю вантажу, стисканню пружини, втратам на тертя тощо. При опусканні вантажу, розтисканні пружини і т.п. перед M_c проставляється знак „+”, бо M_c допомагає обертанню електропривода.

1.10. Характер руху електроприводу

Характер руху визначають за знаком динамічного моменту $M_j = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$.

З рівняння (1.18) обертального руху:

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

1. За $M > M_C$, прискорення $\frac{d\omega}{dt} > 0$ – отже, відбувається **розгін** електропривода.

2. За $M = M_C$, $\frac{d\omega}{dt} = 0$ – електропривод працює в **усталеному** режимі (точка перетину механічних характеристик електродвигуна і робочої машини).

3. За $M < M_C$, $\frac{d\omega}{dt} < 0$ – електропривод **гальмується**.

Отже, динамічний момент M_j з'являється тільки під час перехідних режимів.

1.11. Неусталений рух електричного приводу

Неусталений рух електроприводу виникає при відмінності моменту двигуна M від моменту навантаження M_C , тобто при $M_j \neq 0$.

Тривалість перехідних процесів t_{III} впливає на швидкодію механізму і його продуктивність; визначимо час перехідного процесу шляхом інтегрування рівняння руху:

$$M - M_C = J \cdot \frac{d\omega}{dt}; \quad dt = \frac{J}{M - M_C} \cdot d\omega;$$

$$t_{1-2} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J}{M - M_C} \cdot d\omega \quad (1.19)$$

З рівняння (1.19) видно, що теоретично час перехідного процесу $t_{III} \rightarrow \infty$, оскільки він закінчується за умови $M = M_C$, коли підінтегральний вираз $J/0 \rightarrow \infty$.

Тому на практиці вважають, що перехідний процес закінчується не за ω_2 , а за $\omega \approx 0,95\omega_2$.

Для рішення інтегралу (1.19) необхідно знати залежності моментів двигуна і навантаження від швидкості ω : $M = f(\omega)$, $M_C = f(\omega)$ (вважаємо, що $J = const$). Зокрема, прийнявши в рівнянні (1.19) $M = const$, $M_C = const$, $J = const$, отримаємо

$$t_{1-2} = \frac{J}{M - M_C} \cdot (\omega_2 - \omega_1). \quad (1.20)$$

При **пуску** електропривода початкові умови 1:

1. $M = M_{пуск}$; $\omega_1 = 0$.
2. $M = M_{НОМ}$; $\omega_2 = \omega_{НОМ}$.

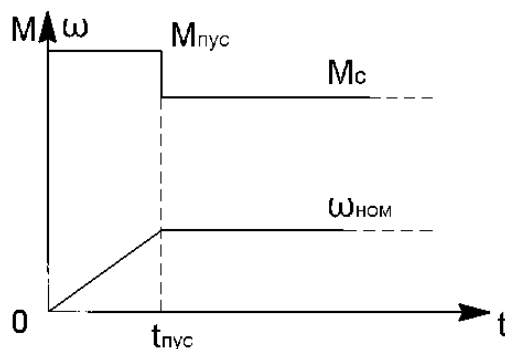


Рис. 1.8

За (1.20) час розгону від 0 до $\omega_{НОМ}$

$$t_{ПВС} = \frac{J}{M_{ПВС} - M_C} \cdot (\omega_{НОМ} - 0).$$

За $-M_j < 0$ відбувається *гальмування* електроприводу протягом часу:

$$t_r = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J}{(M - M_C)} \cdot d\omega = \int_{\omega_2}^{\omega_1} \frac{J}{M - M_C} \cdot d\omega.$$

Загалом M_j залежить від ω і часу t , тому для наочності (спрощення рівняння) доцільно застосовувати наближені методи інтегрування, наприклад, – графоаналітичні.

1.12. Графоаналітичний метод визначення тривалості перехідних процесів

Сутність графоаналітичного методу полягає в тому, що $d\omega$ і dt замінюють кінцевими приростами $\Delta\omega$ і Δt , а до рівняння руху підставляють середні значення моментів двигуна і навантаження для кожного інтервалу $\Delta\omega$.

Для прикладу розрахуємо тривалість пуску $t_{ПВС}$ привода вентилятора від асинхронного двигуна за методом пропорцій.

Вважаючи, що в інтервалі Δt різниця $M - M_C$ залишається сталою, з (1.18) отримаємо пропорцію:

$$\frac{M - M_C}{J} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \tag{1.21}$$

1. Побудуємо механічні характеристики $M(\omega)$ і $M_C(\omega)$ у другому квадранті рис. 1.9.

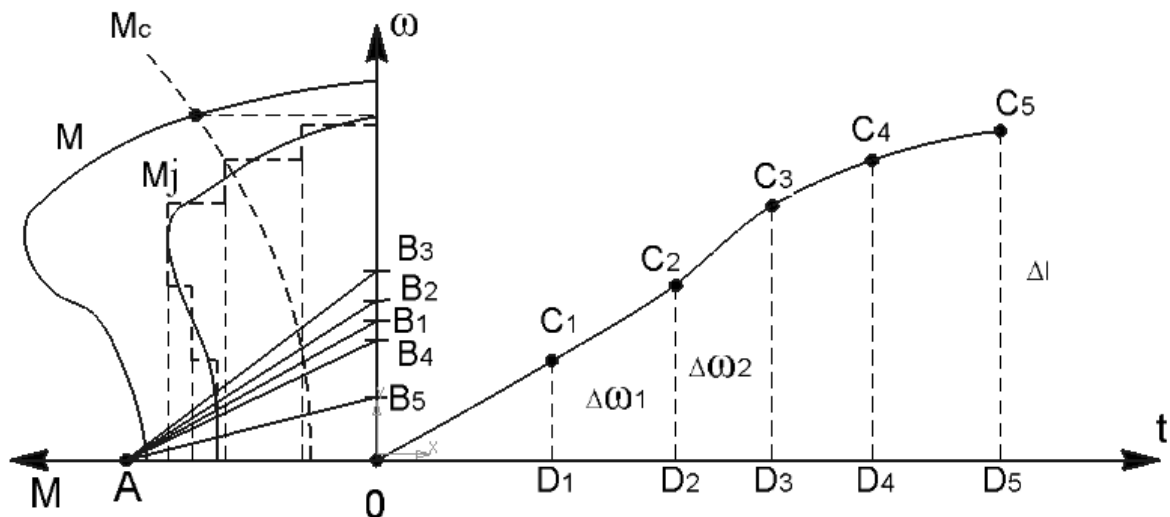


Рис. 1.9

2. Графічно знаходимо різницю абсцис кривих $M - M_C = M_j$ – графік динамічного моменту $M_j(\omega)$.

3. Замінюємо його ступінчастим, з ділянками $M_j = \text{const}$ у відповідних інтервалах $\Delta\omega$ (на рис. 1.9 – 5 ділянок).

4. В певному мірилі m_M відкладаємо отримані M_j по осі ординат (ω): для першої ділянки маємо OB_1 , для другої – OB_2 і т.д.

5. На осі абсцис в мірилі m_I відкладаємо J – отримаємо OA . Точку A сполучаємо з точками $B_1, B_2 \dots B_5$.

6. Від початку координат проводимо пряму $OC_1 // AB_1$ до перетину з горизонтальною лінією, яка відповідає верхній межі першого інтервалу $\Delta\omega_1$. Пряма OC_1 є графіком швидкості $\omega(t)$ для першої ділянки моментів, що впливає з подібності трикутників AOB_1 та OD_1C_1 . Дійсно, $OB_1/OA = D_1C_1/D_1O$, але

$$OB_1 \equiv M_1 - M_{C1} = M_{j1},$$

$$OA \equiv J, \quad D_1C_1 \equiv \Delta\omega_1,$$

і, отже, згідно пропорції (1.21), відрізок OD_1 є пропорційним тривалості пуску Δt_1 на першій ділянці.

7. Проводячи подібну побудову для решти ділянок M_j отримаємо шукану криву $\omega(t)$ і знаходимо повну тривалість пуску електропривода:

$$t_{\text{пус}} = m_t \cdot OD_5,$$

де m_t – мірило, що має відповідати співвідношенню:

$$\frac{m_M}{m_J} = \frac{m_\omega}{m_t} \quad (1.22)$$

Отже, задаючись трьома мірними (моменту сили M , моменту інерції J й швидкості ω), з (1.22) визначаємо четверте m_t :

$$m_t = m_\omega \cdot \frac{m_J}{m_M}.$$

Аналогічним чином розраховують і гальмівний режим електроприводу.

1.13. Зведення моментів сил, моментів інерції і мас до валу двигуна

Загалом елементи електричного приводу рухаються з різними швидкостями, здійснюючи як обертальний, так і поступальний рухи. Окрім цього, вони мають певну пружну деформацію під навантаженням, а у з'єднаннях елементів існують зазори. Все це ускладнює розрахунок динаміки електроприводу.

Тому, з достатньою для інженерних розрахунків точністю, приймають механічні зв'язки абсолютно жорсткими, а зазорами нехтують.

Тоді рух одного елемента надає повну інформацію про рух решти. Зазвичай за такий елемент приймають вал двигуна, а його взаємодія з рештою системи враховується шляхом зведення M, F, J та m до валу. Наприклад, всю механічну частину електричного приводу зводять до валу двигуна і реальну кінематичну схему на рис. 1.10.а замінюють еквівалентною схемою на рис. 1.10.б, яка має еквівалентну m' з J' , на яку діє зведений до валу статичний момент навантаження M_C' і електромагнітний момент двигуна M .

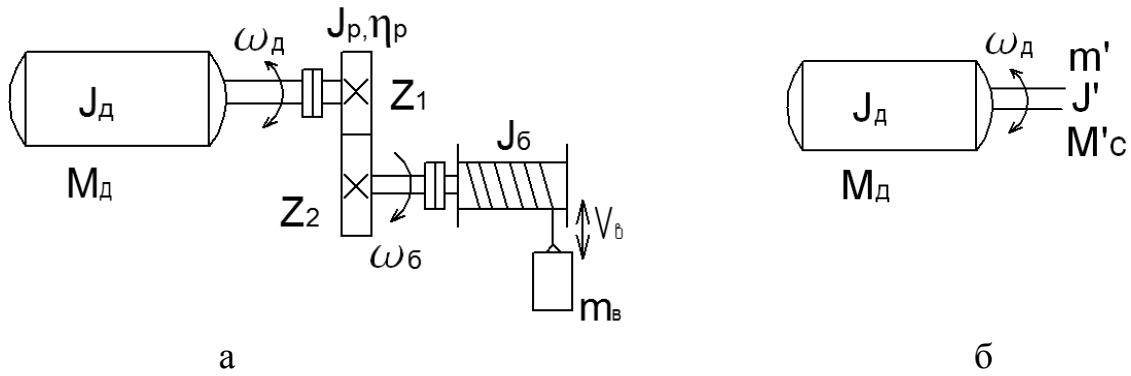


Рис. 1.10

а) Зведення **моменту навантаження** проводять на основі енергетичного балансу системи. Виходячи з рівності потужності у реальній та еквівалентній схемах, отримаємо:

$$M_c^{\square} \cdot \omega_d = \frac{1}{\eta} \cdot M_c \cdot \omega_M,$$

де M_c – момент навантаження, створюваний виконавчим механізмом;
 M_c' – той самий момент навантаження, зведений до швидкості двигуна ω_d ;
 ω_M – швидкість механізму;
 η – ККД, що враховує втрати потужності в передачах.
Звідси зведений момент навантаження:

$$M_c^{\square} = \frac{1}{\eta} \cdot M_c \cdot \frac{\omega_M}{\omega_d} = \frac{M_c}{\eta \cdot i}. \quad (1.23)$$

Тобто навантаження двигуна M_c зменшують у i разів, де i – передавальне число, яке дорівнює:

$$i = \frac{\omega_d}{\omega_M}.$$

За наявності між двигуном і механізмом кількох передач з $i_1, i_2 \dots$ та з відповідними $\eta_1, \eta_2 \dots$ (рис. 1.11), зведений момент навантаження:

$$M_c^{\square} = M_c \cdot \frac{1}{i_1 \cdot i_2 \dots} \cdot \frac{1}{\eta_1 \cdot \eta_2 \dots} \quad (1.24)$$

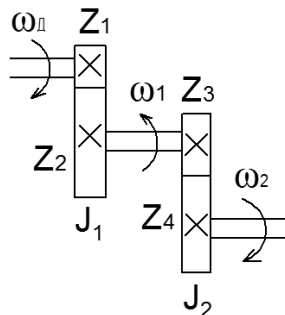


Рис. 1.11

б) Зведення **сил опору** проводять виходячи з балансу потужностей (рис. 1.10.а):

$$M_c^{\square} \cdot \omega_d = \frac{1}{\eta} \cdot F_c \cdot V_B,$$

тобто двигун здійснює корисну роботу по підняттю ваги масою m_B ($F_C = m_B \cdot g$) із швидкістю V_B і долає тертя в передачі (η).

Тоді зведений момент навантаження:

$$M_{\square} = \frac{1}{\eta} \cdot F_C \cdot \frac{V_B}{\omega_D} = \frac{1}{\eta} \cdot F_C \cdot \rho,$$

де $\rho = \frac{V_B}{\omega_D}$ – радіус зведення кінематичного ланцюга.

в) Зведення **моментів інерції** та **мас** ґрунтується на рівності сумарного запасу кінетичної енергії обертального руху в реальній та еквівалентній схемах (рис. 1.10 з урахуванням двоступінчатої передачі на рис. 1.11):

$$J_{\square} \cdot \frac{(\omega_D)^2}{2} = J_D \cdot \frac{(\omega_D)^2}{2} + J_1 \cdot \frac{(\omega_1)^2}{2} + J_2 \cdot \frac{(\omega_2)^2}{2} + \frac{m_B V_B^2}{2},$$

де J_D – момент інерції ротора двигуна, муфти й шестерні z_1 на його валу, які обертаються зі швидкістю ω_D ;

J_2 – момент інерції шестерні z_4 , муфти й барабану, які обертаються з ω_2 .

Замінімо динамічну дію всіх елементів дією одного, зведеного до швидкості валу двигуна ω_D :

$$J_{\square} = J_D + J_1 \left[\frac{\omega_1}{\omega_D} \right]^2 + J_2 \cdot \frac{(\omega_2)^2}{(\omega_D)^2} \cdot \frac{(\omega_1)^2}{(\omega_1)^2} + m_B \left[\frac{V_B}{\omega_D} \right]^2,$$

або, з урахуванням визначень i та ρ :

$$J_{\square} = J_D + \frac{J_1}{(i_1)^2} + \frac{J_2}{(i_1)^2 \cdot (i_2)^2} + m_B \cdot \rho^2. \quad (1.25)$$

1.14. Вибір оптимального передавального числа передаточного механізму

За частих пусків та гальмувань електричного приводу (наприклад, у Слідкуючих системах, стружних верстатах тощо) необхідно мінімізувати тривалість перехідного процесу з метою підвищення продуктивності виконуючого механізму.

Нехтуючи втратами в передачах ($\eta=1$), запишемо рівняння руху приводу відносно валу виконавчого механізму:

$$\begin{aligned} M_M \cdot \omega_M &= M_D \cdot \omega_D; \\ M_M &= M_D \cdot i; \\ \frac{J_M \cdot \omega_M^2}{2} &= \frac{J \cdot \omega_D^2}{2} + \frac{J_M \cdot \omega_M^2}{2}; \\ J_M &= J + J \cdot i^2. \end{aligned}$$

Тоді рівняння динаміки електроприводу:

$$i \cdot M_D - M_M = (J \cdot i^2 + J_M) \cdot \frac{d\omega_M}{dt},$$

де M_M – момент навантаження виконуючого механізму.

Визначимо i , при якому спостерігається **мінімальний час розгону** (за максимального прискорення ε):

$$\varepsilon_M = \frac{d\omega_M}{dt} = \max;$$

$$\frac{d\omega_M}{dt} = \frac{i \cdot M_D - M_M}{J \cdot i^2 + J_M} = 0.$$

Прийнявши $M_M = const$, та M_D рівне середньому за $t_{III} = const$, отримаємо шукане i_{opt} :

$$i_{opt} = \frac{M_M}{M_D} + \sqrt{\left(\frac{M_M}{M_D}\right)^2 + \frac{J_M}{J}}. \quad (1.26)$$

У випадках, коли $M_M \ll M_D$ (при пуску та гальмуванні) вираз для i_{opt} спроститься:

$$i_{opt} = \sqrt{\frac{J_M}{J}}. \quad (1.27)$$

Саме за такого " i_{opt} " $\varepsilon = max$, а $t_{III} \rightarrow min$.

За рахунок вибору оптимального передавального числа i_{opt} , радіуса зведення ρ механічної передачі та номінальної швидкості двигуна можна реалізувати зниження сумарних втрат під час пуску $\Delta W_{пуск}$.

1.15. Класифікація часових режимів роботи електродвигунів

Розрахунок потужності та вибір номінальних даних двигуна треба виконувати з урахуванням вимог технологічного процесу та режиму роботи виробничого механізму. Різноманіття режимів робочих машин, які відрізняють за величиною й характером зміни навантаження, швидкістю, співвідношенням часу роботи та паузи, тривалістю циклу, зумовлює також різні режими роботи електродвигунів.

Навантажувальною діаграмою двигуна називають залежність потужності P , моменту M або струму I від часу t роботи.

Відповідно до міжнародної класифікації за видом навантажувальної діаграми розрізняють вісім основних режимів роботи двигунів, що умовно позначені S1...S8 [2]. В основу цієї класифікації покладено особливості нагрівання й охолодження двигунів, а також характер зміни навантаження.

Залежно від характеру і тривалості навантаження розрізняють такі основні режими роботи: тривалий, короткочасний та повторно-короткочасний.

1.15.1. Тривалий режим (S1) роботи двигуна

У **тривалому** режимі (S1) двигун за час роботи з навантаженням $P = const$ нагрівається до усталеної температури $\theta_{уст}$, обумовленої рівністю теплоутворення і тепловіддачі. Навантажувальна діаграма $P(t)$ та крива нагріву $\theta(t)$ двигуна за тривалого режиму із сталим навантаженням зображені на рис. 1.12.

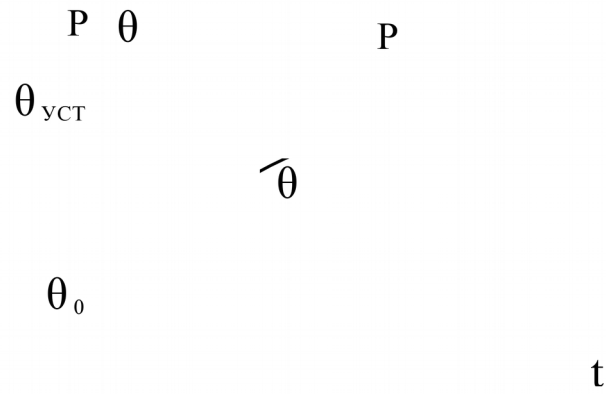


Рис. 1.12. Режим роботи S1

З тривалістю роботи від кількох годин до кількох змін поспіль із незмінним або малозмінним навантаженням працюють електроприводи вентиляторів, pomp, компресорів, транспортерів тощо.

У тривалому режимі із змінним навантаженням і короткочасними вимкненнями, за час яких двигун не встигає охолонути до температури довкілля, працюють електричні двигуни, що обслуговують металорізальні верстати, молоти, преси тощо.

1.15.2. Короткочасний режим (S2) роботи двигуна

Короткочасним режимом (S2) називають режим роботи, за якого впродовж роботи (t_p) двигун не встигає нагрітися до усталеної температури $\theta_{уст}$, а під час пауз (t_{II}) охолоджується майже до температури навколишнього середовища (θ_0). Це дозволяє обирати двигуни значно меншої потужності, ніж у тривалому режимі.

Навантажувальна діаграма $P(t)$ та криві нагріву $\theta(t)$ двигуна для короткочасного режиму зображені на рис. 1.13.

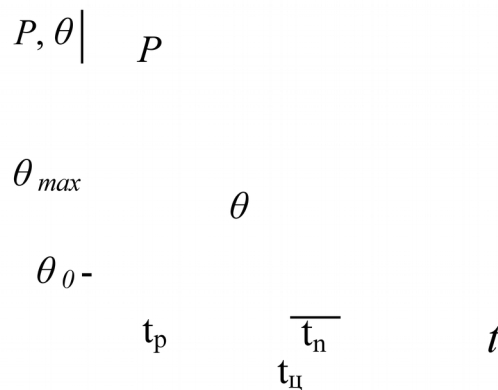


Рис. 1.13. Режим роботи S2

Цей режим роботи є циклічним, період циклу (t_{II}) визначають таким чином:

$$t_{II} = t_p + t_{II}.$$

ДСТУ встановлює стандартні значення часу роботи в даному режимі: $t_p = 10, 30, 60, 90$ хв. У паспорті машини режим роботи вказують умовним позначенням, наприклад: S2 - 10 хв., S2 - 30 хв. тощо.

У короткочасному режимі працює більшість електроприводів засувки трубопроводів, гідравлічних затворів шлюзів, шиберів, а також допоміжних механізмів різного роду верстатів.

1.15.3. Повторно-короткочасний режим роботи (S3, S4, S5)

Повторно-короткочасним називають циклічний режим роботи, за якого час роботи (t_p) під навантаженням чергується з паузами ($t_{II} = t_o$). Тривалість періодів роботи і пауз настільки короткочасні, що двигун не встигає нагрітися до усталеної температури $\theta_{уст}$ та охолонути до температури довкілля θ_0 .

Навантажувальна діаграма $P(t)$ та криві нагріву $\theta(t)$ двигуна для повторно-короткочасного режиму зображені на рис. 1.14.

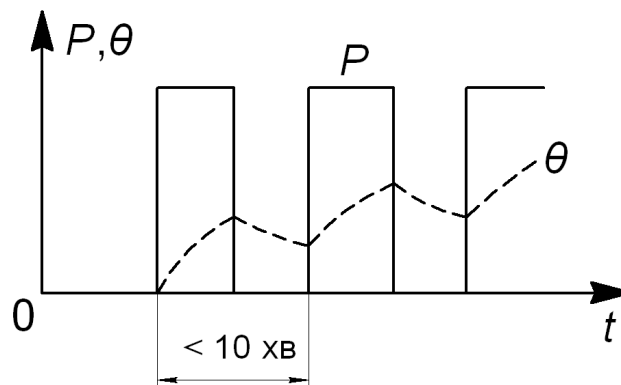


Рис. 1.14. Режим роботи S3

Для роботи в повторно-короткочасному режимі виготовляють спеціальні двигуни, які розраховані на роботу із стандартними значеннями тривалості увімкнення (ТВ) 15, 25, 40 і 60 % від тривалості всього циклу роботи.

Відносну тривалість роботи визначають із навантажувальної діаграми як відношення тривалості вмикання двигуна до тривалості всього циклу роботи:

$$ТВ = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n + t_0} \cdot 100\% \quad (1.28)$$

У повторно-короткочасному режимі працюють електричні двигуни робототехнічних систем, підіймально-транспортних механізмів (кранів, лебідок, тельферів, ліфтів) тощо.

ДСТУ визначає три (S3, S4, S5) повторно-короткочасні режими роботи.

Для **повторно-короткочасного** режиму **S3** стандартне значення тривалості одного робочого циклу t_{II} не повинна перевищувати 10 хвилин (рис. 1.14), тому можна зменшити потужність двигуна порівняно з тривалим режимом. Для режиму S3 характерні нечасті пуски, тривалість яких значно менша, ніж час роботи електродвигуна, а тому відсутній суттєвий вплив пускових струмів на тепловий режим машини. У паспорті машини цей режим вказується умовним позначенням: S3 - 15%, S3 - 25% тощо.

Для **повторно-короткочасного** режиму (**S4**) характерні часті пуски. За цього режиму роботи час пуску ($t_{нк}$) і час роботи (t_p) є сумірними величинами, а тому пускові струми істотно впливають на нагрівання машини (рис. 1.15).

Тривалість циклу роботи у режимі S4 розраховують за формулою:

$$t_u = t_{нк} + t_p + t_n.$$

Режим роботи S4 характеризують ТВ, а також кількістю вмикань за годину, стандартні значення яких становлять 30, 60, 120 та 240 вмикань, та коефіцієнтом інерції FI (відношення суми моменту інерції ротора та зведеного до валу двигуна моменту інерції інших рухомих частин привода і робочої машини до моменту інерції ротора), стандартні значення якого можуть бути 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0; 6,3 або 10.

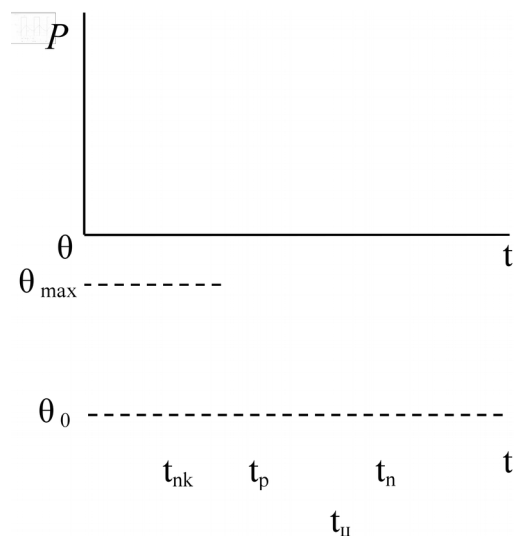


Рис. 1.15. Режим роботи S4

В умовному позначенні такого режиму вказують: ТВ у відсотках, кількість вмикань за годину та коефіцієнт інерції, наприклад: S4 - 25%, 120 вм/год, $FI = 2,0$. Це означає, що при $FI = 2,0$ двигун можна вмикати не частіше, ніж 120 разів за годину. Тривалість кожного циклу становитиме 0,5 хв, із яких час пуску ($t_{нк}$) і час роботи (t_p) складають 25% (7,5 с), а час паузи (t_n) – 22,5 с.

Дійсне значення тривалості вмикання (ТВ) у цьому випадку визначають за формулою:

$$ТВ = \frac{t_{нк} + t_p}{t_{нк} + t_p + t_n} 100\%.$$

Для **повторно-короткочасного** режиму **S5** характерними є часті пуски та електричне гальмування, яке відбувається протягом часу t_r (рис. 1.16).

Тривалість циклу роботи розраховують таким чином:

$$t_u = t_{нк} + t_p + t_r + t_n.$$

Стандартними значеннями коефіцієнта інерції FI для цього режиму є такі: 1,2; 1,6; 2,0; 2,5 та 4,0.

Тривалість вмикання визначають за формулою:

$$TB = \frac{t_{nk} + t_p + t_z}{t_{nk} + t_p + t_z + t_n} 100\%.$$

Стандартна кількість вмикань за годину та сама, що й за режиму S4 (30, 60, 120 та 240 вмикань).

В умовному позначенні режиму роботи S5 вказують: тривалість вмикання у відсотках, кількість вмикань за годину та коефіцієнт інерції, наприклад: S5 - 25%, 240 вмикань за годину, $FI = 2, 5$.

Р

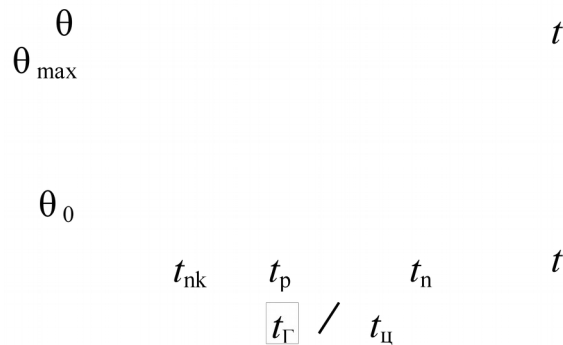


Рис. 1.16. Режим роботи S5

1.15.4. Переміжний режим роботи (S6, S7, S8)

Переміжними називають режими роботи, за яких час роботи при відповідних навантаженнях і частоті обертання чергується з відрізками часу неробочого ходу, або гальмування з реверсом, або роботою з іншою частотою обертання.

Однією з головних характеристик такого режиму є тривалість роботи з незмінним навантаженням (ТН), яку визначають у відсотках до тривалості одного циклу роботи (t_u). Передбачено такі стандартні значення ТН трьох видів переміжних режимів (S6, S7, S8): 15, 25, 40, 60%.

Для **переміжного** режиму S6 (рис. 1.17) характерним є те, що час роботи (t_p) під відповідним навантаженням (P) чергується з часом неробочого ходу ($t_{н.х}$), а вплив пускових струмів на процес нагрівання частин двигуна не враховують.

Тривалість циклу роботи розраховують за формулою:

$$t_u = t_p + t_{н.х}.$$

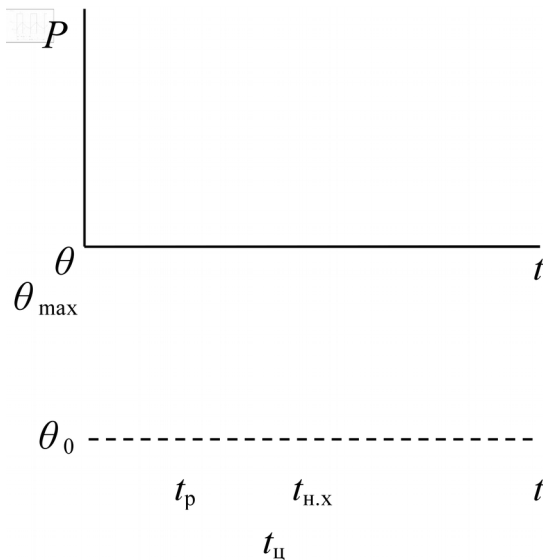


Рис. 1.17. Режим роботи S6

Стандартне значення тривалості одного циклу $t_{\text{ц}}=10$ хв. Тривалість навантаження (ТН) визначають за формулою:

$$ТН = \frac{t_p}{t_p + t_{\text{н.х}}} 100\% .$$

В умовному позначенні режиму роботи вказують значення ТН, наприклад: S6 - 25%.

Для *переміжного* режиму **S7** (рис. 1.18) характерною є наявність у циклі роботи частих реверсів з електричним гальмуванням. Цей режим роботи враховує вплив на нагрівання двигуна пускових струмів і струмів на час реверсу.

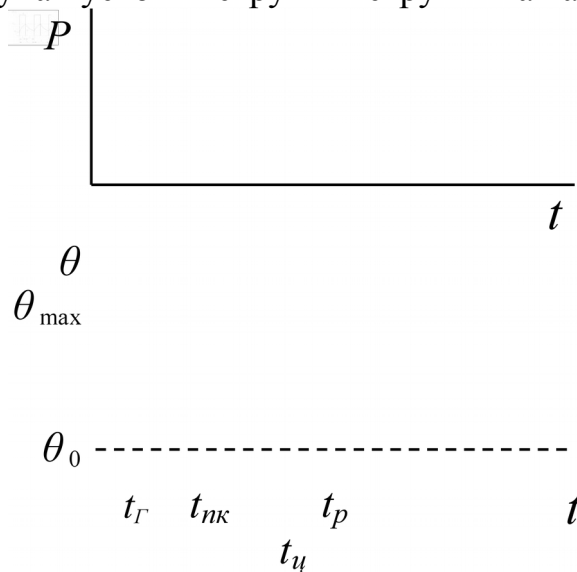


Рис. 1.18. Режим роботи S7

Тривалість циклу роботи ($t_{ц}$) визначають кількістю вмикань за годину, стандартними значеннями яких є: 30, 60, 120 та 240 при відповідному коефіцієнті інерції FI , стандартними значеннями якого є: 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0. Тривалість циклу роботи розраховують таким чином:

$$t_{ц} = t_r + t_{нк} + t_p.$$

В умовному позначенні такого режиму вказують кількість вмикань за годину та коефіцієнт інерції, наприклад: S7 - 60 вмикань за годину, FI - 1,6.

Для **переміжного** режиму **S8** (рис. 1.19) характерна наявність у циклі роботи двох і більше частот обертання електродвигуна (n_1, n_2, \dots, n_j).

Режим S8 має певну послідовність зміни часу роботи (t_{p1}) з однією частотою обертання (n_1) на час роботи (t_{p2}) з іншою частотою обертання (n_2) тощо (див. рис. 1.19).

Режим роботи визначає кількість циклів за годину (стандартні значення: 30, 60, 120, 240), коефіцієнт інерції FI (стандартні значення: 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0) і відносна тривалість навантаження на кожній із частот обертання (TH_1, TH_2, TH_3, \dots), які розраховують за формулами:

$$TH_1 = \frac{t_{нук1} + t_{p1}}{t_{нук1} + t_{p1} + t_{r1} + t_{p2} + t_{r2} + t_{p3}} \cdot 100\%;$$

$$TH_2 = \frac{t_{r1} + t_{p2}}{t_{нук1} + t_{p1} + t_{r1} + t_{p2} + t_{r2} + t_{p3}} \cdot 100\%;$$

$$TH_3 = \frac{t_{r2} + t_{p3}}{t_{нук1} + t_{p1} + t_{r1} + t_{p2} + t_{r2} + t_{p3}} \cdot 100\%.$$

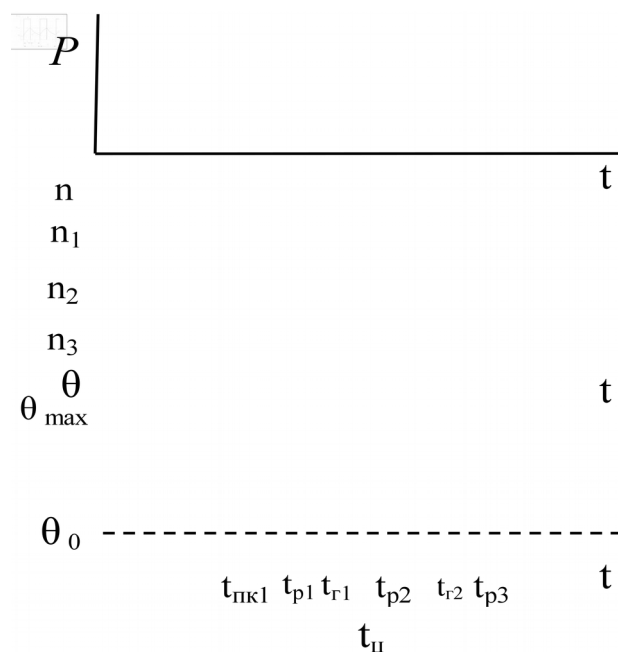


Рис. 1.19. Режим роботи S8

Тривалість циклу роботи в цьому режимі (рис. 1.19) розраховують за формулою:

$$t_{ц} = t_{нк1} + t_{р1} + t_{з1} + t_{р2} + t_{з2} + t_{р3}.$$

В умовному позначенні режиму S8 вказують кількість вмикань за годину, коефіцієнт інерції, навантаження, яке відповідає кожній із частот обертання, і його відносна тривалість, наприклад: S8 - 120 вмикань за годину, FI - 1,6; 22 кВт; 748 об/хв; 40%; 55 кВт; 1485 об/хв; 60%.

1.16. Визначення потужності та вибір двигунів електроприводів

Електричні двигуни обирають за родом струму, напругою, видом механічної характеристики, режимом роботи, швидкістю обертання та потужністю.

Від правильності вибору електродвигуна за потужністю значною мірою залежать надійність роботи електроприводу і його енергетичні показники.

Вибір електродвигуна із завищеною потужністю спричинює неповне використання технічних можливостей двигуна. У такому разі ККД двигуна знижується. У машинах змінного струму знижується також коефіцієнт потужності. Враховуючи те, що двигуни більшої потужності мають більші масогабаритні параметри і коштують дорожче, використання електродвигунів із завищеною потужністю є економічно недоцільним.

Одним із головних критеріїв вибору електродвигуна за потужністю є температура його обмоток. Потужність двигуна розраховується за умовою допустимого *нагріву* ізоляції (перевантаження двигуна не призводить до механічних поломок, але веде до значного підвищення струму I і, згідно закону Джоуля-Ленця, – перегріву обмоток).

Для електропривода зі *змінним навантаженням* двигун, обраний відповідно до максимальної потужності діаграми буде недовантаженим, а відповідно до мінімальної потужності діаграми – перевантаженим. Вибір двигуна за середнім значенням не враховує квадратичної залежності між тепловою енергією Q і струмом I в обмотках (закон $Q=I^2Rt$).

Для розрахунку потужності електродвигуна, що працює зі змінними навантаженнями, поширеними є два методи: метод середніх втрат і метод еквівалентних величин.

За методом середніх втрат розраховують величину середніх втрат для попередньо обраного електродвигуна [3]:

$$\Delta P_{cp} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n},$$

де $\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n$ - потужності втрат попередньо вибраного електродвигуна на кожному з інтервалів навантаження; t_1, t_2, \dots, t_n - тривалість роботи на кожному з інтервалів.

Умова правильного вибору електродвигуна:

$$\Delta P_{cp} \leq \Delta P_{ном},$$

де $\Delta P_{ном}$ - номінальні втрати попередньо вибраного електродвигуна.

Цей метод не набув широкого застосування при розрахунку потужності електродвигуна з таких причин:

- це метод перевірки, а не вибору потужності електродвигуна;
- він є трудомістким, оскільки для остаточного вибору потребує розгляду кількох варіантів попередньо вибраних електродвигунів.

Значно частіше застосовують метод **еквівалентних** по тепловій дії величин.

Еквівалентною називають таку потужність, при якій двигун нагрівається так само, як і при заданій змінній потужності.

$$Q = (I_1)^2 R t_1 + (I_2)^2 R t_2 + \dots = Q_{EKB}.$$

Середньоквадратичний еквівалентний струм

$$I_{EKB} = \sqrt{\frac{\sum (I_i^2 \cdot t_i)}{\sum t_i}}.$$

За $U = \text{const}$, $\varphi = \text{const}$: $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$, тому, для прямокутних ділянок навантажувальної діаграми еквівалентна потужність:

$$P_{EKB} = \sqrt{\frac{\sum (P_i^2 \cdot t_i)}{\sum t_i + t_0}}, \quad (1.29)$$

де P_i – потужність на i -х ділянках, t_i – тривалість дії P_i , t_0 – тривалість паузи.

Для прикладу, виконаємо розрахунок потужності електродвигуна за методом еквівалентних величин на основі діаграми статичних навантажень на валу механізму $M_M = f(t)$, а також у відповідності з параметрами живлячої мережі. Згідно з рис. 1.20 насамперед необхідно визначити, в якому режимі працюватиме електродвигун – тривалому, короткочасному чи повторно-короткочасному.

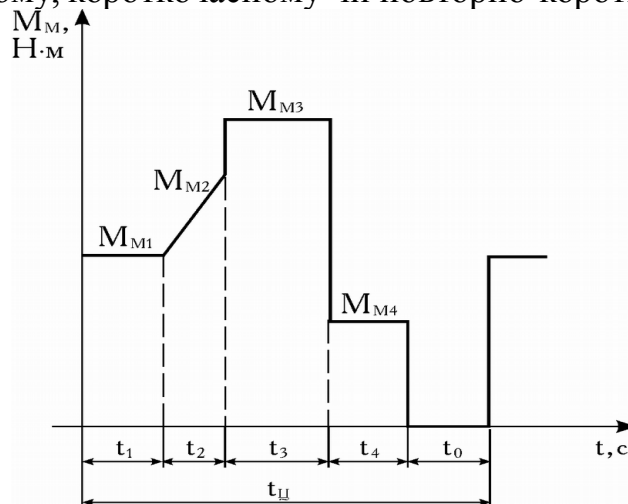


Рис. 1.20. Графік статичних навантажень на валу механізму

1.16.1. Вибір двигуна для тривалого режиму роботи

1. Якщо двигун працює у **тривалому** режимі зі **змінним навантаженням**, то по заданій діаграмі статичних навантажень обчислюють значення еквівалентного моменту за час циклу, H_M :

$$M_{m.e} = \sqrt{\frac{M_{m1}^2 + M_{m2}^2 + \dots + M_{mn}^2}{t_1 + t_2 + \dots + t_{no} + \beta}}, \quad (1.30)$$

де β - коефіцієнт, що враховує погіршення тепловіддачі двигуна під час паузи, для тривалого режиму попередньо Треба прийняти $\beta = 1$.

Якщо на будь-якій з ділянок діаграми значення моменту M_M непостійне і, наприклад, графік має вигляд трапеції (друга ділянка на рис. 1.20), то до формули (1.30) треба підставити деяке еквівалентне постійне значення для цієї ділянки, обчислене за формулою:

$$M_k = \sqrt{\frac{M_{поч}^2 + M_{поч} M_{кін} + M_{кін}^2}{3}}, \quad (1.31)$$

де $M_{m1} = M_{поч}$ і $M_{m2} = M_{кін}$ - відповідно початкове і кінцеве значення моменту на ділянці.

Обчислюють попередню потужність на валу двигуна, кВт:

$$P = \frac{k M_{m.e} \omega_m}{\eta} \cdot 10^{-3}, \quad (1.32)$$

де k - коефіцієнт, який враховує динамічне навантаження двигуна при розгоні та гальмуванні приводу, приймають на рівні 1,1-1,25; ω_m - кутова швидкість механізму, рад/с; η - ККД передачі.

Визначають потрібну частоту обертів електродвигуна, об/хв:

$$n_d = \frac{60 \omega_m}{2\pi}, \quad (1.33)$$

де i - передавальне число.

Потужність електродвигуна $P_{НОМ}$ обирають з довідника [3, 4] як найближчу більшу за $P_{ЕКВ}$:

$$P_{НОМ} \geq P_{ЕКВ}.$$

За $\beta = 0$ час паузи t_0 не підставляють до знаменника, тобто момент $M_{m.e}$ обчислюють за час робочого періоду. Натомість, час паузи t_0 враховують у цьому режимі при обчисленні тривалості вмикання:

$$TB = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n + t_0} \cdot 100\%. \quad (1.34)$$

Оскільки TB є стандартизованою величиною ($TB_{cm} = 15\%; 25\%; 40\%; 60\%$), то обчислене за формулою (1.34) значення потужності треба звести до стандартного значення TB_{cm} згідно формули, кВт:

$$P' = P \sqrt{\frac{TB}{TB_{cm}}}. \quad (1.35)$$

За каталогом обирають двигун виходячи з умови:

$$P_n \geq P'.$$

Треба зазначити, що за TB понад 60% обирають двигун для тривалого режиму роботи, а за TB меншій за 10% – для короткочасного.

2. У *тривалому* режимі роботи за *сталого навантаження* $P_M = \text{const}$:

$$P_D = \frac{P_M}{\eta_{\text{ПЕРЕДАЧИ}}}; \quad P_{\text{НОМ}} \geq P_D.$$

1.16.2. Вибір двигуна для повторно-короткочасного режиму

Для *повторно-короткочасного* режиму роботи випускають спеціальні двигуни, які порівняно із звичайними мають збільшені пускові моменти і зменшену інерційність ротору. У паспорті таких двигунів вказують відносну тривалість вмикання TB .

Потужність двигуна визначають за еквівалентною потужністю $P_{\text{ЕКВ}}$.

Типова навантажувальна діаграма повторно-короткочасного режиму роботи складається з періоду пуску машини t_1 з потужністю P_1 , періоду роботи з потужністю P_2 , періоду гальмування t_3 з потужністю P_3 і паузи t_0 (рис. 1.21).

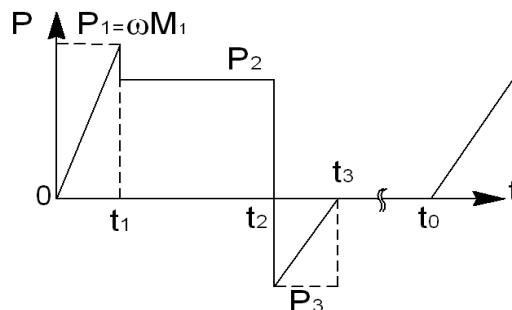


Рис. 1.21

Враховуючи те, що при пуску і гальмуванні струми і нагрів двигуна мають максимальні значення – приймають пускову (P_1) та гальмівну (P_3) потужності постійними і прирівнюють їх до максимального значення, тоді еквівалентна потужність і TB для навантажувальної діаграми на рис. 1.21:

$$P_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\frac{(P_1)^2 \cdot t_1 + (P_2)^2 \cdot t_2 + (P_3)^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}},$$

$$TB = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_0} \cdot 100\%.$$

У випадку, коли $TB \neq TB_{\text{СТ}}$, двигун обирають на найближче більше значення TB , а розрахункову потужність зводять до каталожної $TB_{\text{СТ}}$ згідно формули:

$$P_{(TB_{\text{СТ}})} = P_{\text{ЕКВ}} \cdot \sqrt{\frac{TB}{TB_{\text{СТ}}}}. \quad (1.36)$$

Потужність електродвигуна $P_{\text{НОМ}}$ обирають з довідника [3, 4] як найближчу більшу за $P_{(TB_{\text{СТ}})}$: $P_{\text{НОМ}} \geq P_{(TB_{\text{СТ}})}$.

При $TB > 0,6 \dots 0,7$ обирають двигун для тривалого, а при $TB < 0,1$ – для короткочасного режиму роботи.

Для *короткочасного* режиму роботи: двигун розраховують так, аби у кінці робочого періоду його температура становила гранично допустиму.

1.17. Побудова навантажувальної діаграми електроприводу та перевірка за умовами нагрівання і припустимого навантаження

Навантажувальні діаграми будують на основі розрахунку перехідних режимів. Навантажувальна діаграма будується спрощеним методом, за яким змінний момент або струм при пуску і гальмуванні замінюють прямокутним графіком та робиться припущення, що механічна характеристика приводу є абсолютно жорсткою.

На рис. 1.22 проілюстровано процес побудови спрощеної навантажувальної діаграми.

1. Спочатку будують графік кутової швидкості (рис. 1.22.a) за припущення, що при збільшенні чи зменшенні навантаження швидкість не змінюється.

2. Будують графік прискорення (рис. 1.22.b), що приймають постійним у процесі пуску і гальмування, рад/с :

$$\varepsilon_n = \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_n}{t_n};$$

$$\varepsilon_z = -\frac{d\omega}{dt} = \frac{-\omega_n}{t_z}.$$

Потому будують графіки статичного і динамічного моментів.

3. Динамічний момент під час пуску і гальмування (рис. 1.22.c) обчислюють відповідно за формулами, $\text{Н}\cdot\text{м}$:

$$M_{\text{дин.з}} = J' \frac{d\omega}{dt};$$

$$M_{\text{дин.з}} = -J' \frac{d\omega}{dt},$$

де J' - зведений момент електропривода, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$.

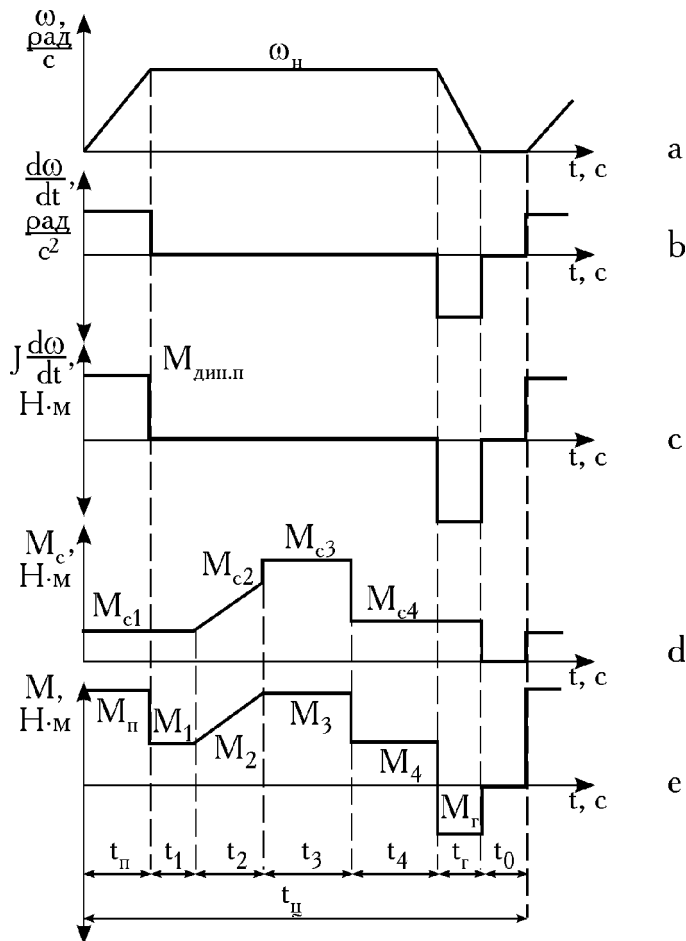


Рис. 1.22. Побудова навантажувальної діаграми двигуна електроприводу

4. Для побудови графіка статичного моменту (рис. 1.22.d) на валу електродвигуна використовують заданий графік статичних навантажень на валу механізму, моменти на всіх ділянках якого приводять до валу двигуна за допомогою формули (1.23):

$$M_{c.j} = \frac{M_{m.j}}{\eta_i},$$

де η і i - відповідно ККД і передавальне число передачі.

5. Відповідно до основного рівняння обертового руху електропривода:

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

проводять сумування статичних та динамічних моментів і будують результуючу навантажувальну діаграму електропривода (рис. 1.22.e).

За отриманою навантажувальною діаграмою обчислюють значення еквівалентного моменту за виразом (1.30):

$$M_e = \sqrt{\frac{M_n^2 \beta_n t_n + M_1^2 \beta_1 t_1 + M_2^2 \beta_2 t_2 + \dots + M_k^2 \beta_k t_k + M_r^2 t_r}{\beta_n t_n + t_1 + t_2 + \dots + t_k + \beta_0}},$$

де β_0 і β_r - коефіцієнти, що враховують погіршення умов охолодження відповідно під час паузи, пуску і гальмування:

$$\beta_n = \beta_0 + (1 - \beta_0) \frac{\omega}{\omega_n} \frac{1 + \beta_0}{2}.$$

Приймають наступні значення β_0 : 0.25 – для двигунів закритого виконання без обдуву; 0.30 – для закритих двигунів, що обдуваються, з ребристою поверхнею; 0.70 – для двигунів відкритого і захищеного виконання з вентилятором на валу; 1.0 – для двигунів з незалежною вентиляцією.

Значення M_e порівнюють зі значенням номінального моменту M_n попередньо обраного двигуна:

$$M_e \leq M_n.$$

Якщо це співвідношення виконується, то двигун за умовами нагрівання вибраний вірно.

Для перевірки на перевантаження необхідно визначити відношення максимального моменту M_{max} на навантажувальній діаграмі (рис. 1.22.е) до номінального моменту двигуна. Якщо це відношення менше каталожного відношення для даного двигуна:

$$\frac{M_{max}}{M_n} \leq \frac{M_{max}}{M_n} \cdot k_{cat},$$

то двигун задовольняє умовам перевантаження.

Після цього двигун вважається обраним остаточно.

II. ЕЛЕКТРОПРИВОД НА ОСНОВІ ДВИГУНІВ СТАЛОГО СТРУМУ

2.1. Механічні характеристики двигунів сталого струму незалежного збудження

Електричну схему електропривода з двигуном сталого струму незалежного збудження зображено на рис. 2.1. У кола якоря і збудження включено додаткові резистори $R_{\text{д}}$, $R_{\text{зб}}$ відповідно для регулювання моменту двигуна ($M = C_M I \Phi$) і потоку збудження Φ .

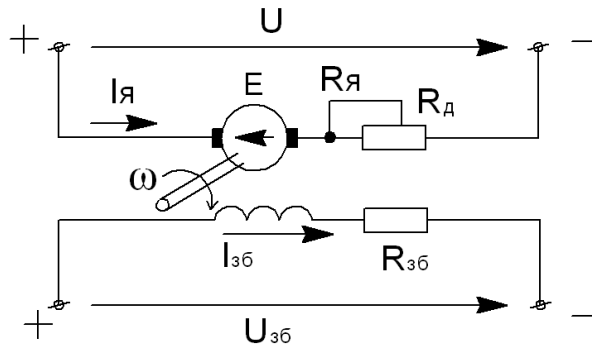


Рис. 2.1

Аналітичний вираз механічної характеристики електропривода отримаємо з рівняння рівноваги напруг для якорного кола. Якщо знехтувати реакцією якоря, то в усталеному режимі роботи напруга мережі U врівноважується падом напруг в колі якоря та індукованою в якорі проти-ЕРС:

$$U = IR_{\text{як}} + E.$$

Враховуючи, що

$$E = C_M \omega \Phi,$$

де C_M – конструктивний коефіцієнт двигуна сталого струму;

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \text{ – кутова швидкість ротора двигуна, рад/с.}$$

Отримаємо формулу для *електромеханічної* характеристики $\omega(I)$ двигуна сталого струму незалежного збудження:

$$\omega = \frac{U}{C_M \Phi} - \frac{IR_{\text{як}}}{C_M \Phi}. \quad (2.1)$$

Графіки електромеханічних характеристик являють собою прямі лінії (рис. 2.2), нахил яких зумовлює значення опору якорного кола $R_{\text{як}}$.

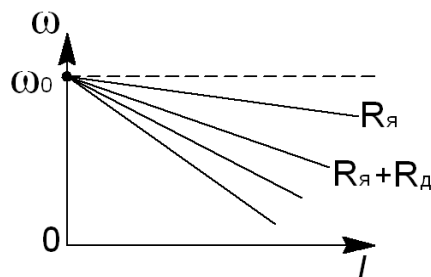


Рис. 2.2

Підставивши в (2.1) струм I через момент двигуна сталого струму ($M = C_M I \Phi$), отримаємо вираз для **механічної** характеристики:

$$\omega = \frac{U}{C_M \Phi} - \frac{MR_{ЯК}}{C_M^2 \Phi^2}, \quad (2.2)$$

або

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega,$$

де ω_0 – швидкість неробочого ходу,

$\Delta\omega$ – перепад швидкості.

Видно, що характеристики при сталих $U, \Phi, R_{ЯК}$ є прямими лініями, тому їх будують по 2-х точках – номінального режиму і неробочого ходу (н.х).

Побудуємо природну характеристику (рис. 2.3) за паспортними даними двигуна:

1. номінальний режим: $M_H = \frac{P_H}{\omega_H}; \quad \omega_H = \frac{2\pi n_H}{60},$

2. н.х: $M = 0; \quad \omega_0 = \frac{U_H}{C_M \Phi},$ із рівняння електромеханічної характеристики для

номінального режиму $C_M \Phi = \frac{U_H - I_H R_{Я}}{\omega_H},$ з урахуванням цього: $\omega_0 = \omega_H \cdot \frac{U_H}{U_H - R_{Я} I_H}.$

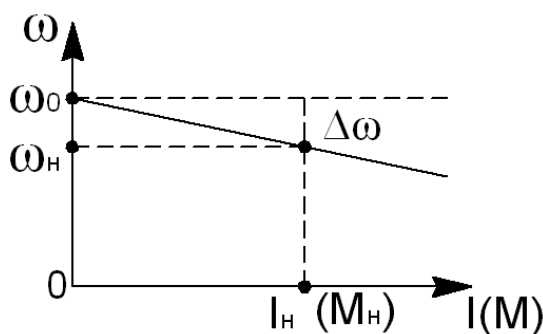


Рис. 2.3

Змінюючи параметри $U, \Phi, R_{ЯК}$ можна отримувати різні $\omega_{ДСС}$ при певному моменті M на валу і таким чином регулювати швидкість ω електропривода.

2.2. Регулювання частоти обертання двигуна сталого струму

Регулювання частоти обертання кількісно характеризують показники:

- **напря́м** регулювання відносно природної характеристики;
- **діапазон** при номінальному струмі I_H (відношення ω на крайніх характеристиках):

$$D = \frac{\omega_{MAX}}{\omega_{MIN}},$$

- **плавність** регулювання, визначається числом штучних характеристик в певному діапазоні і оцінюється відношенням швидкостей на двох найближчих характеристиках:

$$K_{ПЛ} = \frac{\omega_i + 1}{\omega_i};$$

- **економічність** (характеризує ККД при регулюванні ω : $\eta = P2/(P2 + \Delta P)$, де ΔP – втрати потужності);
- **простота** реалізації тощо.

2.2.1. Регулювання частоти обертання двигуна зміною опору в якірному колі

Регулювання частоти обертання двигуна сталого струму зміною опору в якірному колі (рис. 2.1): $R_{ЯК} = R_{Я} + R_{Д} = var$, при $\Phi_H = const$, $U_H = const$.

Із залежності $\omega(I)$ видно (рис. 2.4), що нахил характеристик ($\Delta\omega$) при фіксованих значеннях U , Φ є пропорційний опору $R_{ЯК}$. При цьому всі штучні характеристики перетинаються в одній точці з координатами неробочого ходу (ω_0 , $I=0$).

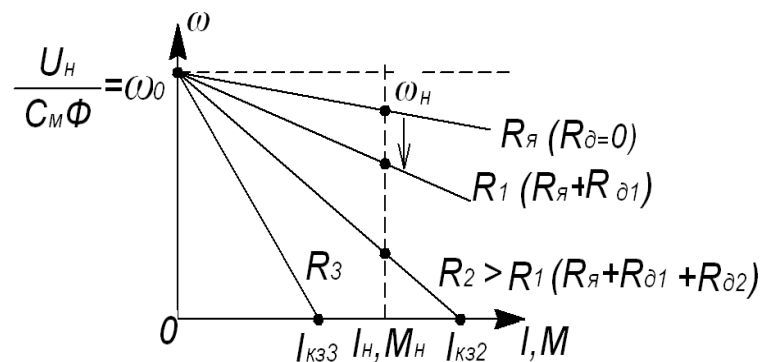


Рис. 2.4

Показники регулювання частоти обертання:

- 1) регулювання лише долі від ω_H ;
- 2) діапазон регулювання D замалий ($D \leq 2 \dots 3$);
- 3) регулювання ступінчате (дискретне);
- 4) спосіб не є економічним, оскільки при зменшенні ω у 2 рази ($D=2$) втрати потужності дорівнюють половині від споживаного значення ($\eta \leq 50\%$);
- 5) спосіб є простим і широко застосованим (наприклад, у тролейбусах).

2.2.2. Регулювання частоти обертання зміною магнітного потоку незалежного збудження

Регулювання частоти обертання двигуна сталого струму зміною магнітного потоку збудження: $\Phi(I_{зб}) = var$, при $R_{ЯК} = const$, $U_H = const$.

Причому, Φ змінюється тільки в бік зменшення з двох причин:

- по-перше: зростання $I_{зб} > I_{зб.ном}$ призведе до перегріву двигуна;
- по-друге: двигун розрахований на роботу з магнітною системою, близькою до насичення $\Phi_H \approx \Phi_{МАХ}$ (рис. 2.5).

1. З *електромеханічних характеристик* $\omega(I)$ видно (рис. 2.6), що нахил характеристик ($\Delta\omega$) при фіксованих значеннях $U, R_{ЯК}$ є обернено пропорційним потоку. Залежності $\omega(I)$ мають спільну точку з координатами $(0, I_{кз})$: режим короткого замикання (к.з.) реалізується при нерухомому роторі $\omega=0$, струм к.з. $I_{кз} = \frac{U_H}{R_{ЯК}}$ і від Φ не залежить. Натомість, зменшення Φ призведе до підвищення ω_0 , оскільки $\omega_0 = \frac{U}{C_M \Phi}$ (рис. 2.6).

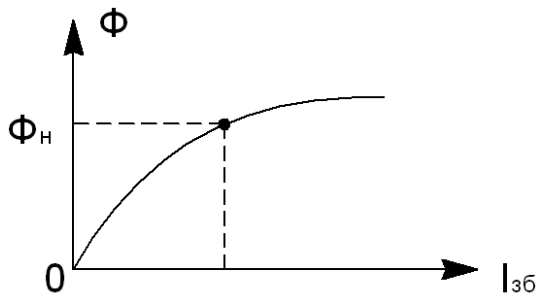


Рис. 2.5

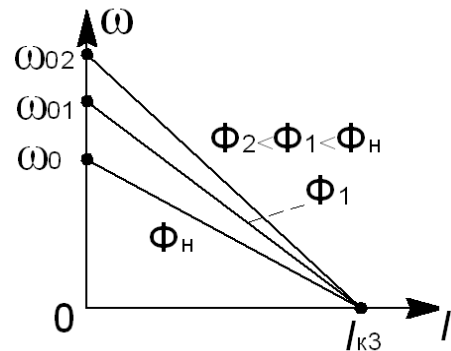


Рис. 2.6

2) Механічні характеристики $\omega(M)$.

У режимі короткого замикання при нерухомому роторі $\omega=0$:

$$M_{кз} = \frac{UC_M \Phi}{R_{ЯК}} = C_M I_{кз} \Phi .$$

Оскільки $I_{кз} = \text{const}$, то зменшення Φ призводить до зменшення $M_{кз}$ (рис. 2.7).

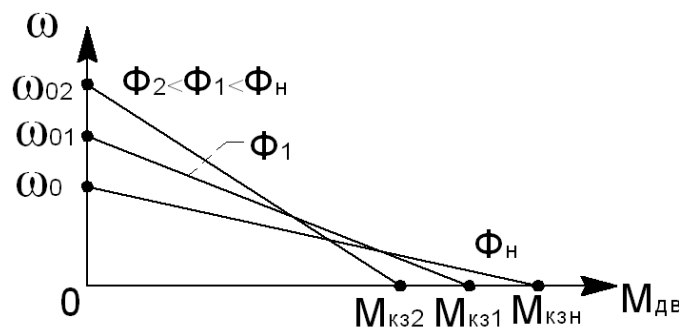


Рис. 2.7

Показники регулювання частоти обертання:

- регулювання тільки вгору;
- діапазон регулювання $D = 3/1$;
- плавне регулювання;
- економічний спосіб, бо регулювання здійснюється в малопотужному колі збудження (застосовується в автоматичних електричних приводах металорізальних верстатів, прокатних станів тощо).

При зменшенні потоку Φ , двигун змушений споживати більший струм аби здолати навантаження ($M = C_M \Phi \downarrow I \uparrow = \text{const}$).

Максимальна швидкість ω_{MAX} обмежується:

- механічною міцністю підшипників;
- комутаційною здатністю машини (при збільшенні швидкості погіршується контакт щіток з колектором);
- відцентровою силою, яка може вирвати ізоляційні прокладки з пазів.

Тому, неприпустимим є обрив обмотки збудження при неробочому ході, бо при $I_{зб} = 0$, $\Phi \rightarrow 0$ і $\omega_0 = \frac{U}{C_M \Phi} \rightarrow \infty$.)

2.2.3. Регулювання частоти обертання зміною напруги живлення

Регулювання частоти обертання двигуна сталого струму зміною напруги живлення $U = var$, за $R_{ЯК} = const$, $\Phi = const$, можна реалізувати, якщо якір двигуна живиться від керованого джерела (перетворювача U).

Із залежностей $\omega(I)$ та $\omega(M)$ (рис. 2.8) видно, що нахил характеристик $\Delta\omega$ не змінюється при зміні U , отже всі штучні характеристики є паралельними між собою: $\omega_0 = \frac{U}{C_M \Phi} = var \equiv U$.

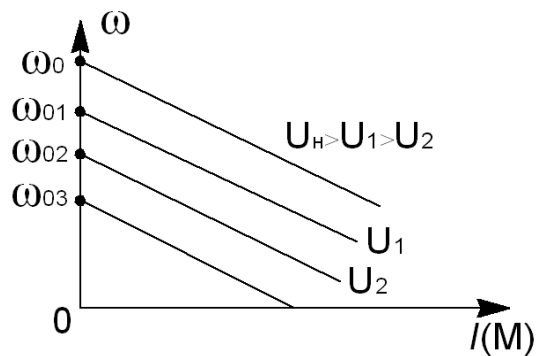


Рис. 2.8

Показники регулювання частоти обертання напругою:

- 1) регулюється тільки вниз;
- 2) діапазон регулювання $D = 1/10$;
- 3) плавне регулювання;
- 4) економічне;
- 5) технічна реалізація є найскладнішою.

Розглянемо, наприклад, *електромашинний* перетворювач енергії трифазного змінного струму в енергію сталого струму (система "Генератор-Двигун") – рис. 2.9.

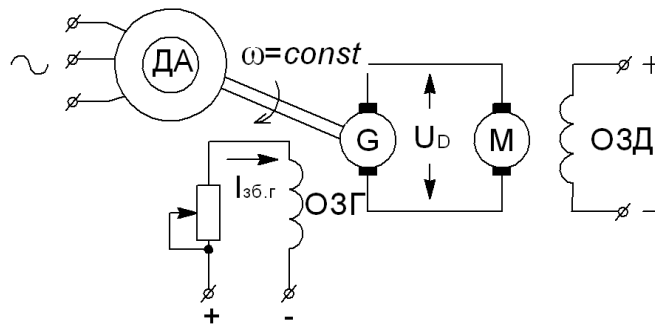


Рис. 2.9

Керування напругою U_D на якорі двигуна сталого струму відбувається за рахунок змінення потоку збудження $\Phi(i_{зб.Г})$ генератора G . При цьому напруга на виході генератора регулюється в діапазоні $U_D = C\omega\Phi(i_{зб.Г}) = 0 \dots U_{max}$.

Недоліки системи "Генератор-Двигун":

- низький ККД системи, який дорівнює: $\eta_{\Sigma} = \eta_{AD} \eta_G \eta_M$;
- значна інерційність регулювання.

Тому, для регулювання напруги U_D на якорі двигунів сталого струму, широко використовують керовані тиристорні випрямлячі, роботу яких розглянемо в подальшому.

2.3. Графоаналітичний метод розрахунку пускових резисторів двигуна сталого струму

У режимі короткого замикання при нерухомому роторі ($\omega=0$) пусковий струм $I_{кз} = \frac{U_H}{R_{як}}$ може сягати $I_{пуск.} \approx (10 \dots 50) I_H$. Для обмеження струму короткого замикання до допустимого значення $I_{доп.пуск.} \leq (2 \dots 2,5) I_H$ збільшують нахил характеристик $\omega(M)$ шляхом включення до кола якоря додаткових опорів R_D (рис. 2.10).

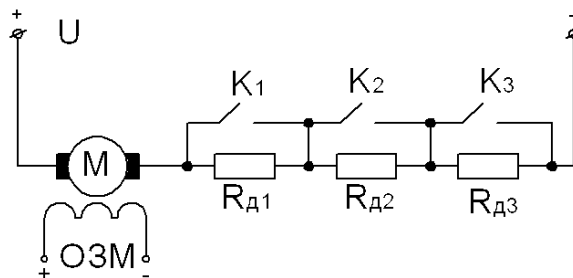


Рис. 2.10

Із залежностей $\omega(M)$ (рис. 2.11) видно, що при фіксованих значеннях U, Φ нахил характеристик є пропорційним опору $R_{як}$.

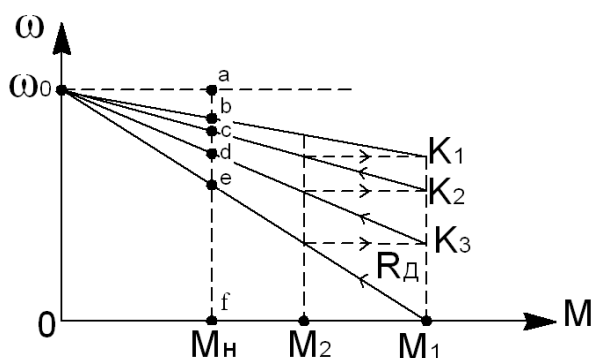


Рис. 2.11

Процес пуску полягає в тому, що двигун починає розгін з точки $(M_1; 0)$ по штучній характеристиці з $(R_{д1}+R_{д2}+R_{д3})$. Під час досягнення моменту переключення M_2 замикається вимикач K_3 і шунтує опір $R_{д3}$ – двигун переходить на вищу штучну характеристику з $(R_{д1}+R_{д2})$ і продовжує розгін. Після шунтування всіх додаткових опорів R_d у колі якоря, двигун переходить на природну характеристику і починає працювати в усталеному режимі.

При проектуванні електроприводу постає задача, по відомій штучній характеристиці (рис. 2.11) визначити R_d , який забезпечить таку характеристику.

Рівняння штучної характеристики:

$$\omega_{ш} = \frac{U}{C_M \Phi} - \frac{I_H (R_{я} + R_d)}{C_M \Phi} \cdot \frac{U_H}{U_H} = \omega_0 - \frac{(R_{я} + R_d)}{R_H} \cdot \omega_0 = \omega_0 \left[1 - \frac{(R_{я} + R_d)}{R_H} \right],$$

де R_H – номінальний опір двигуна сталого струму, який при нерухомому роторі і номінальній напрузі U_H обмежить струм якоря $I_я$ до номінального значення I_H .

З рівняння штучної характеристики впливає пропорція:

$$\frac{(R_{я} + R_d)}{R_H} = \frac{\omega_0 - \omega_{ш}}{\omega_0} = \frac{\Delta\omega}{\omega_0}.$$

З рис. 2.11 видно, що відносний перепад швидкості $\Delta\omega/\omega$ дорівнює відносному опору кола якоря:

$$\frac{\omega_0 - \omega_{ш}}{\omega_0} = \frac{af - fe}{af} = \frac{ae}{af} = \frac{(R_{я} + R_d)}{R_H}.$$

Вимірюючи довжини відрізків по вертикалі M_H на рис. 2.11, можна визначити R_d , які забезпечать відповідні штучні характеристики.

2.4. Способи гальмування двигунів сталого струму

Від швидкості і точності зупинки електричного приводу залежить продуктивність механізму і якість виробництва. Всі режими гальмування є генераторними.

Розглянемо особливості трьох способів гальмування.

2.4.1. Динамічне гальмування

Якір двигуна відмикають від мережі ($U = 0$) і замикають на опір динамічного гальмування $R_{ДГ}$ (рис. 2.12), який вводять для обмеження струму якоря $I_{Я}$ і нагріву; при цьому, обмотку збудження залишають підключеною до джерела живлення (на рис. 2.12 коло обмотки збудження не показано).

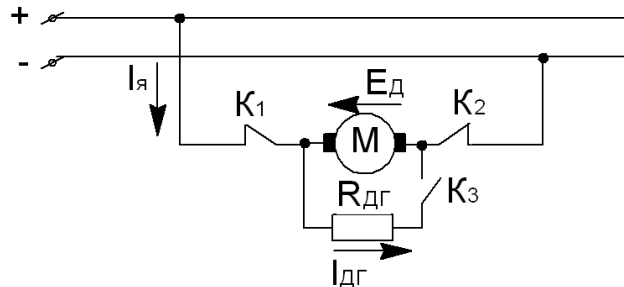


Рис. 2.12

За рахунок інерції обертових мас в машині сталого струму генерується ЕРС, яка витрачається на нагрів елементів якірного кола з опором $R_{Я} + R_{ДГ}$.

Для гальмівного кола за II законом Кірхгофа:

$$0 = E + I_{Я}(R_{Я} + R_{ДГ});$$

Опір динамічного гальмування $R_{ДГ}$ підбирають таким, аби струм якоря $I_{Я}$ не перевищив допустимого значення:

$$- I_{Я} = \frac{E}{R_{Я} + R_{ДГ}} \leq (2 \div 2,5) I_{Н};$$

Відповідні рівняння гальмівних електромеханічної та механічної характеристик:

$$\begin{aligned} \omega &= 0 - \frac{I_{Я}(R_{Я} + R_{ДГ})}{C_{М} \cdot \Phi}; \\ \omega &= - \frac{M \cdot (R_{Я} + R_{ДГ})}{(C_{М} \cdot \Phi)^2}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Графіки динамічного гальмування за відсутності та наявності $R_{ДГ}$ зображено на рис. 2.13.

Механічна та електромеханічна характеристики проходять через початок координат. Жорсткість характеристик зменшується при підвищенні опору $R_{ДГ}$ (ділянка «b-0» на рис. 2.13). Опір резистора $R_{ДГ}$ визначають за допустимим стрибком струму $I_{Я} = I_{ДГ} \leq (2 \div 2,5) I_{Н}$ у момент перемикання, коли $\omega \approx \omega_{Н}$, $E \approx U_{Н}$

$$R_{ДГ} = \frac{U_{Н}}{(2 \dots 2,5) I_{Н}} - R_{Я}. \quad (2.4)$$

Спосіб динамічного гальмування є найпростішим, застосовується при аварійному гальмуванні, проте, – не є економним, оскільки в $R_{ДГ}$ втрачається енергія.

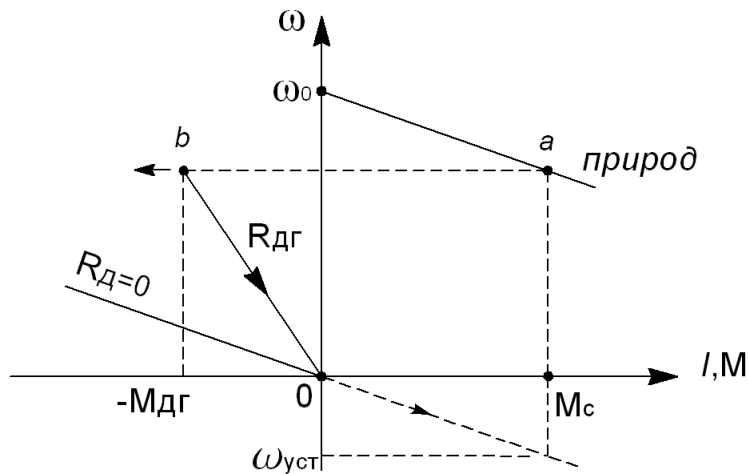


Рис. 2.13

2.4.2. Гальмування противмиканням

Електричну схему гальмування противмиканням електропривода з двигуном сталого струму незалежного збудження зображено на рис. 2.14.

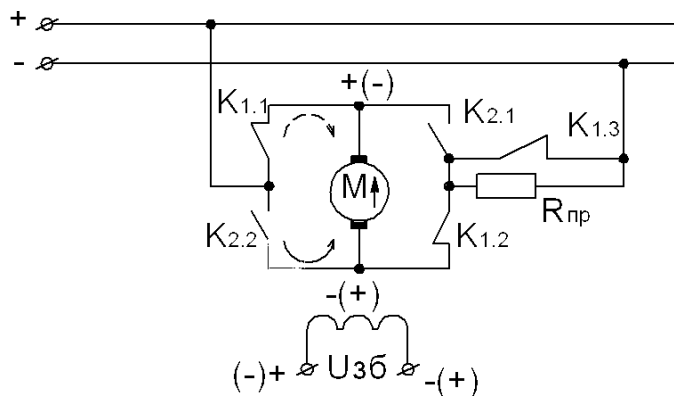


Рис. 2.14

В нормальному режимі двигуна замкнені контакти $K_{1.1}$; $K_{1.2}$; $K_{1.3}$.

Для якірного кола за II законом Кірхгофа:

$$U_H = E + IR_{я} .$$

Для гальмування противмиканням змінюють полярність напруги ($+U_{я} \rightarrow -U_H$) шляхом розмикання контактів $K_{1.1}$; $K_{1.2}$; $K_{1.3}$ і замикання контактів $K_{2.1}$; $K_{2.2}$; при цьому змінюється напрямок струму I в якірній обмотці та електромагнітний момент ($M = C_M I \Phi$), який буде розвертати якір двигуна в протилежний бік (режим генератора):

$$- U_H = E + IR_{я} .$$

Оскільки при гальмуванні противмиканням ЕРС $E \approx U_H$ і збігається за напрямком з U_H , то двигун підключений послідовно з мережею, отже, противострум:

$$I = - \frac{(U_H + E)}{R_{ЯК}} \approx - \frac{2U_H}{R_{Я} + R_{ПР}} \leq (2 \dots 2,5) I_H,$$

де $R_{ПР}$ – опір додаткових резисторів, включених у коло якоря для обмеження противоструму:

$$R_{ПР} = \frac{2U_H}{(2 \dots 2,5) I_H} - R_{Я}. \quad (2.5)$$

Графіки гальмування противмиканням за відсутності та наявності $R_{ПР}$ зображено на рис. 2.15.

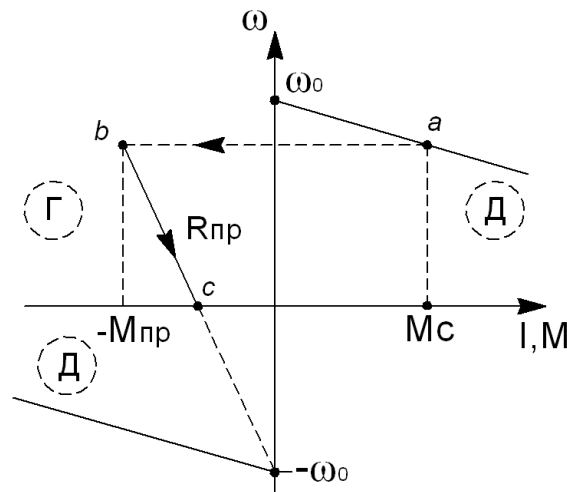


Рис. 2.15

При зміні полярності напруги ($+U_{Я} \rightarrow -U_H$) двигун переходить з точки «a» до точки «b» при $\omega \approx const$, що обумовлено механічною інерцією електроприводу. Під впливом гальмівного моменту $-M_{Г}$ швидкість спадає з точки «b» до точки «c» ($\omega \rightarrow 0$). Рівняння гальмівної електромеханічної характеристики «b-c»:

$$\omega = - \frac{U}{C_M \cdot \Phi} - \frac{I(R_{Я} + R_{ПР})}{C_M \cdot \Phi}. \quad (2.6)$$

У точці «c» двигун має бути відімкнений від мережі, бо інакше швидкість ω почне зростати в протилежному напрямі (режим реверсу показаний на рис. 2.15 пунктиром). Разом із швидкістю змінить напрям й ЕРС на протилежний до напруги U_H .

Гальмування противмиканням застосовують для реверсивних електричних приводів, де гальмування і пуск в протилежному напрямку складають єдиний процес.

Для нереверсивних електроприводів частіше застосовують динамічне гальмування, оскільки воно простіше.

2.4.3. Гальмування з рекуперацією енергії в мережу

Гальмування з рекуперацією енергії в мережу відбувається, коли під дією зовнішнього моменту M_2 (рис. 2.16) швидкість обертання ротора перевищить швидкість н.х. $\omega > \omega_0$ (рис. 2.17) і $E_{РС} > U_{МЕР}$ – двигун працює у 2-му квадранті в режимі генератора паралельно з мережею.

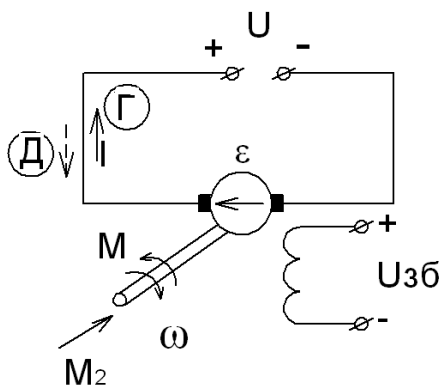


Рис. 2.16

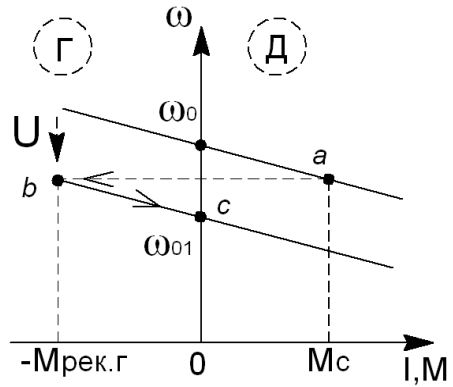


Рис. 2.17

Струм і момент двигуна змінюють напрям на протилежний:

$$I = \frac{(U - E)}{R_{\text{я}}} = - \frac{(E - U)}{R_{\text{я}}}$$

Рівняння гальмівної електромеханічної характеристики:

$$\omega = \frac{U}{C_M \cdot \Phi} + \frac{IR_{\text{я}}}{C_M \cdot \Phi}, \quad (2.7)$$

тому електромеханічна і механічна характеристики в режимі гальмування є продовженням характеристик двигуна у 2-й квадрант.

Для зменшення швидкості ω при рекуперативному гальмуванні знижують $U_{\text{МЕР}}$ і двигун переходить з природної характеристики на штучну з меншою ω_{01} (з точки «a» у точку «b» на рис. 2.17). Ділянка «b-c» відповідає гальмуванню з рекуперацією енергії в мережу.

Гальмування з рекуперацією енергії є найекономічнішим способом, бо кінетична енергія W_K обертальних мас перетворюється в електричну енергію, яка передається до мережі. Тому застосовують рекуперативне гальмування в електроприводах транспортних і підйомних механізмів (наприклад, при опусканні вантажу).

2.5. Автоматичне керування двигунів сталого струму незалежного збудження при пуску, гальмуванні та реверсі

У функції яких величин можна реалізувати автоматичне керування пуском чи гальмуванням двигуна? Наприклад, з діаграми пуску (рис. 2.11) видно, що шунтування опорів $R_{\text{дi}}$ має відбуватися при певних ω_i , I_2 , t_i . Отже і керування пуском має здійснюватися в функції ω , I , t , або кута повороту якоря φ . Ступінчасте керування в розімкнених схемах реалізують за допомогою релейно-контакторних апаратів.

Для контролю t , ω , I , φ потрібні відповідні давачі (рис. 1.1):

для t – реле часу (механічні, електромагнітні, електронні, електромеханічні);

для ω – тахогенератори (в розімкнених схемах – сам двигун сталого струму у якого $E_{\text{РС}} \equiv \omega$);

для I – шунт в колі якоря, або реле струму I_2 ;

для φ – кінцеві та шляхові вимикачі.

Розглянемо на 4-х прикладах ступінчасте керування в розімкнених схемах, що реалізовується за допомогою релейно-контакторних апаратів.

2.5.1. Керування пуском у функції часу

Схема керування пуском в один ступінь у функції часу (рис. 2.18) містить: кнопки *SB1* «пуск» та *SB2* «стоп»; лінійний контактор *KM1*; контактор прискорення *KM2* (для вимикання R_d); електромагнітне реле *KT* (давач часу).

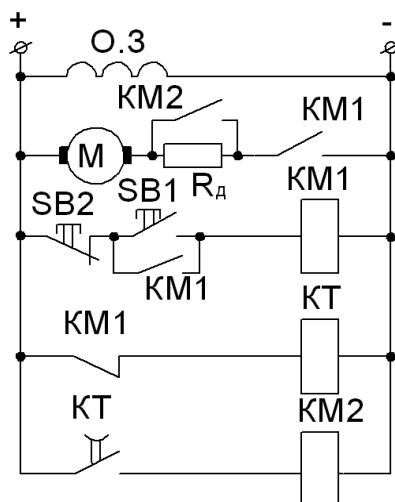


Рис. 2.18

Схема працює наступним чином. При підключенні до мережі відбувається збудження (обмотка *О.3*) двигуна сталого струму. Пуск двигуна здійснюють натисканням кнопки *SB1*. Контактор *KM1* отримує живлення і своїми контактами підключає двигун до джерела напруги – двигун з R_d в колі якоря починає розгін по штучній характеристиці.

Одночасно допоміжні контакти *KM1* шунтують кнопку *SB1* і відмикають реле часу *KT*, яке починає відлік витримки часу Δt роботи двигуна на штучній характеристиці. Через Δt контакт *KT* замикається в колі контактора *KM2* і той зашунтує R_d . Двигун перейде на природну характеристику.

Завдання. Зобразіть пускову діаграму $\omega(M)$.

2.5.2. Керування пуском у функції струму

Схема керування пуском в один ступінь в функції струму (рис. 2.19) працює наступним чином.

В коло якоря включено реле струму *KA*, розмикаючий контакт якого – в колі контактора прискорення *KM2*.

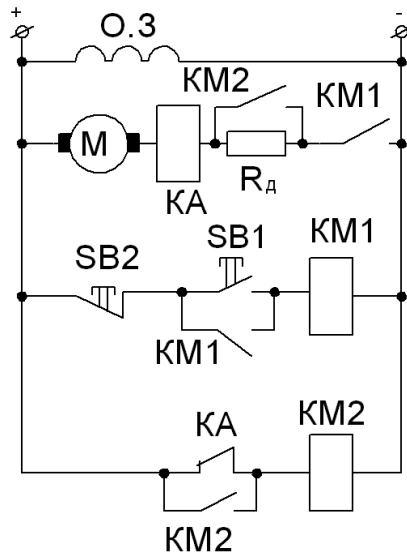


Рис. 2.19

По натисканні кнопки *SB1* спрацьовує контактор *KM1* і підключає двигун до мережі через *R_d*. При цьому кидок струму $I_{\text{я}}$ в колі якоря призведе до спрацювання реле *KA*, яке розімкне свій контакт в колі *KM2*.

При збільшенні ω струм якоря зменшується і при досягненні I_2 реле *KA* замикає контакт в колі *KM2*. Контактор *KM2* зашунтує *R_d* і контакт *KA*, аби другий кидок $I_{\text{я}}$ після шунтування *R_d* не призвів до відключення *KM2*.

Двигун переходить на природну характеристику.

2.5.3. Керування пуском у функції швидкості

Схема керування пуском в функції швидкості (ЕРС) (рис. 2.20) працює наступним чином.

Котушка контактора прискорення *KM1* підключена паралельно до якоря двигуна сталого струму і реагує на ЕРС, яка наводиться в якорі; резистор керування *R_{K1}* дозволяє налагодити спрацювання контактора *KM1* при певній швидкості.

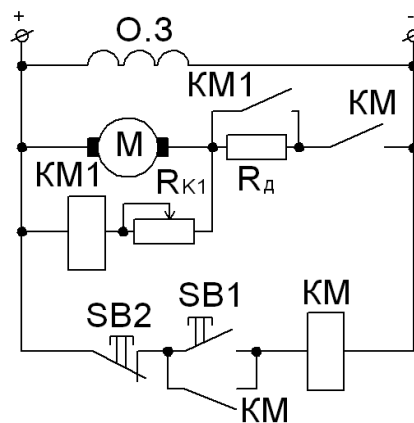


Рис. 2.20

Пуск здійснюють кнопкою *SB1* – спрацьовує лінійний контактор *КМ* і підключає двигун до мережі через R_d . При збільшенні швидкості ω зростає й ЕРС ($E = C_M \omega \Phi$), а отже – і напруга на *КМ1*. При певній ω_2 *КМ1* спрацьовує і шунтує R_d . Двигун переходить на природну характеристику.

2.5.4. Керування динамічним гальмуванням по принципу ЕРС

Схема керування гальмуванням у функції ЕРС (рис. 2.21) працює наступним чином.

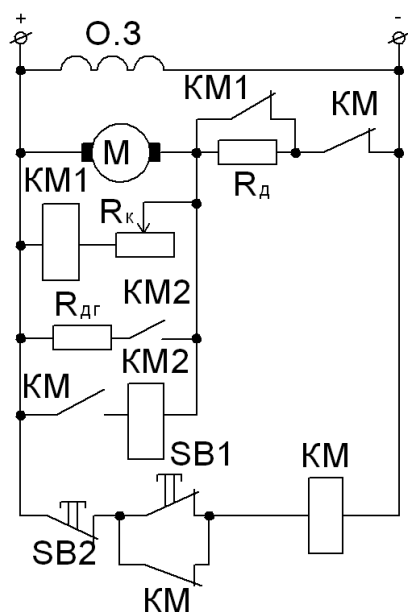


Рис. 2.21

Котушку контактора гальмування *КМ2* підключають паралельно до якоря двигуна. При роботі двигуна контактор *КМ2* відключений контактом *КМ*.

Гальмування здійснюють натисканням кнопки *SB2*. Контактор *КМ*, втративши живлення, відмикає двигун від мережі і замикає коло живлення *КМ2*, який підключає до двигуна резистор динамічного гальмування $R_{дг}$. Гальмування відбувається доти, доки ЕРС не стане меншою за напругу відпускання контактора *КМ2*. Тоді *КМ2* відключається і схема набуває вихідного стану.

2.6. Електромеханічні перехідні процеси у електричних приводах

Від швидкості плинущих перехідних процесів у електричних приводах залежить їх продуктивність та якість виробництва.

Неусталений рух електропривода виникає повсякчас, коли момент двигуна M відрізняється від моменту навантаження M_c , тобто, коли є присутнім динамічний момент $M_{дин} = M - M_c \neq 0$ (пуск, реверс, гальмування).

Розглянемо процеси пуску та гальмування електропривода з двигуном сталого струму незалежного збудження.

2.6.1. Перехідні процеси при пуску двигуна сталого струму

Запуск електропривода можливий лише за умови, що пусковий момент двигуна (M_{Π}) більший за пусковий момент опору робочої машини ($M_{C\Pi}$), оскільки розгін електропривода до сталої швидкості обертання зумовлюється різницею цих моментів:

$$\Delta M = M_{\Pi} - M_{C\Pi}. \quad (2.1)$$

Пускові властивості електродвигуна аналізують за значенням коефіцієнта пуску:

$$k_{\Pi} = M_{\Pi} / M_{НОМ}.$$

Електродвигуни з порівняно незначним коефіцієнтом пуску мають важкі умови пуску; особливо це актуально для синхронних двигунів та асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, для яких $k_{\Pi} = 1,0 \div 1,2$.

Вимоги до **пускових струмів**. Зменшення пускових струмів є одним із головних завдань при проектуванні електроприводів. Для електроприводів на основі двигунів постійного струму, асинхронних двигунів із фазним ротором і для значної частини синхронних двигунів проблема пускових струмів є особливо актуальною, оскільки для них обмеження $I_{\Pi} \leq (1,5 \div 2,5) I_{НОМ}$ є обов'язковим.

Вимоги до **часу пуску**.

По-перше, зменшення часу пуску (t_{Π}) дозволяє збільшити швидкодію та продуктивність електропривода.

По-друге, зменшення t_{Π} можливе лише за умови збільшення різниці ΔM між обертовим моментом двигуна і моментом опору робочого механізму.

Метою розгляду неусталеного руху є визначення вихідних координат електроприводу: $M(t)$, $\omega(t)$, $\varphi(t)$, а також – тривалості перехідного процесу $t_{\text{пн}}$.

Шукані залежності отримуємо з основного рівняння динаміки:

$$M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.2)$$

Приймаємо, що моменти двигуна і робочої машини (РМ) лінійно залежать від швидкості (рис. 2.22).

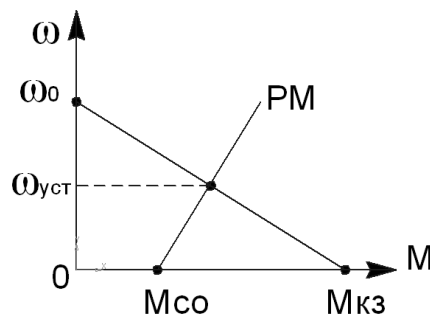


Рис. 2.22

Аналітично ці лінійні характеристики можна описати так:

$$\begin{aligned} M &= M_{\text{кз}} - \beta\omega \\ M_c &= M_{\text{со}} + \beta_c\omega; \end{aligned} \quad (2.9)$$

де $M_{кз}$, $M_{со}$ – моменти двигуна та робочої машини при $\omega = 0$,

Важливим показником характеристик є їхній нахил до осі абсцис, який описують коефіцієнтом жорсткості β :

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}.$$

З рівняння динаміки (2.3) з урахуванням (2.9):

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} + (\beta + \beta_c) \omega = M_{кз} - M_{со}. \quad (2.10)$$

Розділимо складові рівняння (2.10) на $(\beta + \beta_c)$ і отримаємо лінійне неоднорідне диференціальне рівняння першого порядку:

$$T_M \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{уст} \quad (2.11)$$

де $T_M = \frac{J}{\beta + \beta_c}$ – електромеханічна стала часу перехідного процесу;

$\omega_{уст} = \frac{M_{кз} - M_{со}}{\beta + \beta_c}$ – усталена (кінцева) швидкість в точці перетину характеристик (рис. 2.22).

Рішення (2.11) шукаємо як суму загального рішення лінійного однорідного рівняння (вільної складової):

$$T_M \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = 0 \quad (2.12)$$

і частинного рішення неоднорідного рівняння (2.11) (змушеної складової).

Тобто

$$\omega = \omega_{ввл} + \omega_{зм} \quad (2.13)$$

Скористаємося операторним методом, тоді з (2.12):

$$\begin{aligned} T_M p \omega + \omega &= 0, \\ \omega_{ввл} &= A e^{pt}, \end{aligned} \quad (2.14)$$

де p – корінь характеристичного рівняння; з (2.14) приймаючи $\omega = 0$, отримаємо

$$p = -\frac{1}{T_M}.$$

З урахуванням цього, вільна складова:

$$\omega_{ввл} = A e^{-\frac{t}{T_M}}.$$

Змушену складову визначають з (2.11), поклавши $\frac{d\omega}{dt} = 0$:

$$\omega_{зм} = \omega_{уст}.$$

Тоді з (2.13):

$$\omega = \omega_{уст} + A e^{-\frac{t}{T_M}}.$$

Константу A знаходимо з початкових умов: при $t=0$, $\omega = \omega_{поч}$ та $A = \omega_{поч} - \omega_{уст}$.

Зрештою:

$$\omega = \omega_{уст} + (\omega_{поч} - \omega_{уст}) e^{-\frac{t}{T_M}} \quad (2.15)$$

Враховуючи лінійний зв'язок моменту і швидкості, отримаємо аналогічний закон для M :

$$M = M_{уст} + (M_{поч} - M_{уст}) e^{-\frac{t}{T_M}} \quad (2.16)$$

З (2.15) і (2.16) видно, що під час розгону ω і M змінюються за експонентою, тривалість перехідного процесу t_{III} визначимо після логарифмування (2.16):

$$t_{III} = T_M \cdot \ln \left[\frac{M_{поч} - M_{уст}}{M_{кнц} - M_{уст}} \right]. \quad (2.17)$$

Фізичний сенс електромеханічної сталої часу T_M випливає з припущення, що ідеалізована механічна характеристика двигуна є прямокутною (рис. 2.23):

$T_M = \frac{J\omega_0}{M_{кз.1}}$, тобто T_M дорівнює часу розгону двигуна в холосту до швидкості неробочого ходу ω_0 під дією $M_{кз.1}$.

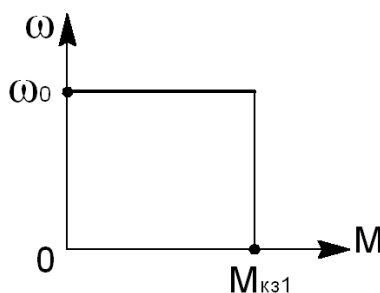


Рис. 2.23

За (2.15) і (2.16) побудуємо криві $\omega(t)$, $M(t)$ (рис. 2.24), видно, що ω і M змінюються за експонентою. Якщо провести дотичну до експоненти $\omega(t)$, або $M(t)$ у точці $t = 0$, то відтинок на рівні $\omega_{уст}$, або $M_{уст}$ дорівнюватиме T_M (рис. 2.24).

З експонент видно, що $t_{III} \rightarrow \infty$. Тому на практиці за t_{III} приймають час, за який координата досягає 95% від $\omega_{уст}$, – наближено час пуску $t_{III} \approx 3T_M$.

При пуску двигуна сталого струму у кілька сходинок (на рис. 2.25 прийнято дві сходинок) початкові значення ω і M на першому етапі перехідного процесу (рис. 2.25.а): $\omega_{поч} = 0$, $M_{поч} = M_1$. Усталені значення $\omega_{уст.в}$, M_c відповідають точці "b" перетину реостатної характеристики двигуна із зведеною механічною характеристикою навантаження $\omega(M_c)$. Кінцеві значення координат на першому етапі (ω_a, M_2) є початковими для другого етапу тощо.

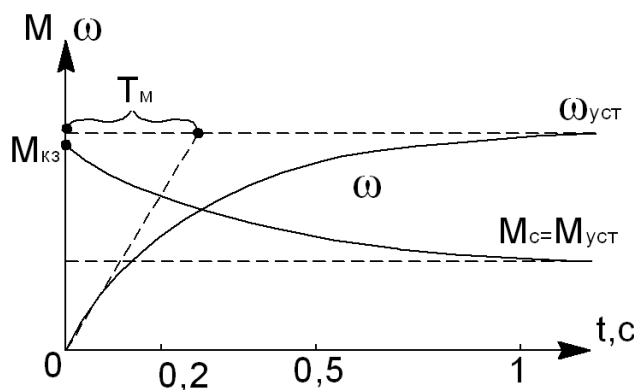


Рис. 2.24

Експоненціальні криві $\omega(t)$, $M(t)$ пуску двигуна у дві сходи показано на рис. 2.25.б. Під час t_1 розгону двигуна по штучній характеристиці його момент зменшується від M_1 до M_2 , прискорення прямує до 0 (що призводить до підвищення $t_{III.1}$).

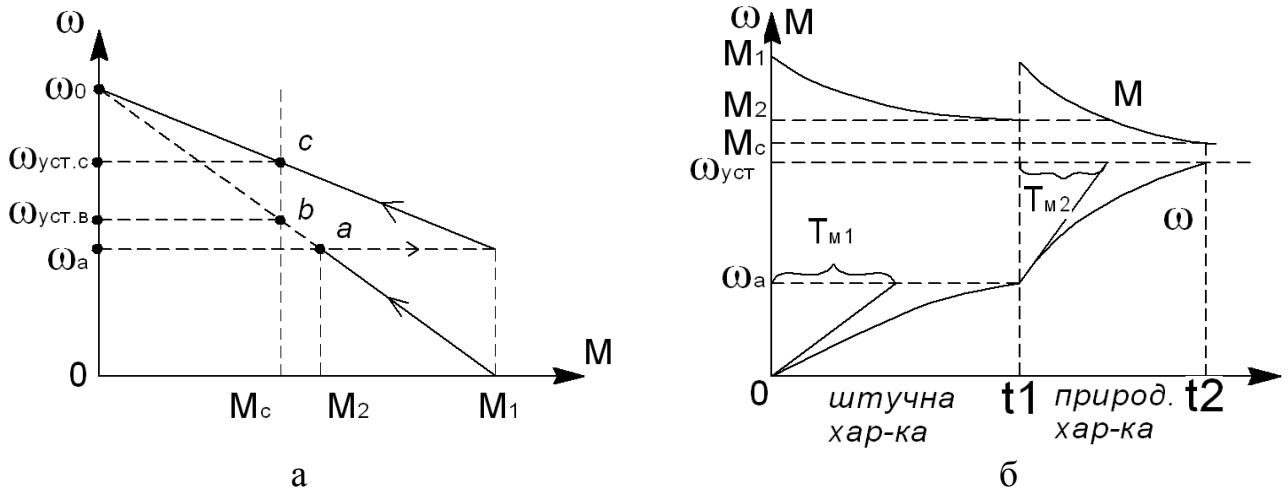


Рис. 2.25

Після виведення R_d момент двигуна швидко стрибком (оскільки електромагнітною інерцією нехтуємо) зростає від M_2 до M_1 , а $\omega(t)$ заломлюється (рис. 2.25.б) – двигун переходить на нову (природну) характеристику, по якій продовжить розганятися протягом t_2 до $\omega_{уст}$.

На I етапі електромеханічна стала з рис. 2.22.а:

$$T_{M1} = J \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta M} = J \cdot \frac{\omega_0}{M_1}.$$

На II етапі:

$$T_{M2} = J \cdot \frac{\omega_0 - \omega_a}{M_1} < T_{M1}.$$

Електромеханічні сталі T_{M1} , T_{M2} можна також визначити графічно з рис. 2.22.б, провівши дотичні до $\omega(t)$.

Повний час пуску дорівнює: $t_{III} = \sum t_i = t_1 + t_2$.

2.6.2. Перехідні процеси при динамічному гальмуванні

При динамічному гальмуванні двигун відімкнено від мережі (рис. 2.12), отже він переходить з точки "а" на природній характеристиці (рис. 2.26) у точку "b" на штучній характеристиці динамічного гальмування; двигун зупиниться в точці "0".

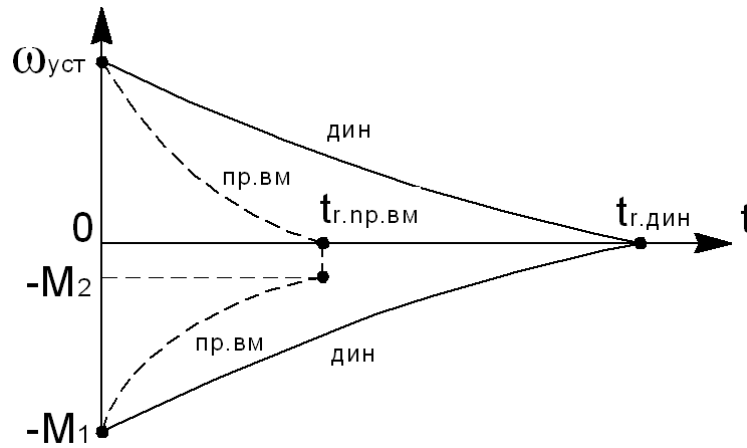


Рис. 2.27

2.6.3. Перехідні процеси при гальмуванні противмиканням

При гальмуванні противмиканням (рис. 2.26) двигун переходить з точки "a" на природній характеристиці до точки "b" на штучній характеристиці гальмування противмиканням; двигун зупиниться в точці "d" з координатами ($\omega=0, -M_2$) після відімкнення від мережі. Якщо ж у точці "d" двигун не вимкнути, то після зупинки він почне розганятися у протилежному напрямі під дією моменту $-M_2$ (див. 3-й квадрант рис. 2.26); $M=0$ при $\omega = -\omega_0$.

Точка "b" відповідає початковим значенням:

$$\begin{aligned}\omega_{поч} &= \omega_{уст.1}; \\ M_{поч} &= -M_1.\end{aligned}$$

Кінцеві значення (точка "e"):

$$\begin{aligned}\omega_{кин} &= -\omega_{уст.3}; \\ M_{кин} &= M_{с.г}.\end{aligned}$$

Механічна стала характеристики гальмування противмиканням "b-d":

$$T_M = J \cdot \frac{\omega_0}{M_2}.$$

Перехідний процес гальмування противмиканням описують рівняннями:

$$\omega = -\omega_{уст3} + (\omega_{уст1} - \omega_{уст3}) e^{-\frac{t}{T_M}}; \quad (2.20)$$

$$M = M_{сг} + (-M_1 - M_{сг}) e^{-\frac{t}{T_M}}. \quad (2.21)$$

Відповідні криві $\omega(t)$, $M(t)$ гальмування противмиканням зображено на рис. 2.27 пунктиром. Видно, що гальмування противмиканням відбувається значно швидше, ніж динамічне: $t_{г.пр} \ll t_{г.дин}$.

2.6.4. Зниження втрат електроенергії в перехідних режимах

Втрати енергії ΔW в перехідних режимах за умови постійного статичного моменту на валу $M_H = const$ можна з достатньою точністю визначити так:

$$\Delta W = \left[1 + \frac{R_1}{R_2} \right] \left[(M_H + J\varepsilon)(\Delta\omega_C + \varepsilon T_M) t_C + (4M_H \Delta\omega_C - J\varepsilon^2 Y T_M) T_M \right], \quad (2.22)$$

де J – момент інерції електроприводу; ε – задане значення кутового прискорення, що визначають за відношенням кінцевої заданої при програмуванні кутової швидкості ω_K електроприводу до часу розгону t_C (гальмування t_G), $\varepsilon = \frac{\omega_k}{t_C} = \frac{\omega_k}{t_G}$. При розгоні $\varepsilon > 0$, при гальмуванні $\varepsilon < 0$; $\Delta\omega_C$ – статичне падіння швидкості, рівне відношенню статичного номінального моменту M_H до жорсткості механічної характеристики β : $\Delta\omega_C = \frac{M_H}{\beta}$.

Втрати енергії ΔW є зворотно-пропорційними жорсткості механічної характеристики β , пропорційні часові розгону t_C (гальмування t_G) і електромеханічній сталій T_M . Тому, при виборі електродвигуна необхідно брати до уваги наступні обставини:

- бажано застосовувати АД з більш високою синхронною швидкістю;
- збільшення передаточного відношення редуктора зменшує момент інерції J на валу АД, що дозволить за тих же втрат підвищити динаміку приводу загалом;
- використання АД з більш високою синхронною швидкістю підвищує енергетичні можливості: ККД та $\cos\varphi$.

За відповідного вибору вказаних вище параметрів можна досягти зниження втрат електроенергії ΔW у 3...10 разів, залежно від частоти пуско-гальмівних режимів і рівня навантаження.

III. ЕЛЕКТРОПРИВОД НА ОСНОВІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

3.1. Механічні характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором

Електричну схему електропривода з асинхронним двигуном з фазним ротором зображено на рис. 3.1.

Потужність статора:

$$P_1 = M \cdot \omega_1,$$

де ω_1 – кутова швидкість поля статора, рад/с: $\omega_1 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}$, (f_1 – частота мережі, p – кількість пар полюсів статора).

Потужність ротора:

$$P_2 = M_M \cdot \omega_2,$$

де ω_2 – швидкість ротора, рад/с; оскільки ротор відстає від поля статора $\omega_2 \neq \omega_1$, то це відставання можна охарактеризувати ковзанням S : $S = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}$.

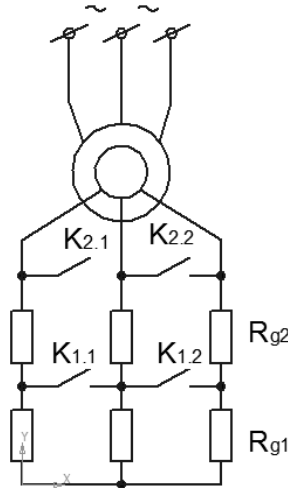


Рис. 3.1

Втрати потужності в роторі в усталеному режимі:

$$\Delta P_2 = P_1 - P_2 = M (\omega_1 - \omega_2) \frac{\omega_1}{\omega_1} = M \omega_1 S = P_1 S. \quad (3.1)$$

Видно, що чим більше S , тим більші втрати потужності в роторі ΔP_2 .

Асинхронний двигун змінного струму можна розглядати як трансформатор, у якому первинною є обмотка статора, а вторинною – ротора. При обертовому роторі його параметри залежить від ω_2 і ковзання S : $x_{2S} = x_2 S$, $E_{2S} = E_2 S$ (де x_2 й E_2 – відповідно індуктивний опір й ЕРС нерухомого ротора), а також струм в обмотці

$$I_2 = \frac{E_2 S}{\sqrt{(R_2)^2 + (X_2 S)^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_2)^2}}.$$

Після зведення параметрів роторного кола до статора, отримуємо еквівалентну схему заміщення фази:

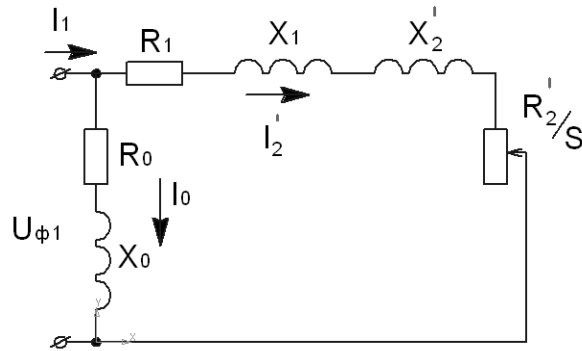


Рис. 3.2

Рівняння механічні характеристики $M(S)$ асинхронного двигуна отримаємо з виразу втрат:

$$\Delta P_2 = 3(I_2')^2 R_2' = MS\omega_1,$$

$$M = \frac{3(I_2')^2 R_2'}{\omega_1 S},$$

З рис. 3.2 струм I_2' :

$$I_2' = \frac{U_{\phi 1}}{\sqrt{R_1 + \frac{R_2'}{S} + (X_1 + X_2')^2}},$$

$$M = \frac{3(U_{\phi 1})^2 R_2'}{\omega_1 S \cdot \left[R_1 + \frac{R_2'}{S} + (X_1 + X_2')^2 \right]} \quad (3.2)$$

Отже, момент двигуна M прямопропорційний $U_{\phi 1}^2$, кількості фаз m ($m=3$); кількості пар полюсів p ; і обернено пропорційний частоті мережі f_1 .

Визначимо максимум кривої $M(S)$, прирівнявши похідну $\frac{dM}{dS} = 0$; відповідно критичне ковзання S_{KP} , за якого двигун має максимальний момент M_{MAX} :

$$S_{KP} = \frac{R_2'}{\sqrt{(R_1)^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (3.3)$$

Отже, критичне ковзання S_{KP} прямопропорційне опорі ротора R_2' .

Підставимо S_{KP} в $M(S)$ і визначимо $M_{KP} = M_{MAX}$:

$$M_{KP} = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_1 \left[R_1 + \sqrt{(R_1)^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]} \quad (3.4)$$

Видно, що M_{KP} не залежить від R_2' .

У паспорті двигуна вказується його перевантажувальна здатність:

$$\frac{M_{KP}}{M_H} = \lambda,$$

де λ – коефіцієнт перевантаження (зазвичай $\lambda = 1,7 \div 3$).

Розділивши M (3.2) на M_{KP} (3.4), отримаємо формулу Клосса:

$$M = \frac{2M_{KP}(1 + \alpha S_{KP})}{\frac{S}{S_{KP}} + \frac{S_{KP}}{S} + 2\alpha S_{KP}}, \quad (3.5)$$

де $\alpha = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_1}{R_2 k^2}$; за достатньо великих коефіцієнтів трансформації k можна прийняти, що α приблизно рівне 0.

Тоді формула Клосса спроститься:

$$M = \frac{2M_{KP}}{\frac{S}{S_{KP}} + \frac{S_{KP}}{S}}. \quad (3.6)$$

3.2. Побудова механічної характеристики асинхронного двигуна

Задаючись поточними значеннями S у межах від 0 до 1, обчислюють відповідні значення моменту M .

Кутову швидкість електродвигуна при ковзанні S визначають за формулою, рад/с:

$$\omega = \omega_0 (1 - S).$$

Побудова природної механічної характеристики асинхронного двигуна за паспортними даними: U_H ; P_H ; n_H ; λ .

1. Координати номінального режиму: $M_H = \frac{P_H}{\omega_H}$, $\omega_H = \frac{2\pi n_H}{60}$, $S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0}$

(зазвичай $S_H = 0,015 \div 0,05$);

2. Координати режиму неробочого ходу: $M_0=0$; $n_0 = \frac{f_1}{p}$.

За частоти мережі $f_1=50$ Гц, отримаємо співвідношення:

P	1	2	3	4	5
n_0 , об/хв.	3000	1500	1000	750	600

3. Критичне ковзання S_{KP} та максимальний момент M_{MAX} :
 $S_{KP} = S_H (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) \geq 0,1 \dots 0,2$; $M_{KP} = \lambda M_H$.

4. Інші точки природної механічної характеристики $M(S)$ асинхронного двигуна отримаємо за формулою Клосса (3.6) і заносимо до таблиці (для робочої ділянки характеристики на інтервалі ковзань $0 < S < S_{KP}$ необхідно обрати не менше 5...7 точок):

S	$S < 0$	0	0,1	S_H	...	S_{KP}	1	$S > 1$
ω	Режим генератора, що працює паралельно із мережею	ω_0	ω_I	ω_H	...	ω_{KP}	0	Режим гальмування протівмиканням
M		0	M_I	M_H	...	M_{KP} P	M Π	

5. Побудова штучних механічних характеристик за різних R'_2+R_d здійснюють аналогічно. Внаслідок того, що критичне ковзання $S_{кр}$ прямопропорційне опорі ротора R'_2 , а $M_{кр}=\text{const}$ і не залежить від R'_2+R_d , то максимуми $M(S)$ при збільшенні R_d лежать на спільній вертикалі й переміщуються у бік більших ковзань S (рис. 3.3 – штучні характеристики показано пунктиром).

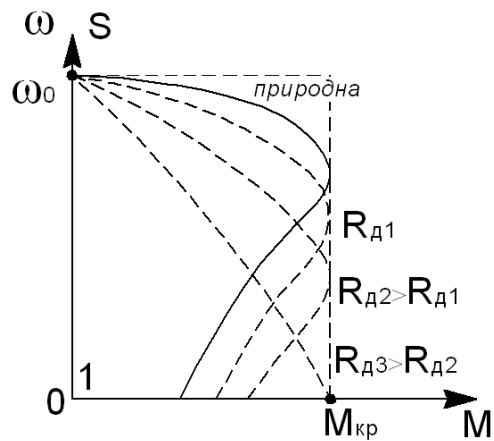


Рис. 3.3

Робочий режим електроприводу вважають у межах характеристики від 0 до $0,85M_{кр}$.

3.3. Способи пуску асинхронних двигунів

1. Прямий пуск двигунів потужністю $P < 20$ кВт. При пуску більш потужних двигунів напругу знижують для зменшення пускового струму.
2. Перемикання обмоток статора із "зірки" на "трикутник" (напруга зменшується в $\sqrt{3}$ разів).
3. Введення додаткових опорів у коло статора (частіше індукційних X_p).
4. Реостатний пуск асинхронних двигунів з фазним ротором (рис. 3.4).

3.3.1. Графоаналітичний метод розрахунку пускових резисторів асинхронного двигуна з фазним ротором

Для розрахунку пускових резисторів $R_{д2}$ асинхронного двигуна з фазним ротором виконують графічну побудову сімейства механічних характеристик, як показано на рис. 3.5.

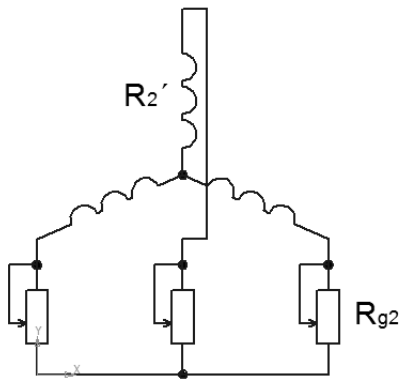


Рис. 3.4

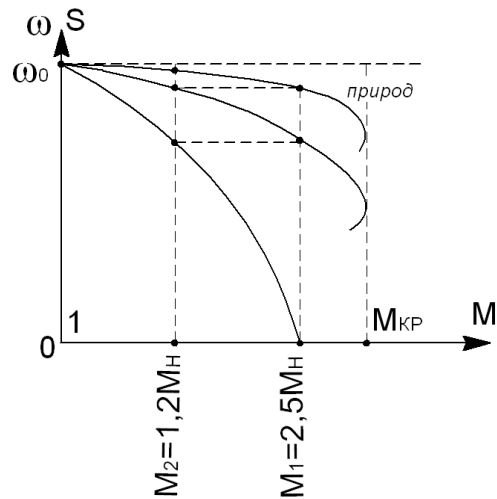


Рис. 3.5

Значення пускового моменту M_1 і моменту перемикання M_2 можливо отримати із умов:

$$M_1 \approx 0.85 M_k; \quad (3.7)$$

$$M_2 \approx (1.1 \div 1.2) M_H. \quad (3.8)$$

Тоді пускові нелінійні механічні характеристики двигуна в межах зміни моменту від M_2 до M_1 замінюють лінійними ділянками. Точність розрахованого процесу визначатиметься розбіжністю між дійсними характеристиками двигунів на інтервалі від M_2 до M_1 та апроксимуючими їх відрізками прямих.

Застосувавши лінеаризацію робочих ділянок механічних характеристик (рис. 3.6), розрахуємо величини додаткових резисторів R_{D2} в колі ротора (рис. 3.4) графоаналітичним методом відтинків.

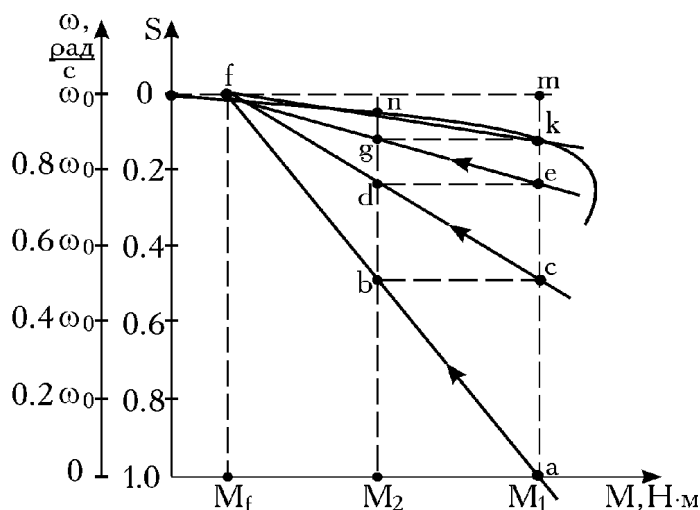


Рис. 3.6. Графічна побудова до розрахунку пускових резисторів

Номінальний опір R_{2H} асинхронного двигуна, який забезпечить протікання в обмотці нерухомого ротора номінального значення струму I_{2H} :

$$R_{2H} = \frac{E_{2K}}{\sqrt{3}I_{2H}}.$$

Через точки k і n на природній механічній характеристиці, які відповідають значенням моментів M_1 і M_2 , проводять пряму до перетину з горизонтальною лінією синхронної швидкості в точці f . З точки f проводять промінь $f-a$. Через точку b перетину променя з вертикальною лінією, яка відповідає моменту M_2 , паралельно осі абсцис проводиться лінія $b-c$. Потім проводять промінь $f-c$ і побудова триває аналогічними діями доти, доки не відбудеться вихід на природну механічну характеристику в точці k . Кількість отриманих пускових ступенів буде різною в залежності від значень M_1 та M_2 .

Якщо вихід на природну механічну характеристику відбудеться поза точкою k , то необхідно дещо змінити значення M_1 чи M_2 і повторити побудову.

Опір ступенів пускових резисторів і повний опір в колі ротора визначають за методом відтінків (довжини відтінків ac , ce , ek , km для моменту M_1 вимірюють на рис. 3.6), Ом:

$$R_1 = \frac{ac}{km} R_2'; \quad (3.9)$$

$$R_2 = \frac{ce}{km} R_2'; \quad (3.10)$$

$$R_3 = \frac{ek}{km} R_2'; \quad (3.11)$$

$$R_{рез} = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{ka}{km} R_2', \quad (3.12)$$

Значення опору фази обертової роторної обмотки R_2' потрібне для побудови реостатних характеристик:

$$R_2^{\square} = \frac{S_H E_{2K}}{\sqrt{3}I_{2H}} = S_H R_{2H},$$

де E_{2K} – ЕРС при нерухомому роторі ($S=1$).

Інша формула для визначення R_D може бути отримана на основі виразу:

$$M = \frac{3(I_2^{\square})^2 R_2^{\square}}{\omega_0 S}.$$

Враховуючи, що за будь-якого фіксованого моменту M і струму I_2' відношення повного опору кола ротора до ковзання є сталим, отримаємо, Ом:

$$\frac{R_2^{\square}}{S_{II}} = \frac{R_2^{\square} + R_D}{S_{III}} = const.$$

Звідси шуканий опір:

$$R_D = R_2^{\square} \left[\frac{S_{III}}{S_{II}} - 1 \right], \quad (3.13)$$

де S_{II} і S_{III} – значення ковзань відповідно для природної та штучної механічних характеристик, S_{II} і S_{III} знаходять з рис. 3.6.

3.4. Види гальмування асинхронних двигунів

3.4.1. Генераторне (рекупераційне) гальмування

Генераторне (рекупераційне) гальмування реалізують за рахунок зовнішніх сил, коли швидкість ротора ω перевищить синхронну швидкість ω_0 – тому механічна характеристика в режимі гальмування є продовженням характеристики у 2-й квадрант (де $\omega > \omega_{01}$ на рис. 3.7).

Для зменшення швидкості $\omega_0 = 2\pi \cdot f_1/p$ при рекупераційному гальмуванні знижують частоту мережі f_1 або збільшують число пар полюсів p і двигун переходить з природної характеристики 1 на штучну 2 з меншою ω_{02} (рис. 3.7).

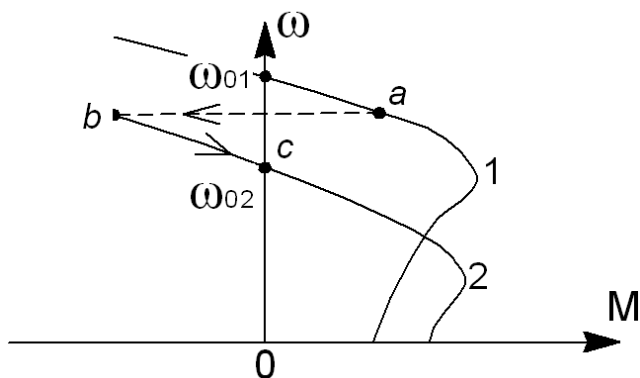


Рис. 3.7

Для двошвидкісних асинхронних двигунів гальмування відбувається з переходом з вищої характеристики 1 на нижчу 2: точки $a \rightarrow b$. Ділянка $b \rightarrow c$ відповідає гальмуванню з рекуперацією енергії в мережу.

Гальмування з рекуперацією енергії в мережу є найекономічнішим способом, бо кінетична енергія W_K обертальних мас перетворюється в електричну енергію, яку передають до мережі. Тому застосовують рекупераційне гальмування в електроприводах транспортних і підйомних механізмів (наприклад, при опусканні вантажу).

Недоліком рекупераційного способу гальмування є неможливість загальмувати двигун до повної зупинки ($\omega=0$).

3.4.2. Гальмування противмиканням

Гальмування *противмиканням* здійснюють зміною чергування будь-яких двох із трьох фаз живлячої статор напруги (наприклад, $U_{ABC} \rightarrow U_{ACB}$). Магнітне поле статора змінює напрям обертання, а ротор продовжує обертатись в попередньому напрямі і перетинає поле статора – виникає гальмівний електромагнітний момент: ділянка $a \rightarrow b \rightarrow c$ на рис. 3.8; ділянка $b-c$ відповідає гальмуванню противмиканням.

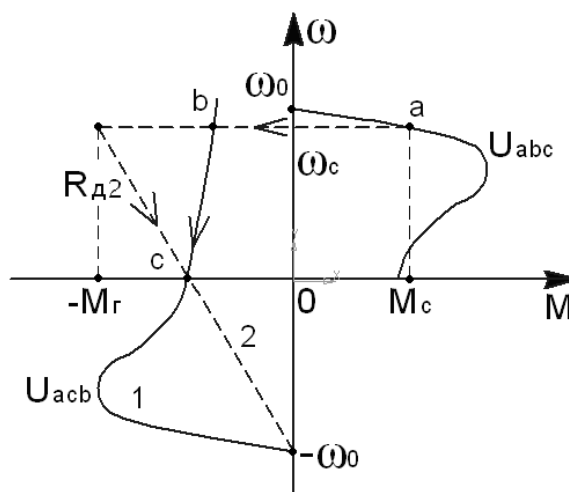


Рис. 3.8

У точці "с" двигун відмикають від мережі, бо інакше він розганятиметься в протилежному напрямі.

Характеристику 1 ($R_{д2}=0$) використовують для малопотужних двигунів ($P < 2,5$ кВт). Для більш потужних двигунів струм гальмування $I_{гал}$ обмежують шляхом вмикання до кола ротора додаткового опору $R_{д2}$. На характеристиці 2 гальмівний момент більший, ніж на 1-й, а отже, гальмування відбувається більш інтенсивно (за менший час t).

Повний опір кола ротора:

$$R_{\Sigma} + R_{д2} = R_{\Sigma} \cdot \frac{S_{шт}}{S_{\Pi}}$$

Звідси опір противмикання $R_{\Pi P} = R_{д2}$:

$$R_{\Pi P} = R_{\Sigma} \cdot \frac{S_{шт}}{S_{\Pi}} - R_{\Sigma} \quad (3.14)$$

де $S_{шт} = S_{ш.поч}$ – ковзання у початковий момент гальмування,

$$S_{ш.п} = \frac{\omega_0 - (-\omega_c)}{\omega_0} = 2 - S_c$$

S_c – ковзання для режиму, який передує гальмуванню ($M_{c'}$ - момент на останній перед зупинкою ділянці заданого графіка статичних навантажень, зведений до валу електродвигуна);

S_{Π} – ковзання, яке визначають за природною механічною характеристикою для $M_1 = 0.85M_k$.

3.4.3. Динамічне гальмування

Динамічне гальмування здійснюється відмиканням статора від мережі і підключенням до джерела сталого струму (рис. 3.9). Гальмування відбувається внаслідок того, що поле статора стає нерухомим, а в ньому за інерцією продовжує обертатися ротор. За законом Ленца, виникаюча в роторі ЕРС утворює магнітне поле, яке при зціпленні з магнітним полем статора дає гальмівний момент.

Штучні характеристики отримуємо зміною R_d в колі ротора. Характеристики проходять через "0" (рис. 3.10), тому що за $\omega = 0$ $M_r = 0$.

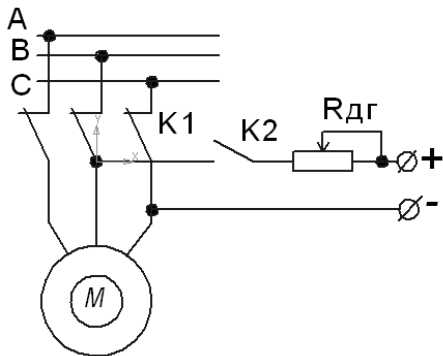


Рис. 3.9

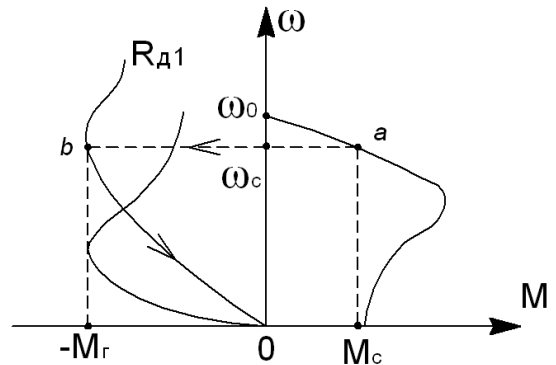


Рис. 3.10

Для динамічного гальмування зазвичай використовують опір пускового резистора, при цьому бажано, аби $R_{як} \approx 0,2 R_{2н}$.

Додатковий опір в роторному колі АД за динамічного гальмування можна визначити за допомогою метода пропорцій з формули, Ом:

$$R_{дг} = R_2 \left[\frac{1 - S_c}{S_n} - 1 \right]. \quad (3.15)$$

Штучна характеристика динамічного гальмування показана на рис. 3.10 прямою $b-0$.

3.5. Розрахунок електромеханічних перехідних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором

Перехідні процеси асинхронного двигуна з фазним ротором можуть бути наближено розраховані за тими ж аналітичними залежностями, які застосовують для розрахунку перехідних процесів двигуна сталого струму, а саме:

$$\omega = \omega_{уст} + (\omega_{поч} - \omega_{уст}) e^{-\frac{t}{T_M}}, \quad (3.16)$$

$$M = M_c + (M_{поч} - M_c) e^{-\frac{t}{T_M}}. \quad (3.17)$$

Для розрахунків використовують графічну побудову, зображену на рис. 3.6, на якій треба додатково нанести вертикальні лінії, відповідні моментам M_c під час пуску та гальмування двигуна.

Стала часу $T_{M.i}$ наближено може бути обчислена за формулою, с:

$$T_{M.i} = \frac{J'}{\beta_i} = J' \frac{\frac{\partial \Delta \omega}{\partial M}}{\frac{\partial \Delta \omega}{\partial M}}$$

де J' - зведений момент інерції електроприводу;

β_i - модуль жорсткості відповідної механічної характеристики АД.

Значення $\omega_{поч.i}$, $\omega_{уст.i}$, M_f можуть бути обчислені за формулами:

$$\omega_{ноч.i} = \omega_0 \frac{R_2' + R_i}{R_2' + R_p}$$

$$\omega_{уст.i} = \omega_0 \frac{M_c - M_f}{M_1 - M_f} \omega_{ноч.i} \frac{M_c - M_f}{M_1 - M_f}, \quad (3.18)$$

де R_i - додатковий опір, який вмикають до кола обмотки ротора:

- для першого пускового ступеня $R_i = R_p$;

- для другого - $R_i = R_p - R_1$;

- для третього - $R_i = R_p - (R_2 + R_1)$ тощо;

R_1 - опір першого ступеня пускового резистора;

M_c - статичний момент на валу двигуна.

Формула (3.18) є справедливою за умови, що $M_f < M_c$.

З рис. 3.6 видно, що трикутники afm і abc є подібними, звідки $\frac{fm}{bc} = \frac{am}{ac}$,

або

$$\frac{M_1 - M_f}{M_1 - M_2} = \frac{1}{S_1}.$$

Позначивши $S_1 = 1 - S_2$, отримуємо M_f :

$$M_f = M_1 - \frac{M_1 - M_2}{1 - S_2},$$

де S_2 - ковзання при $M = M_2$, на першій штучній пусковій характеристиці $a-f$ (рис. 3.6) визначають із співвідношення:

$$\frac{cm}{am} = \frac{S_2}{1} = \frac{R_2' + (R_p - R_1)}{R_2' + R_p}.$$

Вираз для S_2 :

$$S_2 = \frac{R_2' + (R_p - R_1)}{R_2' + R_p}.$$

При гальмуванні противмиканням з розгляду подібних трикутників, утворених гальмівною характеристикою і віссю моментів (рис. 3.11), отримуємо:

$$\omega_{уст} = -\omega_{ноч} \frac{M_c + M_2'}{M_1' - M_2'}, \quad (3.18)$$

де значення всіх величин беруть за модулем;

$\omega_{ноч}$ - визначають з природної механічної характеристики для M_c на валу двигуна в початковий момент гальмування;

M_1' - момент на початку гальмування, $M_1' = 0.85M_{\kappa}$ (рис. 3.11);

$$M_2' - \text{момент в кінці гальмування для } \omega = 0, \quad M_2' = \frac{2M_k}{S_{к.ш} + \frac{1}{S_{к.ш}}},$$

де $S_{к.ш}$ - критичне ковзання при роботі двигуна на штучній гальмівній характеристиці: $S_{к.ш} = S_{к.л} \frac{R_2' + R_i}{R_2'}$.

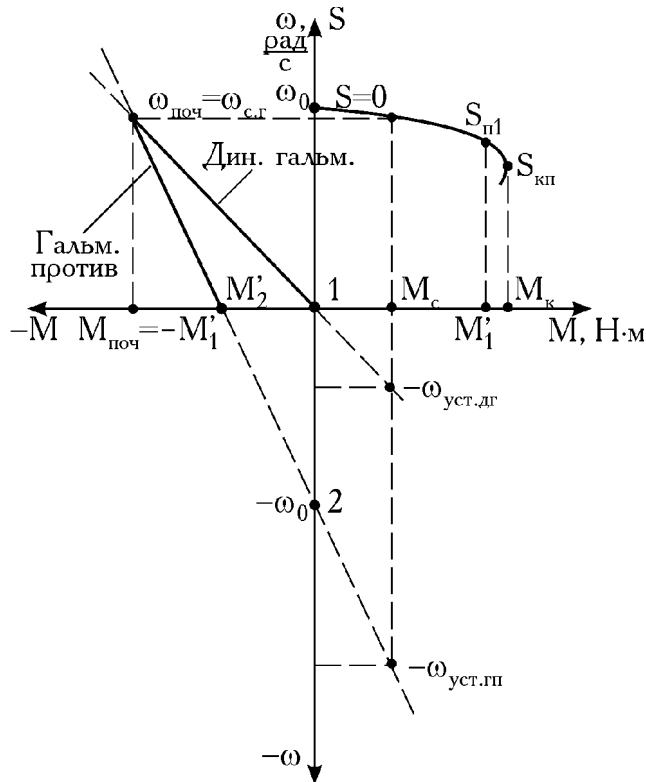


Рис. 3.11. До розрахунку перехідного процесу в гальмівних режимах асинхронного двигуна з фазним ротором

Електромеханічна стала:

$$T_{M.2} = J' \frac{\Delta\omega}{\Delta M} = J' \frac{\omega_{поч}}{|M_1' - M_2'|}.$$

Час гальмування противмиканням:

$$t_2 = T_{M.2} \ln \frac{-M_1' - M_c}{-M_2' - M_c}.$$

За динамічного гальмування:

$$\omega_{уст} = -\omega_{поч} \frac{M_c}{M_1'}; \quad (3.19)$$

$$T_{M2} = J' \frac{\Delta\omega}{\Delta M} = J' \frac{\omega_{поч}}{M_1'};$$

тоді час гальмування, с:

$$t_2 = T_{M.2} \cdot \frac{M_1' + M_c}{M_1'}$$

Далі розрахунок проводять у наступній послідовності.

Час розгону двигуна на кожному ступені пускового резистора $t_1 \dots t_i$ та час гальмування t_2 поділяють на кілька інтервалів (всього до 10 точок). Остання точка кожної ділянки буде при $t_i = t_1, t_2 \dots t_k$.

Далі розраховують значення залежностей у **пусковому** режимі $\omega = f(t)$ і $M = f(t)$.

Розрахунок перехідного процесу у **гальмівних** режимах здійснюють за наступними рівняннями:

$$\omega = -\omega_{уст.2} + (\omega_{поч.2} + \omega_{уст.2}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{M.2}}}, \quad (3.20)$$

$$M = M_{c.m} + (M_{поч.2} + M_{c.m}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{M.2}}}. \quad (3.21)$$

Для асинхронного двигуна з фазним ротором при гальмуванні **протишмиканням** $\omega_{уст.2}$ визначають за допомогою рівняння (3.18). У рівняння (3.20) підставляють абсолютне значення $\omega_{уст.2}$, так як знак вже врахований при отриманні рівняння (3.20).

За **динамічного** гальмування $\omega_{уст.2}$ визначають за допомогою виразу (3.19) і абсолютне значення підставляють у рівняння (3.20).

3.6. Регулювання координат асинхронного двигуна за допомогою додаткових резисторів в колі статора

Регулювання координат асинхронного двигуна за допомогою додаткових резисторів $R_{д1}$ у колі статора переважно застосовують для двигунів з короткозамкненим ротором (рис. 3.12).

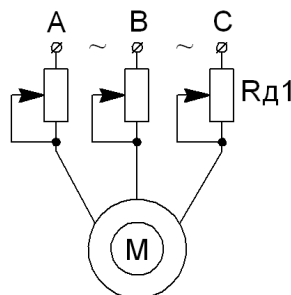


Рис. 3.12

З аналізу механічних характеристик випливає, що:

1. Швидкість ідеального неробочого ходу ω_0 не залежить від опору фази статора R_1 , тому всі штучні характеристики розпочинаються в одній точці з $\omega_0 = 2\pi \cdot f_1/p$.

2. Критичний момент $M_{кр}$ та критичне ковзання $S_{кр}$ зменшуються під час зростання $R_{дл}$, причому $M_{кр}$ зменшуються швидше:

$$M_{кр} = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0 \left[R_1 + \sqrt{(R_1)^2 + (X_1 + X_2)^2} \right]}, \quad S_{кр} = \frac{R_2}{\sqrt{(R_1)^2 + (X_1 + X_2)^2}}.$$

3. Пусковий момент при $S = 1$ також зменшується при зростанні R_1 :

$$M_{п} = \frac{3U_{\phi 1}^2 R_2}{\omega_0 S \left[R_1 + \frac{R_2}{S} + \sqrt{(R_1 + \frac{R_2}{S})^2 + (X_1 + X_2)^2} \right]}.$$

Відповідно механічні характеристики для $R_1 + R_{дл} = var$ мають вигляд:

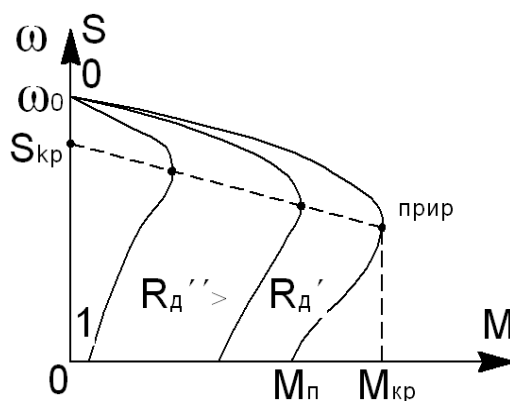


Рис. 3.13

Спосіб регулювання координат асинхронного двигуна за допомогою додаткових резисторів $R_{дл}$ у колі статора забезпечує завузький діапазон регулювання швидкості $D = 1 \div 1,2$.

Зростання $(R_1 + R_{дл})$ знижує перевантажувальну здатність λ .

Тому спосіб застосовують для обмеження струму та моменту асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором під час пуску, реверсу, гальмування. Наприклад, в електроприводах двошвидкісних ліфтів при переході з швидкості ω_{max} на ω_{min} , у коло обмотки статора вводять $R_{дл}$ задля обмеження струму.

Замість $R_{дл}$ можна використати тиристори (рис. 3.14) і здійснювати регулювання швидкості зміною живлячої напруги U за допомогою тиристорного регулятора. Кут α відкриття тиристорів (рис. 3.15) регулює система імпульсного фазного керування (СІФК), яка може змінювати α у межах $\alpha = 0^\circ \div 180^\circ$. Чим більший кут α , тим менша напруга, що живить двигун: наприклад, за $\alpha = 0^\circ$ тиристори повністю відкриті, відповідно живляча напруга є максимальною U_{max} , натомість, за $\alpha = 180^\circ$ тиристори повністю закриті і напруга $U = 0$.

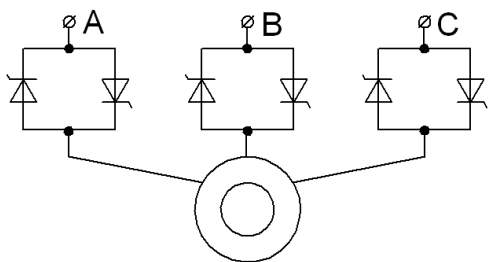


Рис. 3.14

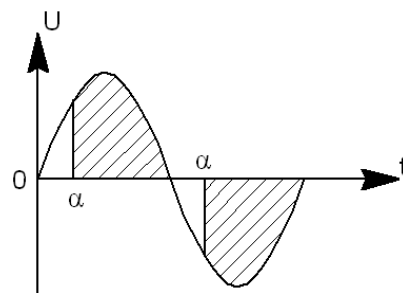


Рис. 3.15

Система регулювання швидкості зміною живлячої напруги U є економічною – втрати в тиристорах не перевищують 10 Вт.

3.7. Регулювання швидкості асинхронного двигуна зміною числа пар полюсів

Внаслідок того, що число пар полюсів є цілим числом $p = 1, 2, 3, \dots$, регулювання швидкості здійснюють ступінчасто. Змінення числа полюсів відбувається шляхом перемикачів в обмотці статора, при цьому p короткозамкненого ротора змінюється автоматично.

Розглянемо 1-й спосіб змінення p : зміною схеми з'єднань статорної обмотки, спеціально розділеної на кілька рівних частин.

Приклад: однієї фази статорної обмотки, розділеної на дві частини, що мають по два провідники (рис. 3.16).

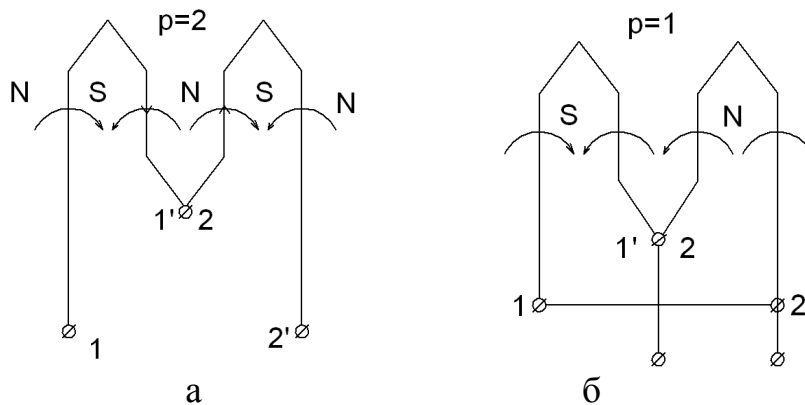


Рис. 3.16

1. Якщо секції з'єднані послідовно, то під час протікання струму від клеми «1» до клеми «2'», згідно закону Біо-Савара-Лапласа, навколо провідників створюється магнітне поле з чотирма полюсами, тобто $p = 2$ (рис. 3.16.а).

2. При паралельному з'єднанні секцій статорна обмотка створює магнітне поле з двома полюсами, тобто $p = 1$, це призводить до збільшення швидкості удвічі (рис. 3.16.б).

На практиці застосовують дві схеми перемикачів статорної обмотки асинхронних двигунів:

а) – з "трикутника" на "подвійну зірку";

б) – із "зірки" на "подвійну зірку".

а) **Трикутник – подвійна зірка** (рис. 3.17).

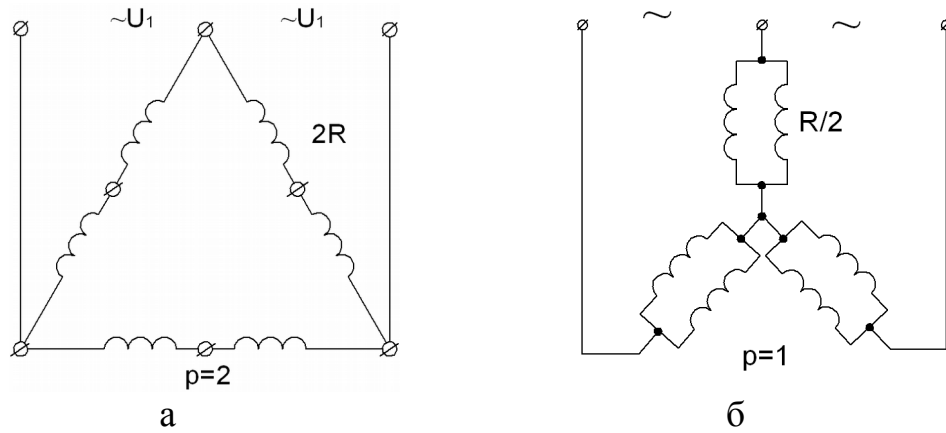


Рис. 3.17

Більша кількість пар полюсів $p=2$ відповідає узгодженому з'єднанню секцій кожної фази статора в трикутник (рис. 3.17.а). Переключення по схемі подвійної зірки (рис. 3.17.б) призведе до зменшення p удвічі і такого ж збільшення швидкості.

При цьому потужність P двигуна залишається практично незмінною, а момент на валу зменшиться приблизно у 2 рази (рис. 3.18).

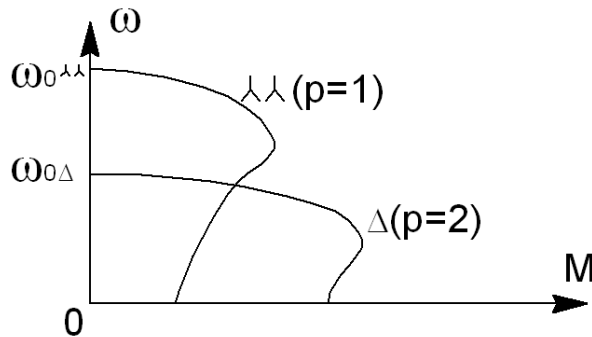


Рис. 3.18

б) **Зірка** (рис. 3.19.а) – **подвійна зірка** (рис. 3.17.б) .

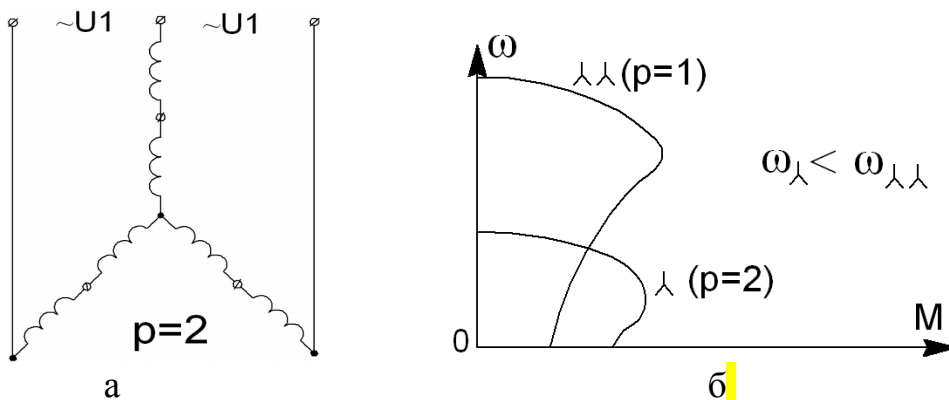


Рис. 3.19

Відповідні механічні характеристики зображено на рис. 3.19.б. Зміна швидкості відбувається при сталому моменті $M_c = const$, оскільки зі збільшенням швидкості ω зростає потужність P .

Регулювання швидкості асинхронного двигуна зміною числа пар полюсів є економічним, оскільки відсутні втрати ΔP в роторному колі.

2-й спосіб регулювання: спорядження двигуна кількома статорними обмотками з різним числом p .

Розглянемо роботу **схеми керування** двошвидкісним асинхронним двигуном (перемиканням статорної обмотки з "трикутника" на "подвійну зірку").

Схема керування забезпечує дві швидкості шляхом з'єднання обмотки статора в "трикутник" або "подвійну зірку". Схема містить контактори великої $KM1$ і малої $KM2$ швидкості, блокувальне реле KV і кнопки керування $SB3, 4, 2, 1$.

Захист електроприводу здійснюють теплові реле $KK1, KK2$ і запобіжники FU .

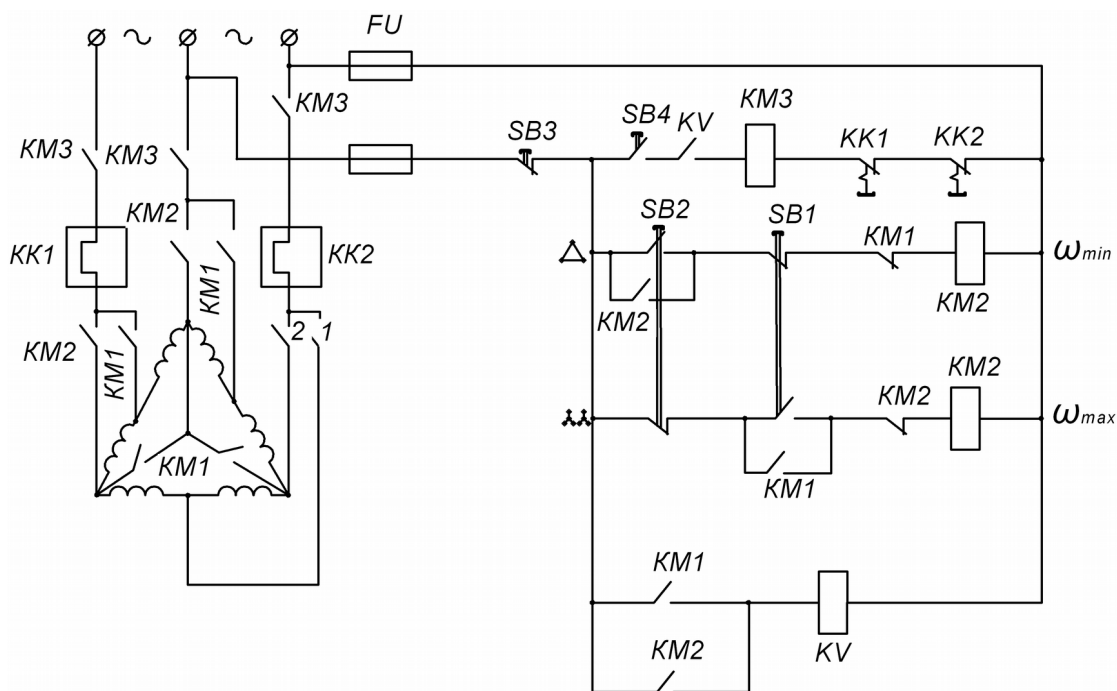


Рис. 3.20

Для пуску двигуна на малу швидкість натискають $SB2$ – спрацьовує контактор $KM2$ й реле KV . Статор включається за схемою "трикутник", а реле KV замикає свій контакт в колі апарату $KM3$ (готуючи двигун до підключення до мережі). Включення $SB4$ призводить до підмикання асинхронного двигуна до мережі змінної напруги ($KM3$ замикає свої контакти).

Після розгону до ω_{min} можна натискати кнопку $SB1$ – відключається контактор $KM2$, а підключається $KM1$; обмотка статора перемикається за схемою "подвійна зірка" і швидкість ω зростає.

Зупинку двигуна здійснюють кнопкою $SB3$.

Застосування двокільних кнопок забезпечує блокування від одночасного спрацювання контакторів $KM1$ і $KM2$. Цій меті слугують і розмикаючі блокувальні контакти $KM1, KM2$ в колі котушок контакторів.

3.8. Імпульсний спосіб регулювання швидкості

Імпульсний спосіб регулювання швидкості полягає у періодичній зміні параметрів живлячої мережі (наприклад, напруги U), або кіл асинхронного двигуна (введення опорів до кола статора чи ротора (рис. 3.21)).

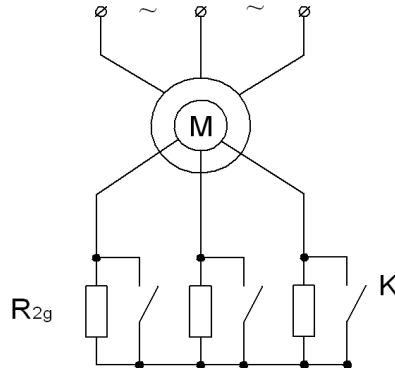


Рис. 3.21

Додатковий $R_{2д}$ в колі ротора можна закорочувати ключем K . Тоді при замкненому K двигун має природну характеристику 1, а при розімкненому – штучну 2 (рис. 3.22).

Якщо K періодично замикає на час t_3 і розмикає на час t_0 , то його роботу характеризують коефіцієнтом *шпаруватості* ε :

$$\varepsilon = \frac{t_3}{t_3 + t_0} = \frac{t_3}{T},$$

де T – період циклу.

Навантаженню M_c і коефіцієнту шпаруватості $\varepsilon=1$ відповідає швидкість ω_1 , а $\varepsilon=0$ – ω_3 . Швидкості ω_1 і ω_3 є граничними, які обмежують діапазон регулювання. Відповідно за $0 < \varepsilon < 1$ швидкість набуває проміжних значень ω_{cp} (рис. 3.22, 3.23).

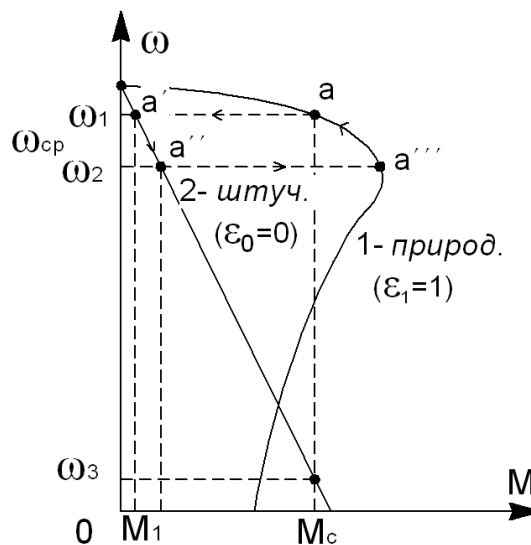


Рис. 3.22

Нехай спочатку двигун працює в точці «а», обертаючись із швидкістю ω_1 . Зменшимо шпаруватість керуючих імпульсів $\varepsilon < \varepsilon_1$, тоді при розмиканні ключа K робоча точка переміститься в положення «а'» на характеристиці 2 практично при сталій внаслідок інерції швидкості ω_1 . Момент асинхронного двигуна $M_1 < M_C$ і швидкість почне спадати доти, доки в точці «а''» з ω_2 ключ K знов не замкнеться. Робоча точка переміститься до точки «а'''», в якій $M_D > M_C$, внаслідок чого швидкість зросте до ω_1 , після чого цикл повторюватиметься.

Графік зміни $\omega(t)$ зображено на рис. 3.23:

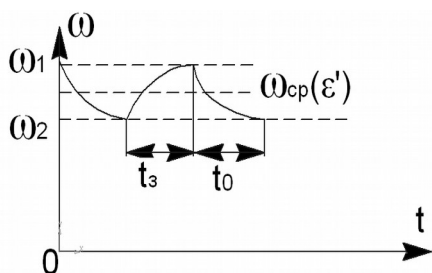


Рис. 3.23

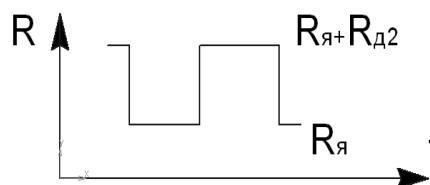


Рис. 3.24

Видно, що швидкість коливається навколо середнього значення ω_{cp} яке залежить від коефіцієнта шпаруватості ε і моменту навантаження M_C . Якщо зменшити t_3 то зменшиться коефіцієнт ε , відповідно зменшиться і середня швидкість ω_{cp} .

Для реалізації імпульсного способу регулювання швидкості застосовують безконтактні ключі K на базі транзисторів (при $I \leq 15 \dots 20A$) або тиристорів (при $20A \leq I \leq 100 \dots 150A$) (рис. 3.25).

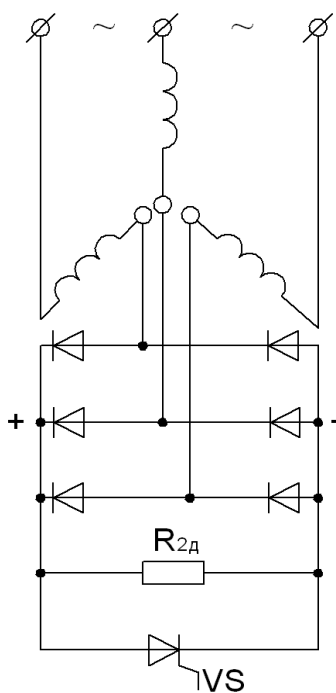


Рис. 3.25

Тиристорний ключ VS комутує додатковий резистор $R_{2д}$, включаючи його у коло спрямованого струму ротора (статора). У разі змінного напрямку струму (за відсутності спрямляла) змінюється полярність падіння напруги на $R_{2д}$ і тиристор VS буде завжди замкнений, незалежно від керуючого сигналу із системи імпульсного фазного керування (СІФК).

Перевагами імпульсного способу регулювання швидкості ω є:

1. простота автоматизації керування;
2. плавність керування.

До недоліків можна зарахувати:

1. швидкість регулюється тільки на зменшення;
2. середня швидкість $\omega_{ср}$ залежить від моменту на валу двигуна M_C ($\omega_{ср}$ зменшиться при зростанні M_C і навпаки).

3.9. Регулювання координат електроприводу в системі "тиристорний перетворювач напруги-двигун"

Перетворювач напруги, наприклад, автотрансформатор або тиристорний перетворювач ($U_{рег} = var$), вмикають між затискачами живлячої мережі і статора (рис. 3.26). Нагадаємо, що $M \equiv U_{\phi}^2$, натомість, $S_{кр}$ та ω_0 не залежать від U_{ϕ} . Тому розімкнуті схеми використовують лише для регулювання M і струму I двигуна.

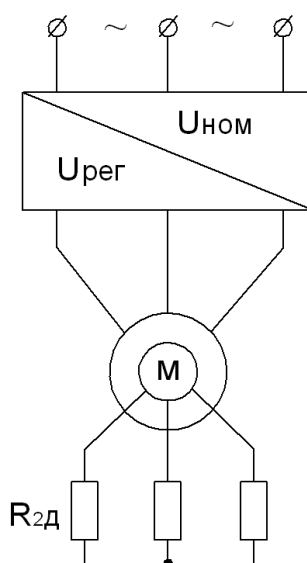


Рис. 3.26

Для керування координатами електричного приводу створюють замкнені системи із зворотними зв'язками (рис. 3.27), які дозволяють отримувати жорсткі механічні характеристики електроприводів.

Зустрічно-паралельне з'єднання тиристорів у кожній фазі перетворювача напруги (рис. 3.27) забезпечує почергову роботу кожного тиристора впродовж напівперіоду. Регулювання напруги на асинхронному двигуні здійснюють зсувом у часі керуючих імпульсів на керуючих електродах тиристорів.

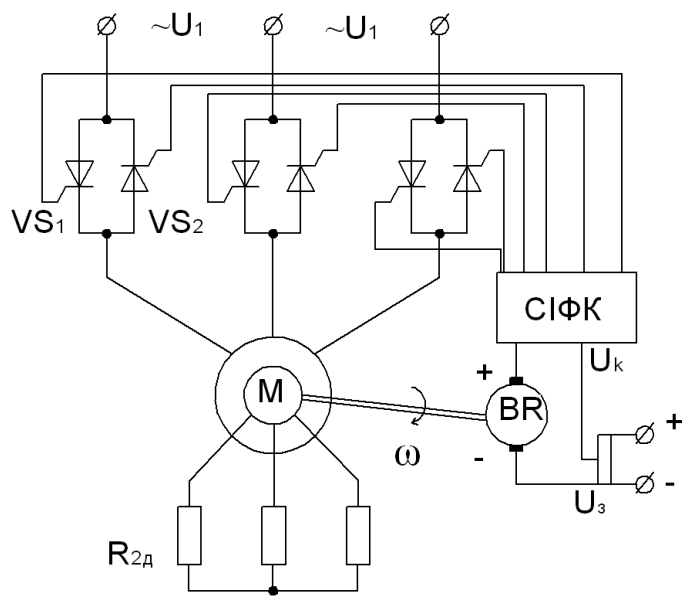


Рис. 3.27

Роботою тиристорного перетворювача керує система імпульсного фазного керування (СІФК), яка може змінювати кут керування α у межах $\alpha = 0^\circ \div 180^\circ$. Чим більший кут α , тим менша напруга, що живить двигун: за $\alpha = 0^\circ$ тиристори повністю відкриті, відповідно напруга є максимальною, натомість, за $\alpha = 180^\circ$ тиристори повністю закриті і напруга дорівнює 0.

Напруга на асинхронному двигуні після тиристорного перетворювача має несинусоїдну форму, тому всі розрахунки проводять по першій гармоніці; проте кожна гармоніка напруги обумовлює проходження струму в обмотках асинхронного двигуна і **втрати** потужності від несинусоїдності складають близько 10 ÷ 20 %.

Сімейство штучних механічних характеристик асинхронного двигуна для різних $U_{\text{рег}}(\alpha) = \text{var}$ зображене на рис. 3.28.

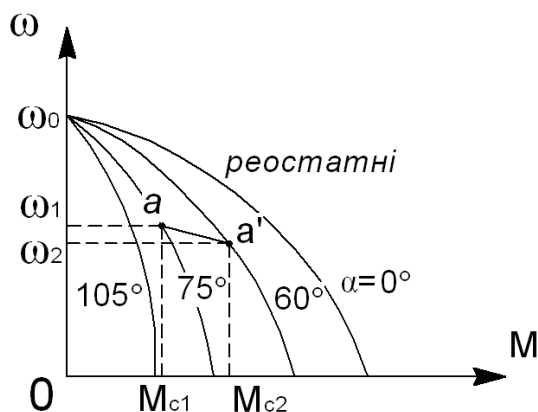


Рис. 3.28

Видно, що при збільшенні кута α зменшується $U_{\text{рег}}$, критичний момент $M_{\text{кр}}(U_{\text{ф}}^2)$ і жорсткість характеристики, тобто коливання $M_{\text{с}}$ призводять до значних

змін швидкості. Наприклад, нехай за навантаження M_{C1} і $\alpha = 75^\circ$ двигун працює у робочій точці «а» (рис. 3.28); якщо M_C збільшиться до $M_{C2} > M_{кр}(75^\circ)$, то двигун буде сповільнюватись, доки не зупиниться ($\omega \rightarrow 0$).

Якщо технологічний процес дозволяє зменшення швидкості до ω_2 , то потрібно зменшити кут α до 60° – тоді момент двигуна M збільшиться і електропривод перейде до точки «а'» з координатами (ω_2, M_{C2}) .

Для автоматичного керування $\alpha(M_C)$ використовують зворотній зв'язок за швидкістю двигуна – до валу приєднується тахогенератор BR (рис. 3.27), ЕРС якого пропорційний швидкості ω : $e_{ТГ} = \gamma\omega$. Напряга керування U_K дорівнює різниці задавальної напруги U_3 і ЕРС тахогенератора: $U_K = U_3 - \gamma\omega$; U_K подають на СІФК, виходи якої підключають до керуючих електродів тиристорів $VS1 \div VS6$.

Автоматичне регулювання механічної характеристики відбувається так: при збільшенні навантаження на валу асинхронного двигуна до M_{C2} швидкість зменшується, відповідно зменшується ЕРС тахогенератора. Це призведе до збільшення U_K , що обумовить, за допомогою СІФК, зменшення кута α до 60° (рис. 3.28).

Змінюючи U_3 отримують ряд жорстких механічних характеристик (рис. 3.29) асинхронного двигуна з великим λ . Це дозволяє підвищити діапазон плавного регулювання швидкості ω до 1:20.

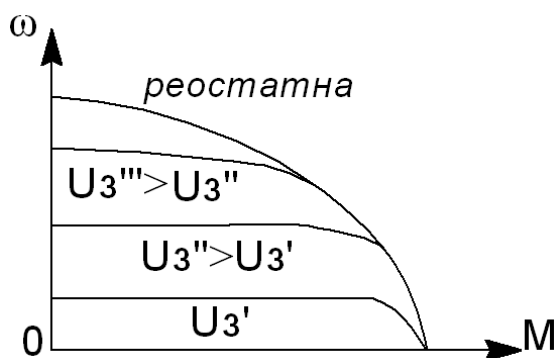


Рис. 3.29

3.10. Регулювання швидкості електричного приводу в системі "Перетворювач частоти-двигун"

Відповідно до формули $\omega_0 = 2\pi \cdot f_1 / p$ видно, що змінюючи частоту f_1 можна плавно регулювати синхронну швидкість ω_0 як вгору, так і доли.

Для зберігання високих λ , $\cos \phi$, η необхідно одночасно зі зміною частоти змінювати напругу U . Закон зміни U_1 визначає залежність моменту навантаження M_C від швидкості.

Нехтуючи опором $R_1 \approx 0$, отримаємо λ з умови $\lambda = M_{кр} / M_C = \text{const}$:

$$\lambda = \frac{3(U_\phi)^2}{2\omega_0 X_p M_C}$$

Враховуючи, що $X_p \equiv f_1$ і $\omega_0 \equiv f_1$, отримаємо

Звідси, для $\lambda = \text{const}$ за двох f , має виконуватись співвідношення:

$$\frac{U_{\phi 1}}{U_{\phi 2}} = \frac{f_{11}}{f_{12}} \cdot \sqrt{\frac{M_{C1}}{M_{C2}}} \quad (3.22)$$

Тобто, одночасно із регулюванням частоти f необхідно відповідним чином змінювати напругу U , поєднавши перетворювач напруги з перетворювачем частоти.

3.11. Закон взаємного регулювання частоти та напруги

1. За $M_C = \text{const}$ згідно (3.22) U на статорі пропорційна частоті f , отже регулювання має здійснюватись за підтримання умови:

$$\frac{U_{\phi 1}}{U_{\phi 2}} = \frac{f_{11}}{f_{12}}, \quad \text{або} \quad \frac{U_{\phi}}{f_1} = \text{const}$$

Відповідні механічні характеристики для $f_{13} > f_{1\text{ном}} > f_{11} > f_{12}$ зображено на рис. 3.30.

За співвідношення $f < f_{\text{ном}}$ сталими є $M_{KP} = \text{const}$ і $\lambda = \text{const}$.

За $f > f_{\text{ном}}$ напруга U не може перевищувати $U_{\text{ном}}$, тому M_{KP} зменшується обернено пропорційно до f (крива для $M_{KP} \equiv 1/f_{13}$ на рис. 3.30).

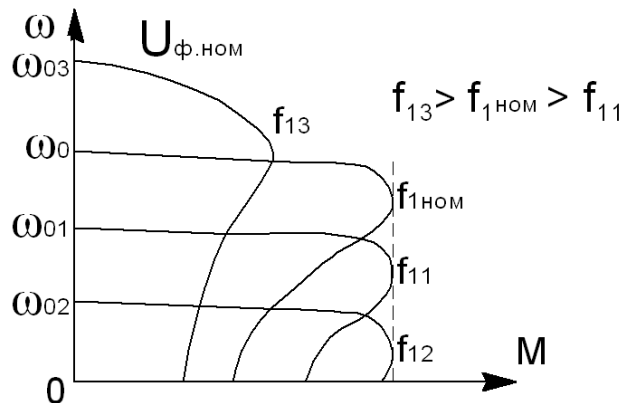


Рис. 3.30

2. У разі M_C обернено пропорційному швидкості (наприклад, токарні, фрезерні верстати), потужність є сталою $P_C = M_C \cdot \omega = \text{const}$, а регулювання має здійснюватись за підтримання умови:

$$\frac{U_{\phi}}{\sqrt{f_1}} = \text{const}.$$

Відповідні механічні характеристики для $f_1 > f_{\text{ном}} > f_2$ зображено на рис. 3.31.

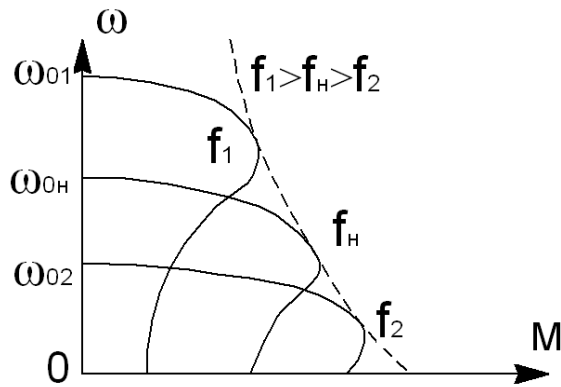


Рис. 3.31

3. Для вентиляторного характеру M_c регулювання має здійснюватись за підтримання умови:

$$\frac{U_\phi}{(f_1)^2} = const$$

Відповідні механічні характеристики для $f_1 > f_{ном} > f_2$ зображено на рис. 3.32.

Вентиляторна характеристика $M_c(\omega)$ сполучає критичні моменти на механічних характеристиках 1, 2, 3 (рис. 3.32).

Жорсткість характеристик 1, 2, 3 за $f = var$ практично незмінна, відповідно і ККД залишається сталим.

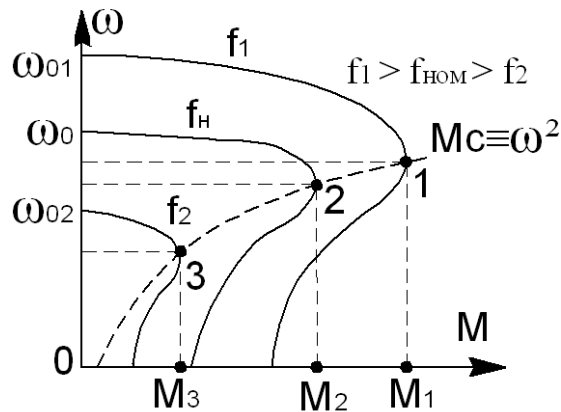


Рис. 3.32

3.12. Машинний динамічний перетворювач частоти

Машинний динамічний (обертовий) перетворювач частоти (рис. 3.33) містить агрегат сталої швидкості (асинхронний двигун і генератор сталого струму) й агрегат змінної швидкості (двигун сталого струму та синхронний генератор).

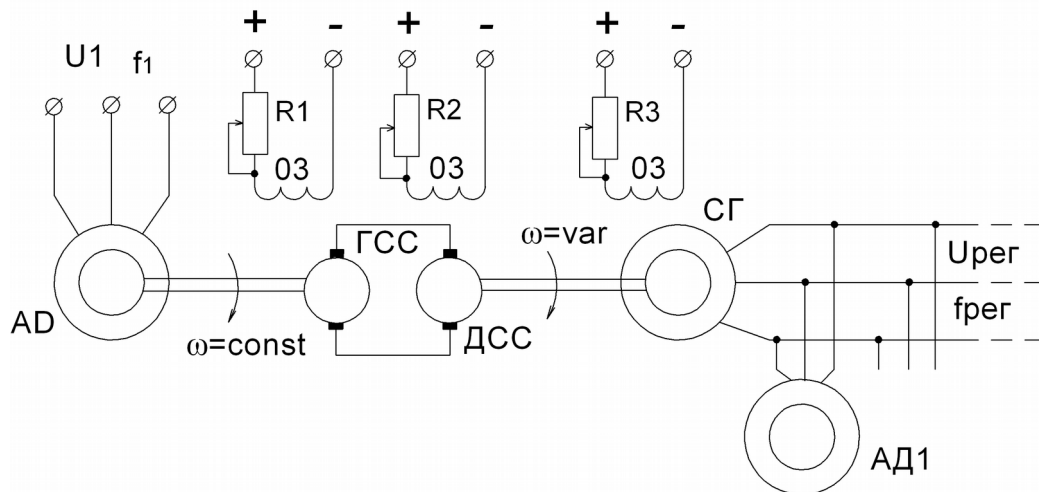


Рис. 3.33

На схемі R_1 – змінює струм збудження генератора сталого струму, а отже, і напругу живлення двигуна сталого струму; R_2 – регулює магнітний потік двигуна сталого струму, а отже, і швидкість двигуна $\omega = \text{var}$. Відповідно змінюємо частоту $f_{\text{РЕГ}}$ на затискачах синхронного генератора; напруга $U_{\text{РЕГ}}$ на затискачах синхронного генератора регулюється R_3 в колі збудження синхронного генератора.

Перевагою машинного перетворювача частоти є плавне регулювання частоти в широких межах.

Недоліком машинної схеми регулювання є необхідність чотирьох електричних машин, що знижує результуючий ККД до $\eta = \eta_{\text{ад}} \cdot \eta_{\text{ГСС}} \cdot \eta_{\text{ДСС}} \cdot \eta_{\text{СГ}} = 60\%$ і підвищує інерційність регулювання.

3.13. Статичні (напівпровідникові) перетворювачі частоти

Статичні (напівпровідникові) перетворювачі частоти (ПЧ) поділяють на дві групи:

- ПЧ з безпосереднім зв'язком живлячої мережі і навантаження;
- ПЧ з проміжною ланкою сталого струму.

1. Напівпровідниковий перетворювач частоти (рис. 3.34) складається із силової частини (СЧ) і схеми керування (СК).

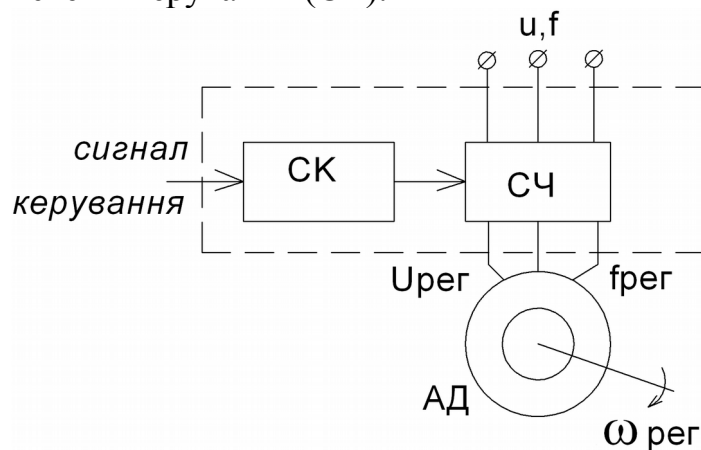


Рис. 3.34

СЧ містить тиристори і здійснює перетворення електричної енергії стандартних U та f в енергію з регульованими $U_{PEГ}$ та $f_{PEГ}$. СК в певну мить подає імпульси на керуючі електроди тиристорів СЧ.

Перевагами напівпровідникового перетворювача частоти є: високий ККД, швидкодійність та безшумність.

3.14. Трифазний тиристорний перетворювач частоти з безпосереднім зв'язком живлячої мережі і навантаження

Принципова схема трифазного тиристорного перетворювача частоти з безпосереднім зв'язком живлячої мережі і навантаження (рис. 3.35) забезпечує регулювання у діапазоні $f = 35 \div 45$ Гц.

За наявності нульового проводу (показаного пунктиром на рис. 3.35) кожна фаза схеми працює незалежно. Розглянемо фазу «А»: якщо тиристори $VS1 \dots VS6$ закриті (імпульс від СК не подають), то напруга на опорі Z_A дорівнює $U_{PEГ} = 0$.

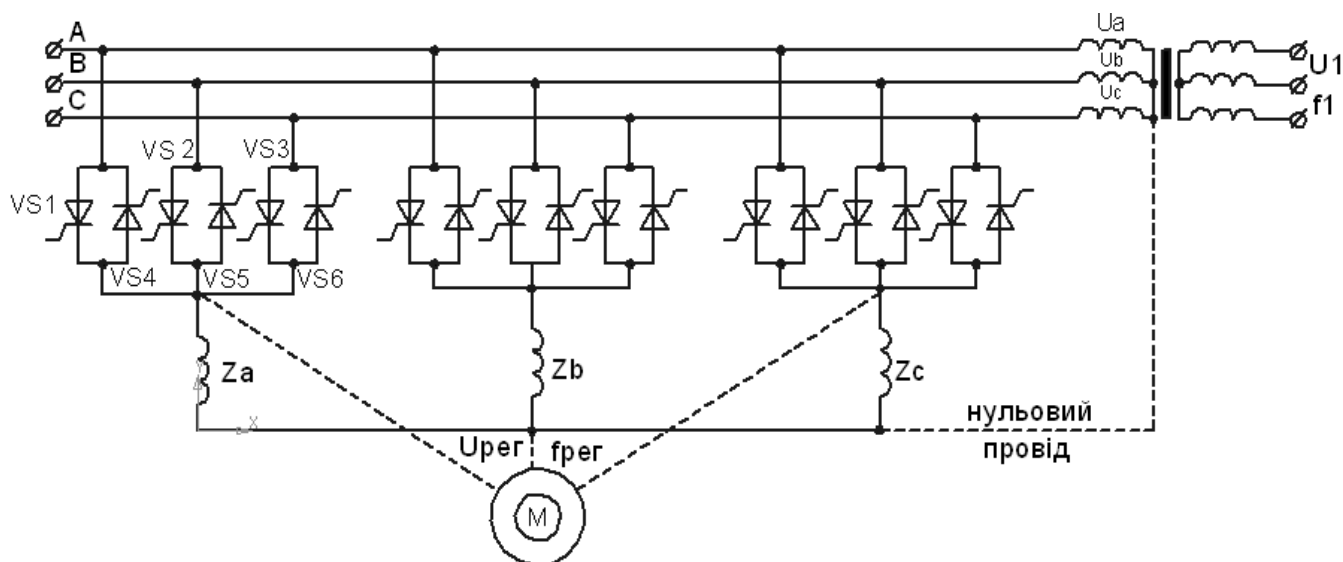


Рис. 3.35

Якщо подавати керуючі імпульси на $VS1$ у мить t_1 , на $VS2$ – у мить t_2 , а на $VS3$ – у мить t_3 (рис. 3.36.а), то вони відкриваються і до навантаження буде прикладено регульовану напругу (рис. 3.36.б). Якщо подати керуючі імпульси на $VS4-6$, то до навантаження буде прикладено напругу протилежної полярності. Отже, на опір Z_A подається напруга, регульована за періодом $T_{PEГ} > T_1$ (рис. 3.36.а, б).

З рис.3.36:

$$\frac{T_{PEГ}}{2} = \frac{T_1}{2} + h \cdot \frac{T_1}{3},$$

де h – число тиристорів у групі, у даному випадку $h=1$.

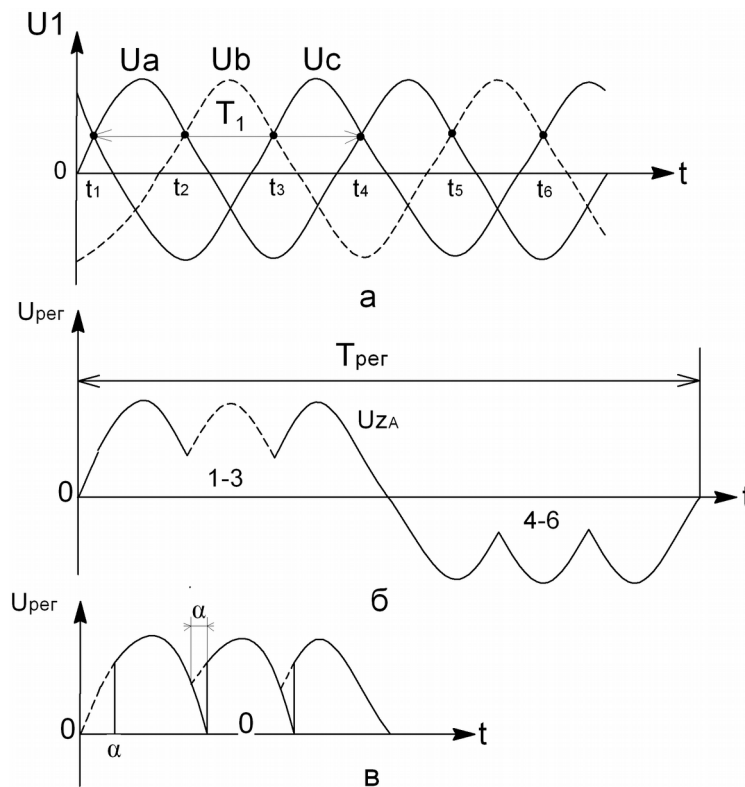


Рис. 3.36.

Отже, значення частоти $f_{PEГ}$ може змінюватись дискретно, в залежності від числа відкритих тиристорів h :

$$f_{PEГ} = \frac{3f}{3 + 2h}.$$

Таким чином, за $f = 50$ Гц:

h	2	3	...	6	7	...
$f_{PEГ}$ Г	21,4	16,7	...	10	8,8	...

Регулювання діючого значення напруги $U_{PEГ}$ досягають тим, що додатні керуючі імпульси на тиристори подають із затримкою на кут керування α (рис. 3.36.в) відносно моменту природного відкривання, тоді:

$$U_{PEГ} = \frac{\sqrt{2}m}{\pi} \cdot U_{\phi} \cdot \sin\left[\frac{\pi}{m}\right] \cdot \cos(\alpha)$$

Якщо прибрати нульовий провід, то отримаємо мостову схему перетворювача частоти.

3.15. Перетворювач частоти з ланкою сталого струму

Силова частина перетворювача частоти складається з керованого випрямляча КВ і керованого інвертора КІ (рис. 3.37.а).

Змінну напругу мережі U_1 перетворюють в сталу ЕРС E_0 , яку регулюють за допомогою схеми керування СККВ. E_0 перетворюють у трифазну змінну регульовану напругу $U_{PEГ}$; регулювання частоти $f_{PEГ}$ задають схемою СККІ.

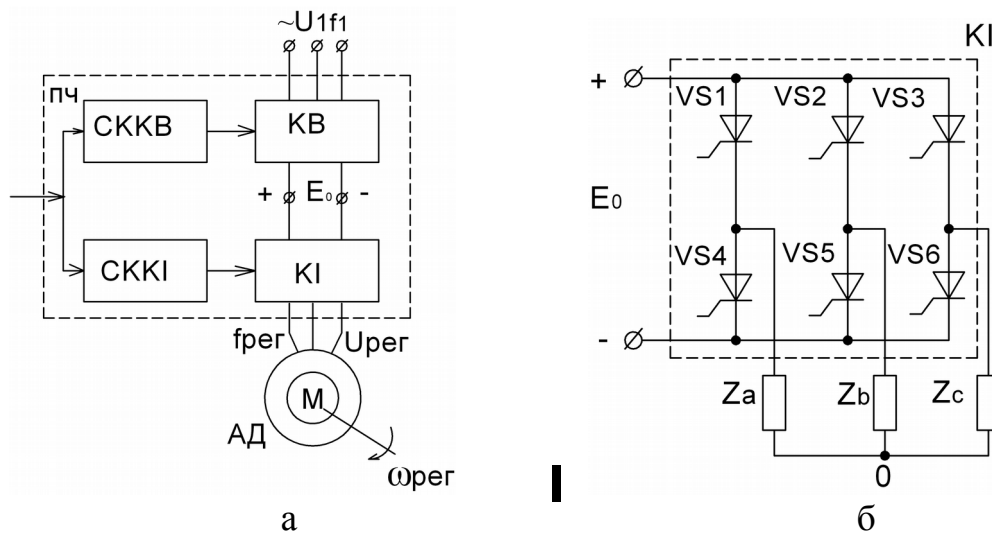


Рис. 3.37

Розглянемо мостову схему керованого інвертора (рис. 3.37.б).

За допомогою СККІ тиристри можна відкривати в потрібній черговості і на певний термін τ . Нехай $\tau = T_{пер}/2$, тоді часова струмова діаграма роботи тиристорів виглядатиме як на рис. 3.38:

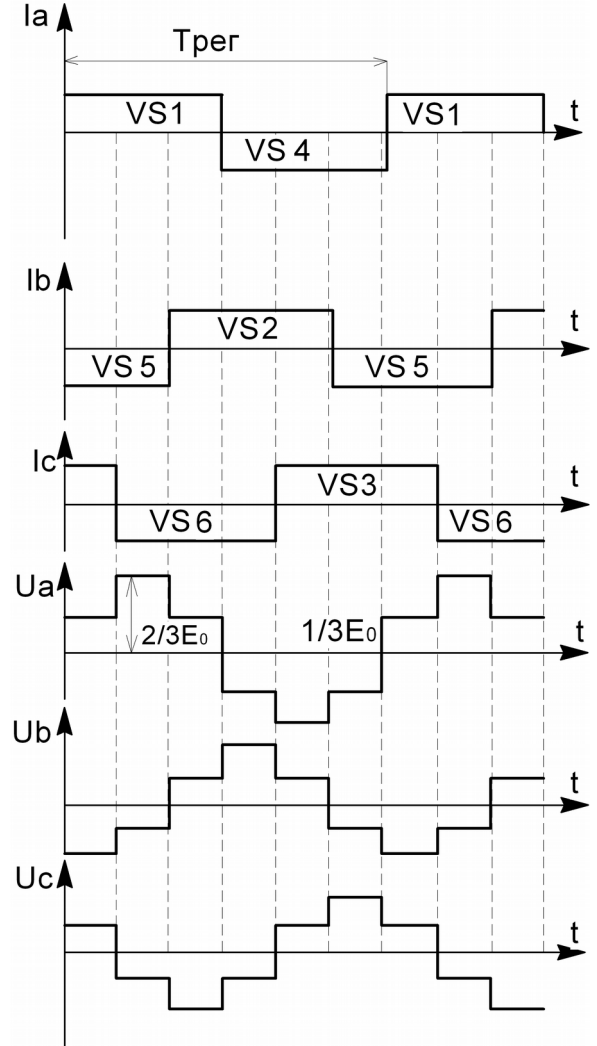


Рис. 3.38

Струми, що проходять через верхні тиристори ($VS1-VS3$) відкладаємо в додатному напрямі, а через нижні ($VS4-VS6$) – у від’ємному.

Видно, що за $T_{\text{рег}}$ маємо шість комбінацій відкритих і закритих станів тиристорів.

Визначимо форму напруги на навантаженні Z_A, Z_B, Z_C (рис. 3.35).

На I-му інтервалі відкриті тиристори $VS1, VS5, VS3$: початки фаз A і C підключені до додатної E_0 , а початок фази B – до $-E_0$. Еквівалентний опір паралельно підключених фаз Z_A і Z_C буде в 2 рази менший за опір Z_B , тоді і спад напруги на фазах A і C вдвічі менший, ніж на фазі B , а саме – $1/3$ від E_0 , на фазі B – $-2/3E_0$.

На II інтервалі відкриті $VS1, VS5, VS6$, тобто фази B і C включені паралельно і до них прикладено $1/3E_0$, а до фази A – $2/3E_0$.

Отже, з рис. 3.38 видно, що фази навантаження живить змінна напруга, максимуми якої зсунуті на $T_{\text{рег}}/3$ ($\varphi=120^\circ$).

Залежно від способу комутації струму тиристорів інвертори поділяють на введомі мережею та автономні. У перших комутацію з тиристора на тиристор забезпечують змінною напругою джерела живлення. В автономних для комутації використовують конденсатори і котушки індуктивності.

V. СХЕМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

4.1. Автоматизований електропривод змінного струму

Основні вузли керування в електроприводах з асинхронними короткозамкненими електродвигунами виконують функції комутації та захисту. Застосовують релейно–контакторні схеми керування.

Асинхронні двигуни (АД) напругою до 1 кВ захищають: від багатofазних, а у випадку заземленої нейтралі й заземлення корпусів, – від однофазних коротких замикань (КЗ); від перевантажень; від зниження напруги.

Захист виконують плавкими запобіжниками, розчеплювачами автоматичних вимикачів або тепловими реле магнітних пускачів. Захист двигуна від КЗ у мережах із глухозаземленою нейтраллю виконують трифазним (від міжфазних КЗ і однофазних на землю).

Автоматичні вимикачі здійснюють всі види захисту: від КЗ – електромагнітними напівпровідниковими розчеплювачами; від перевантаження – електротепловими розчеплювачами; від зниження напруги – розчеплювачами мінімальної напруги.

Захист двигунів від КЗ може здійснюватися за допомогою максимальних струмових реле у вигляді *струмового відсічення*. На рис. 4.1 зображено схему струмового відсічення без витримки часу, в трифазному виконанні. Реле струму $KA1... KA3$ включені до кожної фази статора. При спрацьовуванні хоча б одного реле розмикається відповідний контакт $KA1... KA3$ у колі котушки контактора KM і електродвигун відключається від мережі.

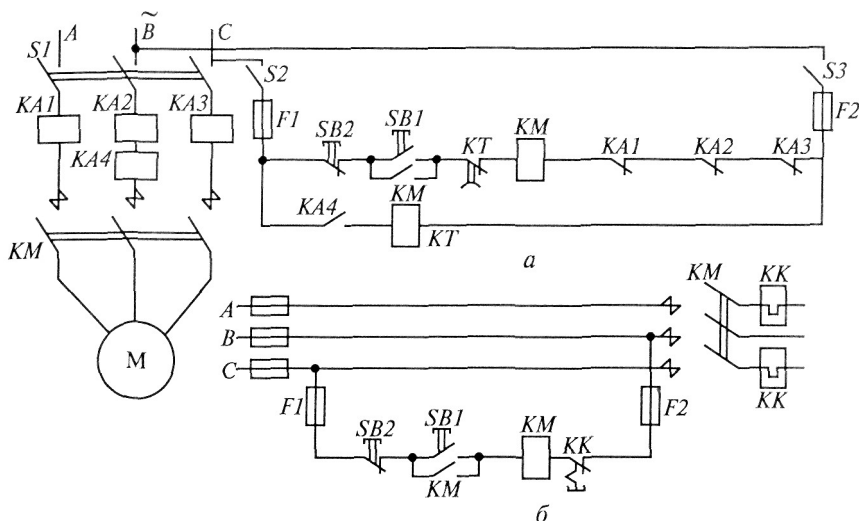


Рис 4.1 Схема пуску АД із струмовим відсіченням [5]

Від перевантаження двигун захищає струмовий захист, що реагує на зростання струму, а також температурний захист. Струмовий захист виконується електромеханічними, напівпровідниковими або електротепловими реле. Захист двигуна від перевантаження повинен спрацьовувати при короткочасних перевантаженнях, тому він має витримку часу.

Захист від перевантаження встановлюють, коли має місце технологічне перевантаження або необхідно обмежити тривалість пуску або самозапуску двигунів при зниженій напрузі. Захист від перевантаження містить реле струму K_A4 та часу KT (рис. 4.1).

Струм спрацьовування електромагнітних реле струму обирають за умовами:

$$I_{cp} \geq (K_{om} K_{cx} I_{д.ном}) / (K_{\epsilon} K_I); \quad (4.1)$$

$$I_{cp} \leq (0,75 K_{cx} I_{д.ном}) / K_I; \quad (4.2)$$

де $I_{д.ном}$ - номінальний струм двигуна; K_{om} - коефіцієнт, який залежить від типу реле; K_{cx} - коефіцієнт схеми; K_{ϵ} - коефіцієнт повернення; K_I - коефіцієнт трансформації трансформатора струму. Приймають наступні значення: $K_{om}=1,1, \dots, 1,2$; $K_{cx}=1$ або $K_{cx}=\sqrt{3}$; $K_{\epsilon}=0,8$. За умовою (4.1) реле не повинне спрацьовувати в нормальному режимі роботи двигуна; за умовою (4.2) реле повинне спрацьовувати при пусках двигуна, якщо пуск затягся ($t_{п.з} \geq 3$ с).

При тривалому перевантаженні й тривалому пуску двигуна, реле часу KT встигає спрацьовувати й відключити двигун, розмикаючи контакт KT у колі котушки контактора KM .

Струми спрацьовування напівпровідникових розчеплювачів автоматичних вимикачів, при спрацьовуванні захисту від перевантаження, вибирають по наведених вище умовах. Захист вважають ефективним, якщо

$$I_{cp} \leq (1,2 \dots 1,4) I_{д.ном}. \quad (4.3)$$

На рис. 4.1 зображено електротеплові реле для захисту від перевантаження. Цей захист запобігає роботі двигуна на двох фазах, тому магнітний пускач складається із двох теплових реле KK . Номінальний струм електротеплового реле визначають за умовою:

$$I_{р.ном} \geq I_{нг.ном} \approx I_{д.ном} \quad (4.4)$$

де $I_{нг.ном}$ - номінальний струм змінного нагрівача електротеплового реле.

Апаратом захисту від зниження напруги меншій за $(0,6 \dots 0,7) U_{ном}$ є магнітний пускач або контактор.

Якщо необхідно здійснити **реверс та гальмування** двигуна, то застосовують реверсивний магнітний пускач, що містить у собі два лінійних контактори $KM1$ і $KM2$ і два теплових реле захисту KK (рис. 4.2). Така схема забезпечує прямий пуск і реверс асинхронного двигуна, а також гальмування противовмиканням при ручному керуванні.

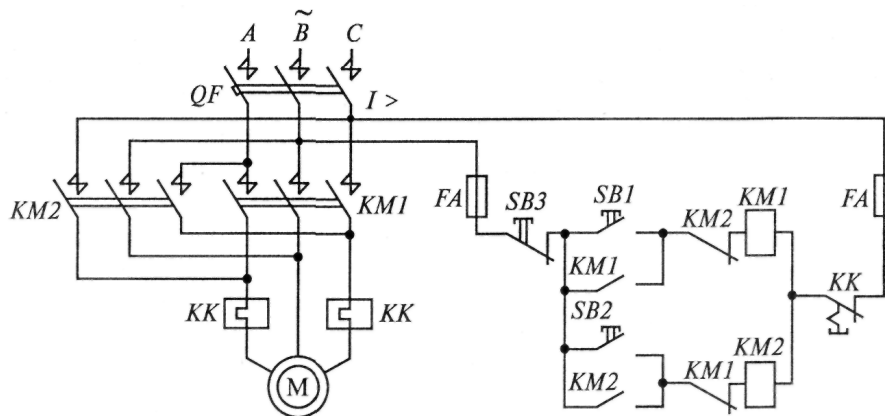


Рис. 4.2 Схема реверсивного пуску АД

У схемі передбачений також захист від перевантажень АД (реле KK) і коротких замикань у колах статора (автоматичний вимикач QF) і керування (запобіжник FA). Забезпечується нульовий захист від зникнення (зниження) напруги мережі (контактори $KM1$ і $KM2$).

Пуск двигуна у напрямках «Уперед» або «Назад» здійснюють натисканням відповідно кнопки $SB1$ або $SB2$, що призводить до спрацювання контактора $KM1$ або $KM2$ і підключенню АД до мережі (при включеному автоматичному вимикачі QF).

Для забезпечення реверсу або гальмування двигуна спочатку натискають кнопку $SB3$, що призводить до відключення включеного контактора (наприклад, $KM1$), потім натискають кнопку $SB2$, що призводить до включення контактора $KM2$ і подачі на АД напруги живлення з іншим чергуванням фаз. Після цього магнітне поле двигуна змінює напрямок обертання й починається процес реверса, що складається із двох етапів – гальмування противмиканням і «розбігу» у протилежний бік (реверс).

4.2. Електроприводи з автоматичним пуском у функції струму

Розглянемо електропривод з автоматичним пуском у функції струму і гальмуванням противмиканням у функції швидкості. Схема для асинхронного двигуна з фазним ротором представлена на рис. 4.3. Обмотку статора двигуна вмикають у мережу через автоматичний вимикач $QF1$ і теплові реле $KK1$, $KK2$; схема керування через автоматичні вимикачі - $SF1$, $SF2$.

Після увімкнення автоматичних вимикачів $QF1$, $SF1$, $SF2$ у схемі керування спрацює реле часу $KT1$ і розімкне свій нормально замкнутий контакт $KM1.1$.

Пуск двигуна здійснюють натисканням кнопки $SB2$. При цьому через кнопку $SB1$, блок-контакт $KM6.1$ контактора противмикання $KM6$, нормально замкнуті контакти $KK1.1$ і $KK2.1$ отримають живлення котушки контакторів $KM1$ і $KM2$. Внаслідок чого, замкнуться контакт $KM1.1$, що зашунтує кнопку $SB2$; та силові контакти $KM1.3$ - $KM1.5$ у колі статора двигуна. Контактор $KM2$ контактами $KM2.1$ - $KM2.2$ зашунтує гальмівні резистори у колі ротора - $R_r.A$ - $R_r.C$. Контакт $KM1.2$ розімкнеться і реле часу з деяким запізненням замкне контакт $KT1.1$ і підготує коло живлення котушки контактора $KM3$.

Одночасно з цим запускається двигун. У колі ротора починає протікати великий пусковий струм, під його дією спрацюють реле струму $KA1$ - $KA3$ і розімкнуть свої контакти $KA1.1$ - $KA3.1$ у колах живлення котушок контакторів $KM3$ - $KM5$. По мірі розгону ЕРС E_2 у роторі зменшується, зменшується і струм у роторі від I_1 до I'_2 . Першим відпускається реле $KA1$, у якого струм відпускання

$$I_{відн.1} = I'_2 = I_{р.н} \cdot \frac{M_2}{M_{ном}}, \quad (4.5)$$

його контакти замикаються і спрацює контактор $KM3$. Контакти $KM3.1$, $KM3.2$ виводять секцію $R1$ пускового резистора, струм стрибком зростає до I_1 і по мірі розгону зменшується до I_2 . Відпускається реле $KA2$

$$I_{відн.2} = 1,1 \cdot I_2, \quad (4.6)$$

його контакт у колі живлення котушки контактора КМ4 замикається і виводиться друга секція пускового резистора R2, струм стрибком збільшується до I_2 . Відпускається реле КА3,

$$I_{відн.2} = 1,2 I_2''' \quad (4.7)$$

його контакт у колі котушки контактора КМ5 замикається, КМ5 своїми контактами шунтує останню ступінь пускового резистора R3. Струм знову зростає до I_1 , двигун виходить на природну характеристику і розганяється до навантаження M_{c1} .

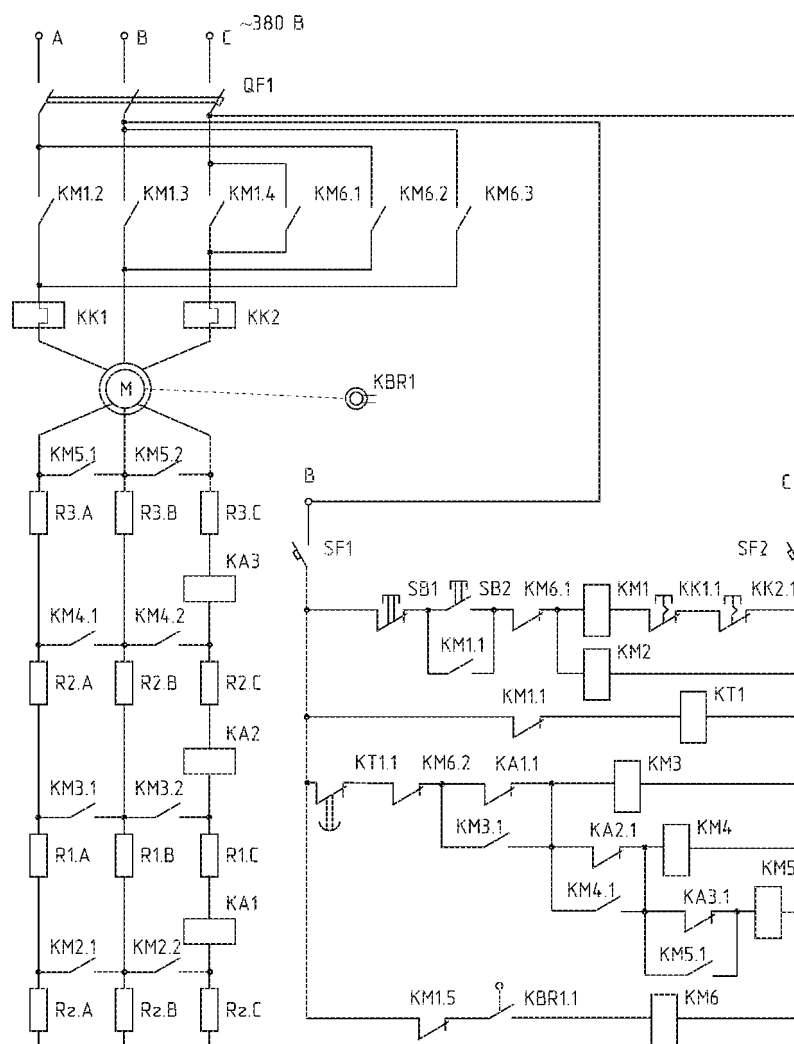


Рис. 4.3 Схема автоматичного пуску асинхронного двигуна у функції струму і гальмування противмиканням у функції швидкості

Блокувальні контакти КМ3.1, КМ4.1, КМ5.1 дублюють замикання контактів КА1.1, КА2.1, КА3.1. Таке дублювання необхідне, так як після виводу секції R1 реле КА1 може на короткий час спрацювати під дією струмів перехідного процесу і тоді контакти КА1 розімкнуться, що призведе до відпускання контактора КМ4.

Гальмування. Для зупинки двигуна необхідно натиснути кнопку SB1, контактори КМ1 і КМ2 відпускаються, при цьому статор відключається від мережі. У колі ротора розмикаються контакти КМ2.1-КМ5.2, внаслідок чого у

коло ротора вмикаються резистори всіх секцій пуску R1-R3 і гальмування Rг. Контактор КМ6 спрацьовує, так як блок-контакт К1.5 повертається у вихідне положення при втраті живлення контактором КМ5, контакт КВР1.1 реле контролю швидкості буде замкнутим. Це призведе до замикання контактів КМ6.1-КМ6.3, а отже, підключення статора до мережі із зворотнім чергуванням фаз і переводу двигуна у режим гальмування противмиканням. Коли ротор двигуна зупиниться, контакт КВР1.1 розімкнеться, котушка КМ6 втратить живлення і статор двигуна відключиться від мережі. Гальмування закінчено і схема готова до нового пуску.

4.3. Електропривод з автоматичним пуском у функції часу

Схема автоматичного пуску і динамічного гальмування у функції часу асинхронного двигуна із фазним ротором представлена на рис. 4.4.

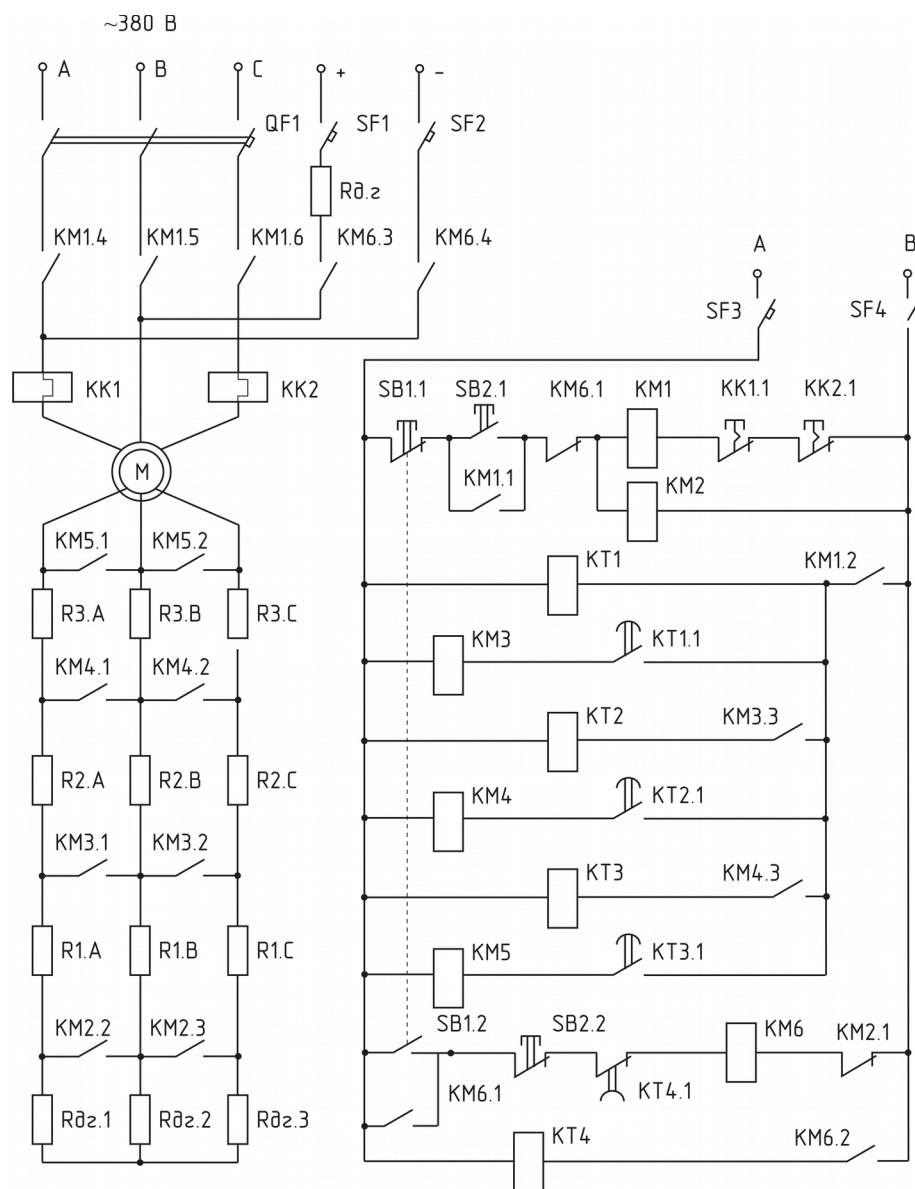


Рис. 4.4. Схема автоматичного пуску і динамічного гальмування асинхронного двигуна в функції часу

Силова частина схеми містить електродвигун і три пускових опори R1-R3 та гальмівний опір (по одному у кожній фазі ротора), з'єднані зіркою. Напругу мережі подають через автоматичний вимикач QF1 і теплові реле КК1, КК2.

Перемикання ступенів пускового резистора здійснюють замикаючими контактами контакторів прискорення КМ3-КМ5. Для здійснення динамічного гальмування електродвигуна у силовій частині схеми є електричне коло для підключення обмотки статора до джерела постійного струму через опір Rд.г. Підключення цього кола до мережі постійного струму виконується через автоматичні вимикачі SF1, SF2 і замикаючі контакти контактора гальмування КМ6.

Керуюча частина містить контактори і реле часу, що виконують керування пуском і гальмуванням електродвигуна за заданою програмою. Програма пуску (число ступенів пуску і час вмикання кожного з них) визначається трьома реле часу і уставками на тривалість уповільнення при спрацюванні.

Схема працює наступним чином. Попередньо необхідно увімкнути автоматичні вимикачі QF1, SF1, SF2. При короткочасному натисненні на кнопку SB2 замикається коло обмотки контактора КМ1 через контакти теплових реле КК1, КК2 і його блок-контакти КМ1.1 шунтують кнопку SB2.

Одночасно замикаються силові контакти КМ1.4-КМ1.6, що підключають до мережі обмотку статора електродвигуна *M*. Також отримує живлення контактор КМ2, що виводить із кола ротора резистори динамічного гальмування. При цьому починається пуск електродвигуна на першому ступені пускового резистора R1+R2+R3. Блок контакти КМ1.2 розмикаються, що запобігає випадковому вмиканню контактора КМ6, а контакти КМ1.2 замикаються підключаючи котушку реле прискорення КТ1, яке з встановленим уповільненням спрацьовує і своїми контактами КТ1.1 замикає коло котушки КМ3. При спрацюванні цього контактора замикаються контакти КМ3.1, КМ3.2, що шунтують елементи R3 пускового опору. При цьому процес пуску електродвигуна *M* переходить на наступну ступінь R1+R2. Спрацювання контактора КМ3, супроводжується також замикання контактів КМ3.1, що включають реле часу КТ2. З заданою витримкою часу це реле замкне свої контакти КТ2.1 у колі контактора КМ4, який своїми контактами КМ4.1, КМ4.2 зашунтує елемент пускового резистора R2. У результаті електродвигун перейде на третій пусковий ступінь R1. І на кінець, контакти КМ4.1 увімкнуть реле часу КТ3, яке з встановленою витримкою своїми контактами КТ3.1 увімкне контактор КМ5. При цьому пусковий опір у колі ротора виявиться повністю зашунтованим і обмотка ротора електродвигуна буде замкнута на коротко. На цьому процес пуску електродвигуна закінчується і він починає працювати у режимі своєї природної механічної характеристики.

Зупинка електродвигуна здійснюється короткочасним натисненням кнопки SB1, що приводить до відключення контактора КМ1. У результаті розмикаються силові контакти КМ1.4-КМ1.6 відключають обмотку статора електродвигуна від мережі, і контакти КМ1.2, що відключають всю групу реле і контакторів керуючих пуском. Це приводить до розмикання контактів контакторів КМ3-КМ5 і підготовки електродвигуна до наступного пуску.

4.4. Частотно-регульований електропривод змінного струму

Прогрес у галузі напівпровідникової техніки дозволяє розробити системи регульованого електроприводу з електродвигуном змінного струму, які в ряді випадків мають переваги у порівнянні із системами тиристорного електроприводу сталого струму. В першу чергу це стосується системи “перетворювач частоти-двигун” (ПЧ-Д) і вентильного каскадного електроприводу.

Розрізняють два типи перетворювачів частоти (ПЧ): з проміжною ланкою сталого струму і з безпосереднім зв'язком живлячої мережі і кіл навантаження [6].

Блок-схема перетворювача частоти з проміжною ланкою сталого струму зображена на рис. 4.5.

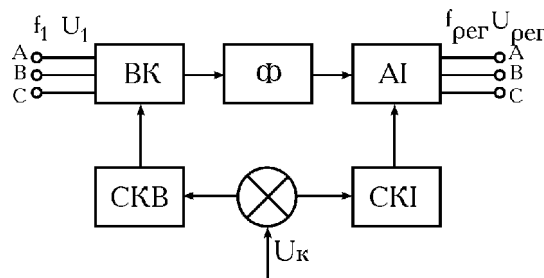


Рис. 4.5. Блок-схема автоматизованого електроприводу

Випрямляч BK перетворює вхідну напругу U_1 змінного струму у напругу сталого струму, величину якої можна задавати за допомогою системи керування $СКВ$. Згладжуючий LC -фільтр Φ зменшує пульсації напруги на виході з випрямляча.

Автономний інвертор (АІ) перетворює напругу сталого струму у вихідну напругу U_{per} змінного струму потрібної частоти f_{per} (частота вихідної напруги за допомогою системи керування $СКІ$ може бути встановлена як вищою, так і нижчою від частоти живлячої мережі f_1). В якості АІ може бути використаний інвертор струму, резонансний інвертор та інвертор напруги. Такий тип ПЧ простіший за перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком. Недоліком ПЧ з проміжною ланкою сталого струму є подвійне перетворення енергії, що призводить до зменшення ККД, а також до збільшення встановленої потужності перетворювача.

Перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком можуть виконуватись з природною та штучною комутацією. Вони також дозволяють отримати вихідну частоту як вищою, так і нижчою за частоту живлячої мережі. Недоліком їх є низький $\cos \varphi$ внаслідок зміни кута регулювання і несинусоїдальна форма вихідної напруги, для покращення якої повинен застосовуватись фільтр, а це збільшує встановлену потужність.

4.4.1. Інвертор струму

Особливості роботи інверторів струму розглянемо на прикладі трифазного мостового паралельного інвертора, зображеного на рис. 4.6. Випрямляч (на рис. 4. не показаний) працює в режимі генератора сталого струму, для чого у вхідне коло інвертора вмикають індуктивність L_d . Для інверторів струму характерно те, що

вони формують у навантаженні струм прямокутної форми, а форма і фаза напруги на навантаженні залежить від параметрів навантаження.

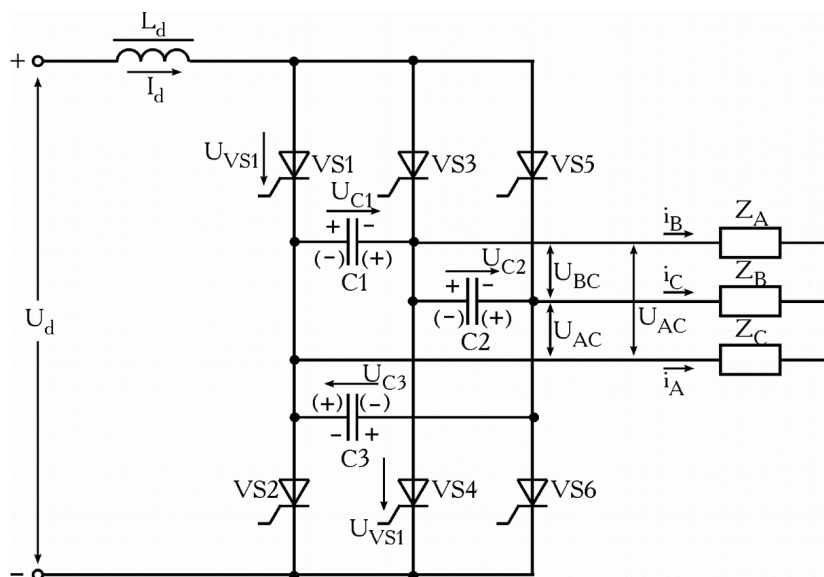


Рис. 4.6. Трифазний мостовий інвертор струму

Інвертор струму забезпечує такий режим роботи тиристорів, при якому між анодом і катодом тиристора, який потрібно закрити протягом певного часу запирання $t_{зан}$ підтримується від'ємна напруга. Це забезпечує відновлювання запираючих властивостей тиристора. Для комутації (перемикання) тиристорів та для підтримання на них від'ємної напруги, застосовують комутуючі конденсатори C1 - C3.

За активно-індуктивного характеру навантаження баланс реактивної потужності забезпечується компенсуючими конденсаторами (у схемі на рис. 4. це ті самі конденсатори C1-C3). Розглянемо роботу схеми (рис. 4.), використовуючи часові діаграми рис. 4.-4.. Порядок роботи тиристорів у схемі наступний: VS1-VS4; VS1-VS6; VS3-VS6; VS3-VS2; VS5-VS4; VS1-VS4. У зв'язку з тим, що кожен тиристор працює 1/6 частину періоду T у парі з іншим тиристором, то на керуючий електрод кожного тиристора подають або два вузьких імпульси, які слідують через 60° , або один широкий імпульс тривалістю понад 60° .

Цим забезпечують одночасну роботу двох тиристорів: одного в анодній групі (VS1, VS3, VS5) і одного в катодній групі (VS2, VS4, VS6). Міжвентильна комутація, тобто запирання кожного тиристора відбувається при відпиранні наступного за порядком роботи тиристора іншої фази, але цієї ж групи. У межах часового інтервалу $60^\circ < t < 120^\circ$ вентилі VS1 і VS6 відкриті (рис. 4.).

Випрямлений струм $i_d = \text{const}$ протікає по колу: „+”-Ld-VS1-ZA-ZC-VS6-„-”. У момент часу $t = t_2$ конденсатори C1 і C2 знаходяться під позитивною напругою (полярність вказана на рис. 4. без дужок), а конденсатор C3 – під негативною. Подається імпульс на відкриття тиристора VS3 – він відкривається і закорочує конденсатор C1, бо у відкритому стані має малий опір.

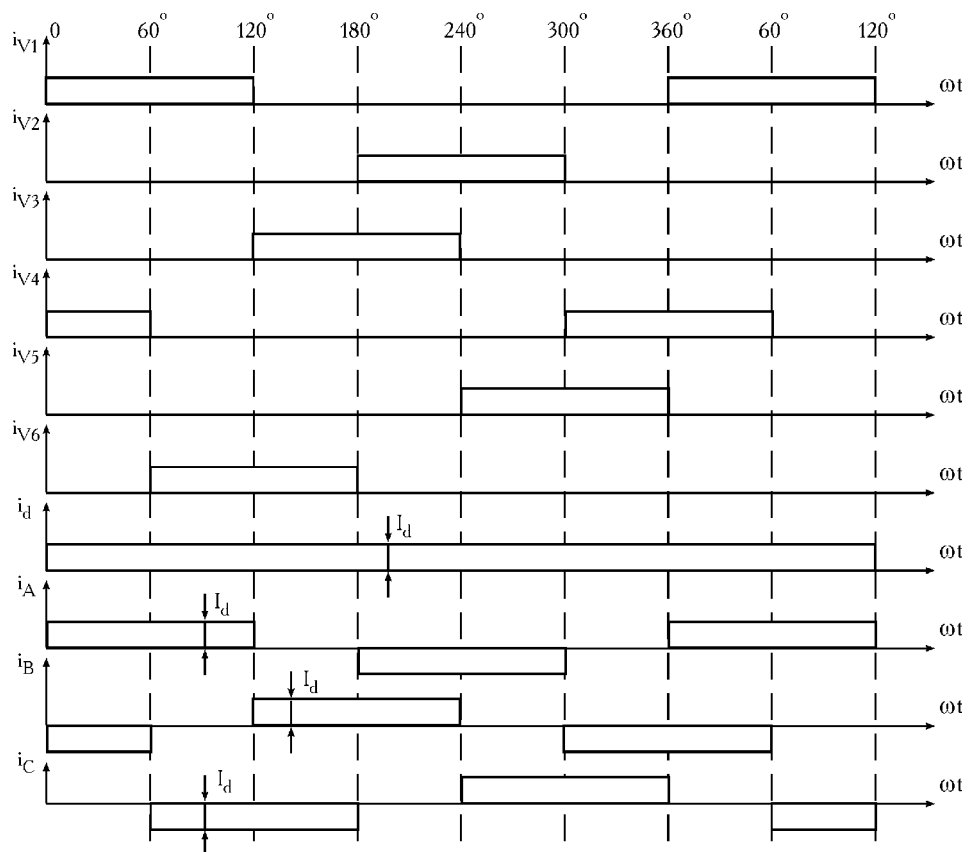


Рис. 4.7. Часові діаграми струмів

Струм розряду конденсатора i_{C1} (див. рис. 4.) різко зростає і протікає назустріч струмові тиристора VS1, майже миттєво зменшуючи його до нуля. Тепер струм i_d протікає через тиристор VS3. Струм тиристора VS3 i_{VS3} розгалужується на декілька складових:

- струм перезарядки конденсатора C1 i_{C1} (див. рис. 4.); конденсатор буде перезаряджатись, напруга на ньому змінюватиме полярність (див. рис. 4.);
- струм підзарядки конденсатора C2 i_{C2} ; напруга на ньому буде зростати (див. рис. 4.);
- струм i_e у опорі Z_e фази B; внаслідок індуктивності опору фази струм миттєво зрости не може.

Після зменшення струму тиристора VS1 i_{VS1} до нуля енергія до фази A через даний тиристор надходити не може. Струм i_A фази A миттєво зменшитись не може, тому він підтримується за рахунок струму розряду конденсатора C1 i_{C1} та струму розряду конденсатора C3 i_{C3} . По закінченні комутації струм фази A переходить до фази B.

Тепер струм протікає по колу “+”- L_d -VS3- Z_B - Z_C -VS6-“-”.

Зміна напруги U_{VS1} на тиристорі VS1, комутація якого була щойно розглянута, приведена на рис. 4.9. В момент часу $t = t_2$ до VS1 прикладається зворотна напруга конденсатора C1 і підтримується така полярність протягом часу запирання t_{zan} , якого достатньо для відновлення запираючих властивостей тиристора. Всю решту часу на тиристорі підтримується пряма напруга.

Процеси, які протікають при комутації інших тиристорів повністю аналогічні і описуються діаграмами рис. 4.-4..

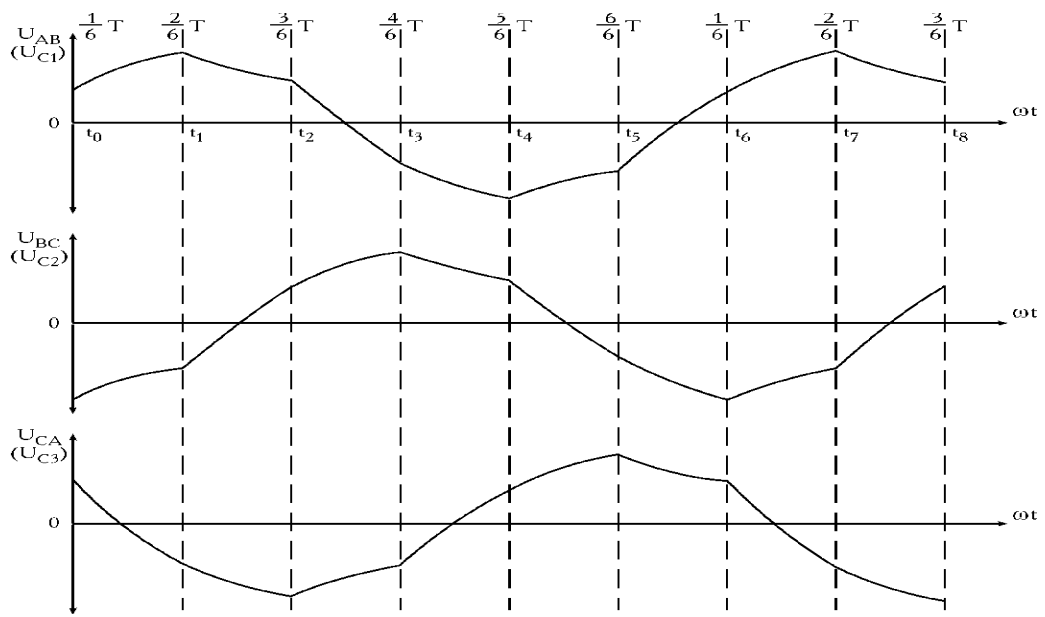


Рис. 4.8. Часові діаграми напруг

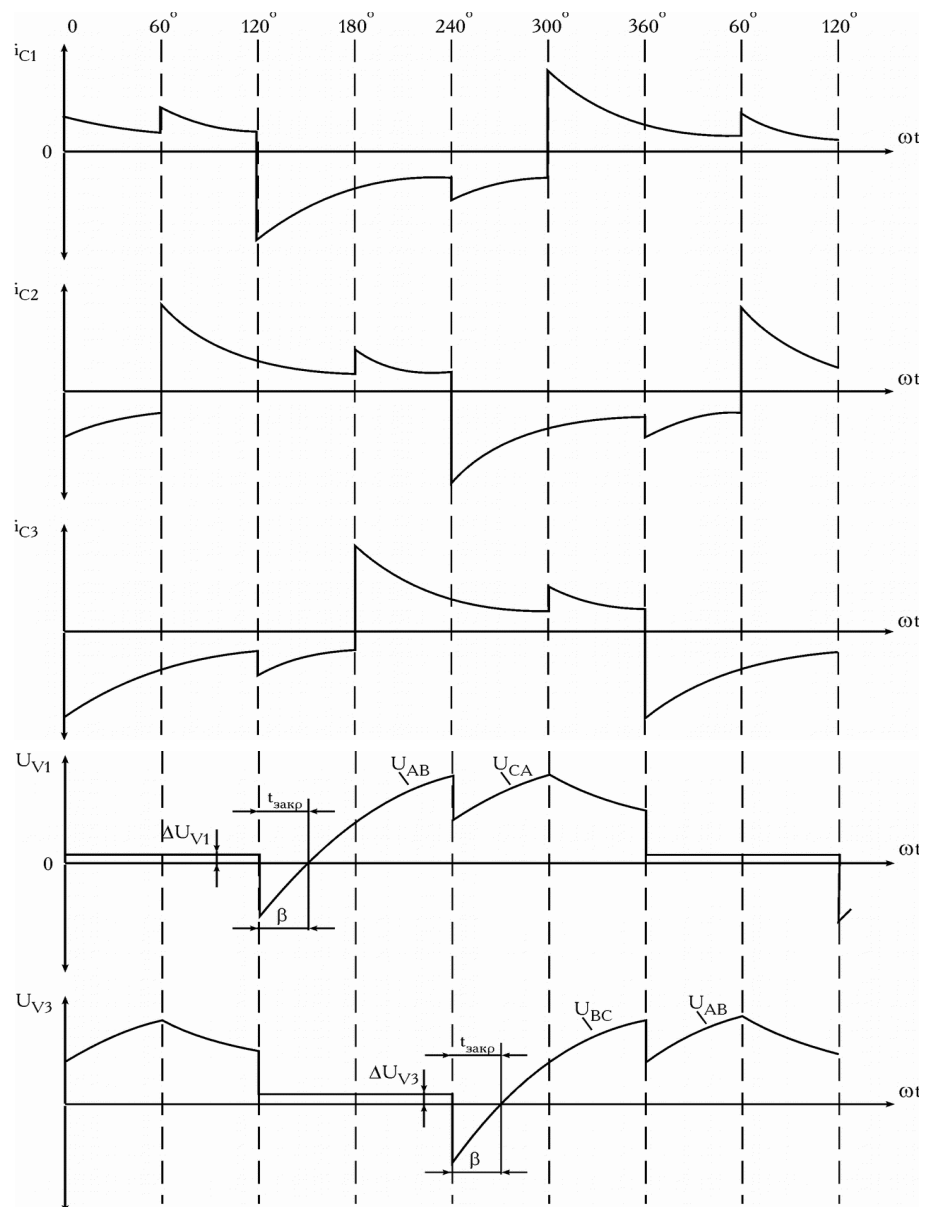


Рис. 4.9. Часові діаграми струмів та напруг

Навантажувальна характеристика інвертора струму (див. рис. 4.0) є "м'якою". При малих діючих значеннях струму навантаження (в тому числі і неробочого ходу) в елементах вузла комутації (конденсаторах) відбувається накопичення енергії, і напруга на конденсаторах значно зростає, що може привести до пробивання конденсаторів і тиристорів. Тому струм навантаження не може бути меншим за $i_{d.min}$. Із збільшенням струму навантаження конденсатори швидко розряджаються через навантаження, тобто скорочується час прикладання до тиристорів зворотної напруги. При деякому струмові $i_{d.max}$ час прикладення зворотної напруги до вентиля стає меншим за час, необхідний для відновлення запираючих властивостей тиристора. В момент появи прямої напруги такий тиристор знову відкривається, але конденсатор, яким він був закритий, розряджений – виникне коротке замикання і зрив інвертування.

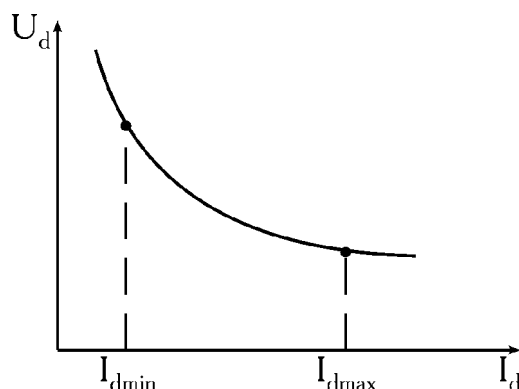


Рис. 4.10. Навантажувальна характеристика інвертора струму

Отже, інвертори струму мають близьку до синусоїдальної форму вихідної напруги, відносно малі пульсації вхідного струму, можливість реверса напрямку потоку потужності без зміни напрямку струму, але мають обмежений діапазон зміни струму навантаження [7].

Розрахунок трифазного інвертора струму здійснюють наступним чином. Розраховують максимальну активну потужність на виході інвертора, Вт:

$$P_{inv.max} = \frac{3 U_{н.ф} I_{н.ф.max} \cos \varphi}{\eta_m}, \quad (4.8)$$

де $U_{н.ф}$ - фазна напруга на навантаженні, В:

$$U_{н.ф} = U_{н.л.} / \sqrt{3}, \quad (4.9)$$

η_m - ККД інверторного трансформатора (зазвичай його значення лежить в межах 0,8...0,9); обираємо безтрансформаторну схему інвертора, тобто $\eta_m = 1$.

Мінімальний кут запирання (в градусах):

$$\beta_{min.роз} = 360 \frac{t_{зан}}{T}, \quad (4.10)$$

де $t_{зан}$ - час прикладання зворотної напруги до тиристора;

T - період вихідної напруги, с: $T = \frac{1}{f}$.

Час $t_{зан}$ повинен бути не меншим за час, необхідний для відновлення запираючих властивостей тиристора, $t_{зан} = (1,5...2) t_{відн}$.

Приймаємо $t_{віднов.} = 30$ мкс. Якщо $\beta_{min.роз} < 1^\circ$, то можна прийняти $\beta_{min} = 2^\circ$.

Враховавши, що інвертований струм кожної фази має форму, показану на рис. 4., то діюче значення першої гармоніки струму буде рівне:

$$I_{(1)} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (4.11)$$

Нехтуючи втратами активної потужності в інверторі отримаємо:

$$P_{дінв.} = P_{max} \quad (4.12)$$

де P_d - потужність, яку необхідно подати на вхід інвертора, або в іншому вигляді:

$$P_d = U_d I_d = \frac{3 U_{н.ф} I_{(1)} \cos \beta_{min}}{\eta_{mm}} = \frac{3 \sqrt{6} U_{н.ф} I_d \cos \beta_{min}}{\eta} \quad (4.13)$$

Звідси напруга на вході інвертора, B :

$$U_d = \frac{U_{н.ф} k_{cx} \cos(\beta_{min})}{\eta_m} \quad (4.14)$$

де k_{cx} - коефіцієнт, що залежить від схеми інвертора:

$$k_{cx} = \frac{3 \sqrt{6}}{\pi} \approx 2,34 \quad (4.15)$$

Вхідний струм інвертора, A :

$$I_d = P_d / U_d \quad (4.16)$$

Використовуючи U_d, I_d можна розрахувати випрямляч, який живить інвертор.

Кожен тиристор працює протягом $1/3T$, тому середній струм тиристора, A :

$$I_a = \frac{I_d}{3} \quad (4.17)$$

Максимальна пряма напруга на тиристорах і комутуючих конденсаторах, B :

$$U_{np} = U_c = \sqrt{2} U_{н.л} \quad (4.18)$$

Середній струм тиристора з урахуванням запасу, A :

$$I'_{a3} = k_a I_a \quad (4.19)$$

де $k_{з.с} = (1,8...2)$ - коефіцієнт запасу по струму.

Максимальна пряма напруга на тиристорах, B :

$$U'_{np} = k_{з.н} U_{np} \quad (4.20)$$

де $k_{з.н} = (1,3...1,5)$ - коефіцієнт запасу по напрузі.

По $I'_{анр} U'$ вибираємо тиристори.

Потужність конденсаторної батареї вибираємо виходячи з балансу активних і реактивних потужностей. Роботу інвертора характеризує коефіцієнт потужності:

$$tg\beta = \frac{Q_{інв}}{P_{інв}} = \frac{Q_c - Q_{нав}}{P_{нав}} = \frac{Q_c - P_{нав}}{P_{нав}} tg\varphi$$

Звідси визначимо потужність конденсаторної батареї, *вар*:

$$Q_c = P_{нав} (tg\beta + tg\varphi)$$

Або використовуючи вищенаведені позначення отримаємо:

$$Q_{Cінв} = P_{нав} (tg\beta + tg\varphi)$$

Величину $tg\varphi$ визначаємо по $\cos\varphi$.

Ємність комутуючого конденсатора, мкФ:

$$C = \frac{Q_c}{3 \omega^2 L}$$

де ω - кругова вихідна частота, рад/с:

$$\omega = 2\pi f$$

Обираємо тип конденсаторів з робочою напругою не меншою за $U_c = U_{np}'$.

Для забезпечення необхідної ємності комутуючого конденсатора можливе включення кількох конденсаторів паралельно.

4.4.2. Інвертор напруги

У схемі інвертора напруги, зображеного на рис. 4.11 для комутації струму робочих тиристорів VS1-VS6 застосовують комутуючі тиристори VS7-VS12.

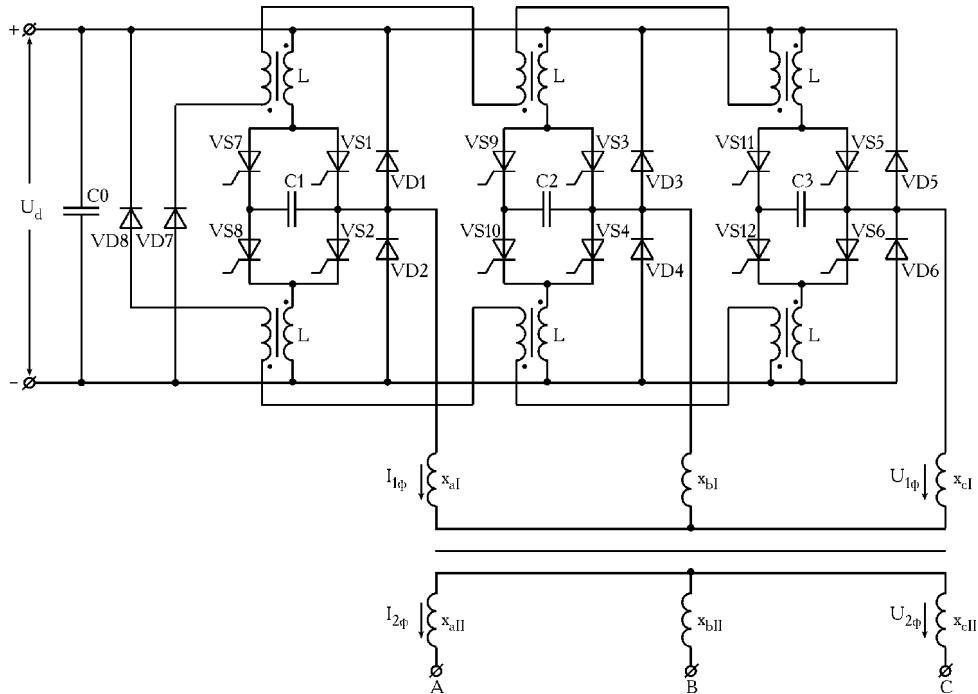


Рис. 4.11. Трифазний інвертор напруги

Процес комутації розглянемо лише для тиристорів фази *A*. В інших фазах процеси при комутації повністю аналогічні. Припустимо, що робочий тиристор VS1 відкритий, конденсатор C1 заряджений. Для закриття VS1 відкривається

тиристор VS7. Під дією розрядного струму конденсатора C1 (по колу C1-VS1-VS7-C1) VS7 закривається. Струм навантаження фази A переходить в коло VS7-C1, а на тиристорі VS1 підтримується від'ємна напруга протягом часу розряду конденсатора по контуру C1-VD1-L-VS7-C1. При цьому напруга в фазі A зберігає свою величину і полярність, оскільки через зворотній діод VD1 фаза A підключена до джерела U_d .

У кінці перезаряду ($i_c=0$) конденсатор C1 буде мати зворотну полярність, вказаній на рис. 4. і тиристор VS7 закриється. Струм фази A буде замикатися через зворотній діод VD2, спадаючи до нуля, і при реверсі перейде в тиристор VS2 (відпирання діода VD2 відбувається в момент часу, що відповідає $U_c = U_d$).

У зв'язку з тим, що перезаряд конденсатора відбувається через дроселі L, які мають початковий запас енергії, напруга на конденсаторах перевищує напругу джерела живлення. Так як в певні моменти часу в інверторі створюється короткозамкнений контур комутуючого дроселя (наприклад, при запиранні VS1 - короткозамкнений контур нижнього комутуючого дроселя L-VD2-VS2), то на високих частотах потрібен енергопоглинач, який запобігає накопиченню електромагнітної енергії в комутуючому контурі.

У даному інверторі енергопоглинач складається з додаткової обмотки на комутуючому дроселі та діодів VD7 і VD8. Енергопоглинач забезпечує повернення енергії комутуючих дроселів в джерело живлення по колу "-L-VD8-+" або "-VD7-L-+". Щоб уникнути перенапруг в елементах джерела енергії (при поверненні енергії в джерело) на вхід інвертора можна підключити конденсатор C_0 , через який буде замикатись струм реверсу енергії. Коефіцієнт трансформації $n = \omega_p/\omega_c = U_d/\Delta U$ (де ω_p і ω_c - число витків відповідно робочої обмотки і обмотки скидання; ΔU - сума спаду напруги на робочому тиристорі і зворотному діоді) має велике значення. Так як в окремі моменти часу на комутуючому дроселі може бути напруга $U_d/2$, то внаслідок великого коефіцієнта трансформації до діодів VD7 і VD8 можуть прикладатись значні зворотні напруги. Тому такий енергопоглинач можна використати для інверторів з відносно низькою напругою живлення ($U_d \approx 50-100$ В).

Розглянутий інвертор має ряд переваг:

- добру переважувальну здатність, тобто малий спад комутуючої здатності із збільшенням струму навантаження;
- зворотна напруга прикладається до тиристора на всьому інтервалі відновлення його запираючих властивостей;
- плавне наростання струму через робочі тиристори при переході струму із зворотних діодів та при зриві інвертування;

Основним недоліком інвертора напруги є значна установлена потужність комутуючих дроселів в колі робочих тиристорів, отже через них протікають струми навантаження.

На рис. 4., 4. зображені часові діаграми, які пояснюють роботу інвертора: на проміжку часу $t_0 < t < t_1$ відкриті робочі тиристори VS1, VS4, VS5, тобто фази A і C підключені до "+", а фаза B до "-".

Форми фазних напруг на навантаженні показано на рис. 4., а розподіл напруг – 4..

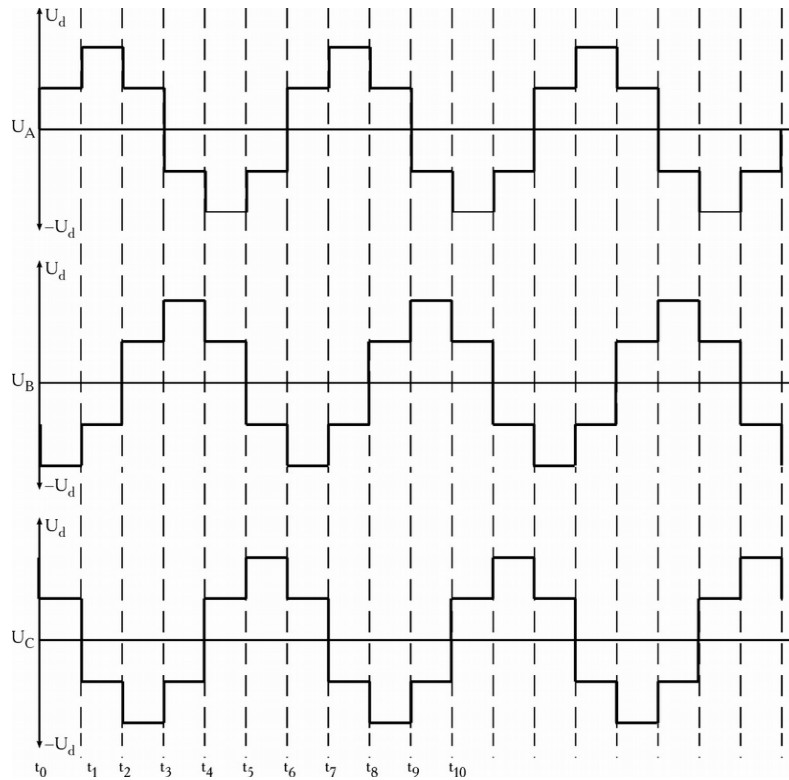


Рис. 4.12. Часові діаграми робочих тиристорів VS1-VS6

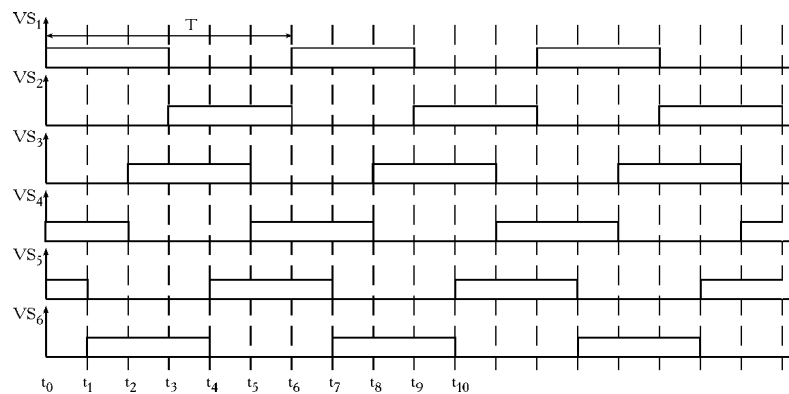


Рис. 4.13. Форми фазних напруг на навантаженні

Оскільки $x_{dI} = x_{eI} = x_{cI}$, то

$$U_{da} = U_e - U_c = U_e - U = \frac{1}{3}U + \frac{2}{3}U,$$

тобто $U_a = U_c = \frac{1}{3}U_d$; $U_e = -\frac{2}{3}U_d$, що і відображено на діаграмах напруг (рис. 4.). Протягом часу $t_1 < t < t_2$ відкриті тиристори VS1, VS4, VS6, тобто фаза A підключені до “+”, а фази B і C до “-” (див. рис. 4., б).

При цьому розподіл напруг буде наступним:

$$U_{da} = U_e - U_a = U_c - U;$$

$$U_a = \frac{2}{3}U_d; \quad (4.21)$$

$$U_a = U_c = -\frac{1}{3}U_d. \quad (4.22)$$

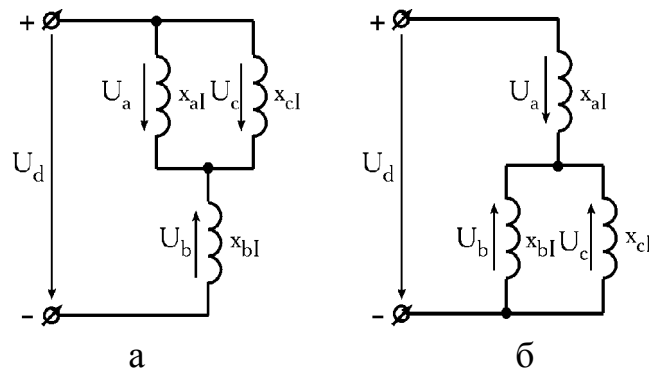


Рис. 4.14. Підключення фаз приймача до полюсів джерела постійної напруги для різних інтервалів часу: а) - $t_0 < t < t_1$; б) - $t_1 < t < t_2$.

Проводячи аналогічним чином розгляд інших інтервалів часу, можна зобразити діаграми напруг на фазах навантаження в повному обсязі (рис. 4.).

Розрахунок **трифазного інвертора напруги** з пофазною комутацією виконують наступним чином. Діюче значення фазної синусоїдальної напруги на навантаженні B (вторинна напруга на виході з трансформатора):

$$U_{(1)2\phi} = \frac{U_{(1)2\lambda}}{\sqrt{3}}.$$

Діюче значення фазної первинної напруги інверторного трансформатора (першої гармоніки), B :

$$U_{(1)1\phi} = \frac{\sqrt{2} U_{cp}}{\pi}.$$

Коефіцієнт трансформації інверторного трансформатора:

$$k_m = \frac{U_{(1)2\phi}}{U_{(1)1\phi}}.$$

Діюче значення синусоїдального струму, A :

$$I_{(1)1} = I_{(1)2\phi} k_m,$$

де $I_{(1)2\phi}$ - діюче значення фазного синусоїдального струму навантаження (двигуна).

Максимальне значення струму через тиристори, A :

$$I_m = 0.74 I_{(1)1} \frac{(2-a)(1-a)}{\cos \varphi_{(1)} (1-a+a^2)},$$

де a - коефіцієнт:

$$a = \exp \left[-\frac{K\pi}{3} \right]$$

K - параметр, який характеризує властивості навантаження.

$$K = \frac{1}{(2-f \tau_n)},$$

$$T_n = \frac{L_n}{r_n}.$$

Величину $f \diamond_n$ знаходять з графіка на рис. 4. по кривій 1, для $\cos \varphi_{(1)}$.

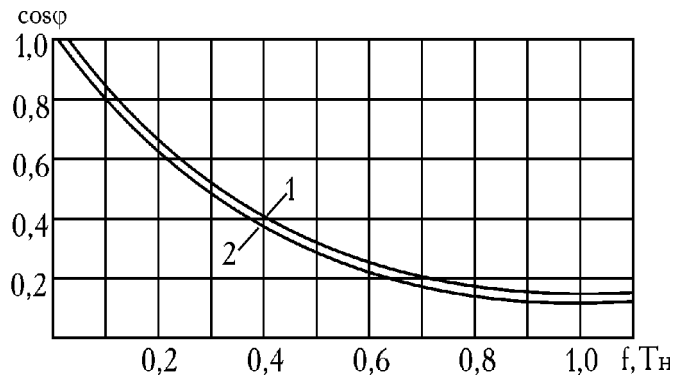


Рис. 4.15. Криві залежності $\cos \varphi = F(f \diamond_n)$: "1" – для синусоїдальної напруги; "2" – для трифазного інвертора

Середнє значення струму джерела живлення, A :

$$I_{cp} = 1.46 \diamond_{(1)1} \frac{\cos^2 \varphi}{\cos \varphi_{(1)}}.$$

Типова потужність інверторного трансформатора, $B \cdot A$:

$$S_{min} = S_1 = 3U_{(1)1\phi} \diamond_{(1)1\phi}.$$

Максимальна напруга на скидуючих діодах VD7, VD8, B :

$$U_{mVDc\bar{p}} = 2U + \frac{U_{c(0)}}{n},$$

де $U_{c(0)}$ - початкова напруга на комутуючому конденсаторі, B :

$$U_{c(0)} = 2U_{cp} \diamond_{(1)1\phi} + n),$$

n - коефіцієнт трансформації між робочою обмоткою і обмоткою скиду:

$$n = \frac{\omega_p}{\omega_c} = 0.05 \diamond_{(1)1\phi} . 25 .$$

Максимальна напруга на зворотних діодах VD1 – VD6, B :

$$U_{VD.zvor.max} = 2U_{cp} .$$

Максимальна зворотна і пряма напруга на робочих і комутуючих тиристорах, B :

$$U_{VSc\bar{p}} = 2U (1+n).$$

Приведений опір фази навантаження, Ω :

$$R'_n = \frac{R_k}{k_m^2},$$

де R_n - активний опір фази навантаження при $75^\circ C$:

$$R_n = \frac{3 U_\phi^2}{P_n},$$

де P_n - номінальна потужність двигуна; U_ϕ - фазна напруга.

Базисний струм, A :

$$I_0 = \frac{U_{cp}}{3R_n}.$$

Середнє значення струму зворотних діодів, A :

$$I_{a.VD.звор} = I_0 \frac{I}{I_m},$$

де $\frac{I}{I_m}$ - відношення струмів, для $\cos \varphi_{(1)} = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$ відповідно складають 0,14; 0,11; 0,08; 0,05; 0,02; 0.

Середнє значення струму робочих тиристорів, A :

$$I_{a.VS.роб} = I_0 \frac{I}{I_m},$$

де $\frac{I}{I_m}$ - відношення струмів, для $\cos \varphi_{(1)} = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$ відповідно складають 0,15; 0,18; 0,23; 0,26; 0,27; 0,33.

Середнє значення струму комутуючих тиристорів, A :

$$I_{a.VS.ком} = I_m \frac{2t_c}{T},$$

де $t_c = (1,5 \dots 2) t_{відн}$ від часу відновлення запираючих властивостей тиристора, приймаємо $t_{відн} = 30$ мкс, T - період вихідної частоти, с.

Середнє значення струму скидуючих діодів VD7, VD8:

$$I_{a.VD.скид} = (0,1 \dots 0,2) I_{a.VS.ком}.$$

На основі розрахунку вибирають тиристори і діоди (за максимальними значеннями струму і напруги). Для забезпечення необхідної зворотної напруги (або навантаження) можливо послідовне або паралельне включення тиристорів і діодів.

4.5. Синтез енергоефективних систем управління електроприводом змінного струму і вибір керованого джерела живлення

Керувати змінними (напругою, струмами, потокозчепленням) статора та ротора асинхронного двигуна можна зміною:

- модуля вектора (*скалярне* керування);
- модуля та аргументу вектора (полярне керування);
- проєкцій вектора на координатні осі (*векторне* керування).

Силова частина більшості перетворювачів частоти (ПЧ) виконана по структурі подвійного перетворення електричної енергії:

- випрямляч (керований або некерований);

- силовий фільтр в ланці постійного струму;
- інвертор.

ПЧ з проміжною ланкою постійного струму за характером зв'язку з живлячою мережею поділяють на два класи:

- автономні інвертори напруги (АІН);
- автономні інвертори струму (АІС).

У автономних інверторів напруги має місце залежність рівня напруги в ланці постійного струму (після фільтру) від напруги на навантаженні, тобто в загальному випадку АІН є джерелом напруги (рис. 4).

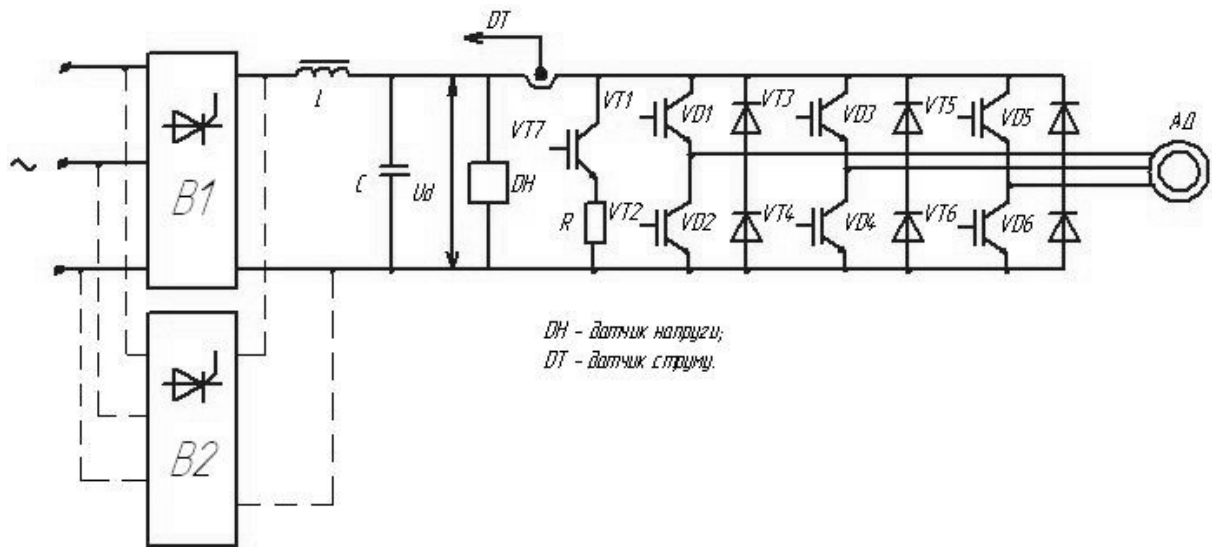


Рис. 4.16. Схема автономного інвертора напруги

Для реалізації обміну реактивною енергією між АД і ланкою постійного струму слугує конденсатор C силового фільтру, а діоди, що включені паралельно ключам, забезпечують протікання струму при поверненні реактивної енергії від АД до ємності фільтру. На виході інвертора напруга може регулюватися двома способами:

- регулюванням вихідної напруги U_d на виході керованого випрямляча B_1 , при цьому інвертор виконує функцію комутатора фаз і формувача необхідної частоти. Такий АІН є ПЧ з амплітудно-імпульсною модуляцією (АІМ), який в сучасних частотно-регульованих електроприводах практично не застосовують;

- широко-імпульсною модуляцією вихідної напруги за синусоїдальним законом (ШІМ-модуляція). В цьому випадку випрямляч B_1 (рис. 4) є некерованим.

У АІН відсутня можливість рекуперації енергії в живлячу мережу у разі переходу режиму роботи АД в генераторний.

Для реалізації рекуперації енергії в мережу може бути встановлений другий комплект керованого випрямляча B_2 (рис. 4.16), що працює як інвертор, відомий мережею. Окрім цього, для забезпечення режиму гальмування АД і зниження рівня перенапруження в колі постійного струму слугує вузол скидання енергії на зовнішній резистор R через транзисторний ключ VT_7 .

У АІС (рис. 4.17) керований випрямляч працює в режимі регулятора струму, а інвертор виконує функцію комутатора фаз, формуючи необхідну частоту. Фільтр, що складається з індуктивності L , згладжує пульсації струму. У структурі АІС існує однозначна залежність вихідного струму ланки постійного струму I_d від струму АД.

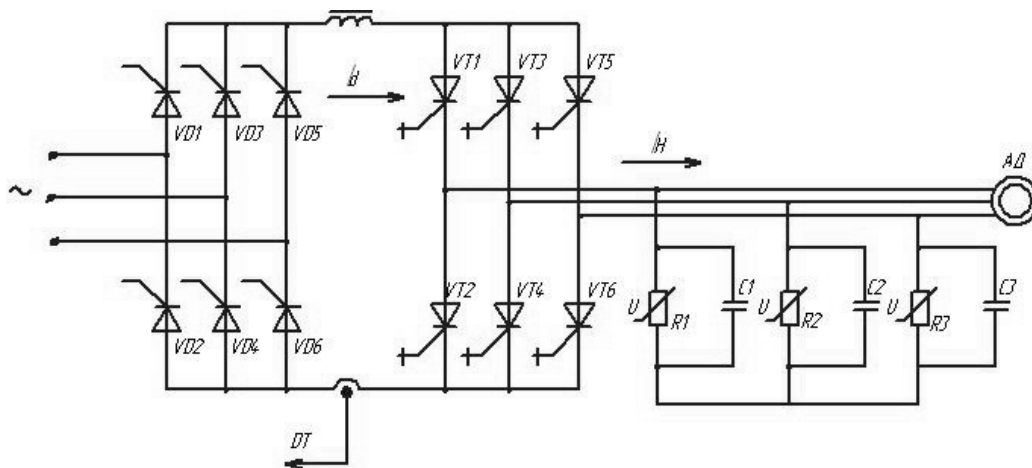


Рис. 4.17 Схема автономного інвертора струму

Варистори R_1, R_2, R_3 і конденсатори C_1, C_2, C_3 — елементи схеми обмеження комутаційних перенапружень, обумовлених ЕДС самоіндукції обмоток статора.

У структурі АІС достатньо легко здійснюється режим гальмування АД з рекуперацією енергії в мережу без зміни напрямку струму I_d в ланці постійного струму. При переході АД в генераторний режим, зміна напрямку проти-ЕРС інвертора викликає перехід останнього у випрямний режим, а випрямляч переводиться в режим роботи інвертора, відомого мережею.

4.6. Сучасний стан розвитку частотно-регульованого електроприводу

У промисловому та сільськогосподарському виробництві масово впроваджують частотно-регульовані електроприводи (ЧРЕ) змінного струму.

Високий рівень технічних характеристик ЧРЕ досягнутий завдяки інтенсивному виробництву силових модулів на базі IGBT-транзисторів, високошвидкісних процесорів обробки сигналів у реальному часі і розробці ефективних математичних моделей управління асинхронним електродвигуном.

Принцип автоматичного енергоощадного режиму електроприводу пояснює рис. 4.18.

У ЧРЕ оптимальне співвідношення U/f встановлювали при інсталяції приводу відповідно до потужності і характеру зміни навантаження на валу електродвигуна. Енергоощадного режиму досягають за рахунок постійної адаптації діапазону зміни частоти обертання і напруги на двигуні залежно від реальних характеристик навантажень.



Рис. 4.18 Діаграма енергоощадного режиму електропривода

На **рис. 4.19** приведена узагальнена структурна схема електроприводу з некерованим випрямлячем і незалежним інвертором напруги.

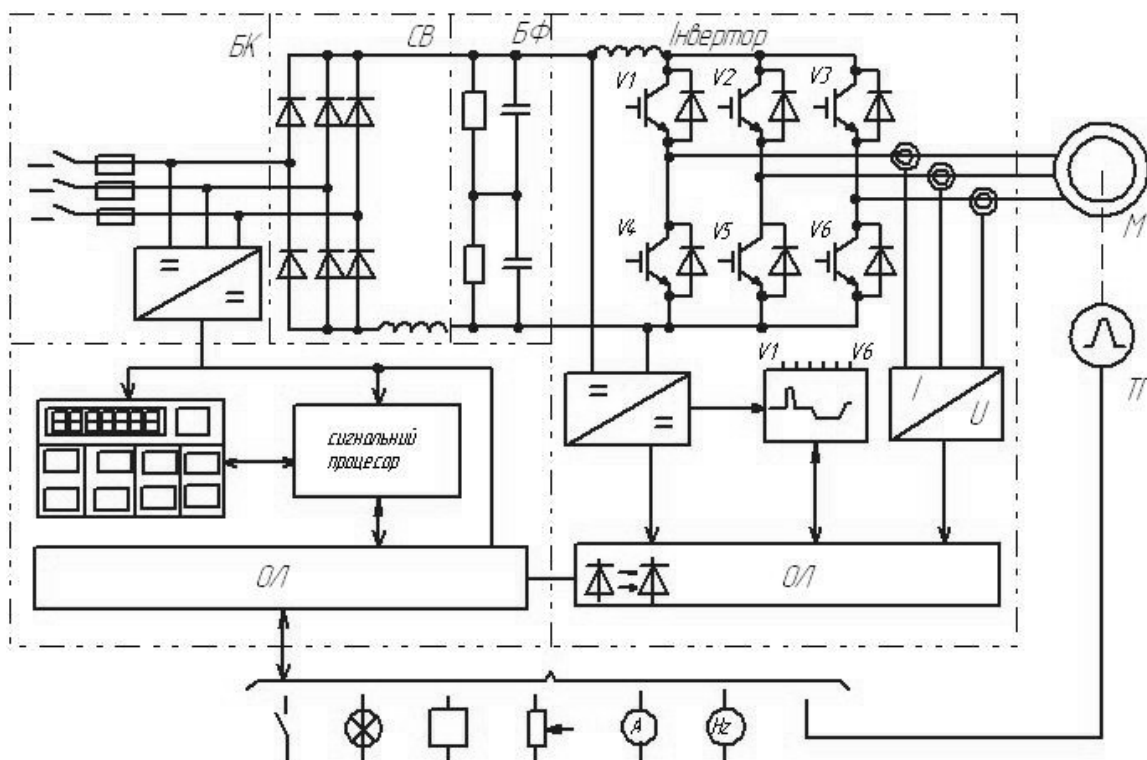


Рис. 4.19. Структурна схема частотно-регульованого електроприводу

У сучасних **регульованих** електроприводах змінного струму використовують три структури системи автоматичного регулювання (САР):

- реалізація заданої статичної залежності між частотою f і діючим значенням U_1 живлячої напруги (скалярне управління електроприводом);
- алгоритм векторного управління;
- алгоритм прямого управління моментом.

Блок-схема **скалярного** управління зображена на **рис. 4.20**.

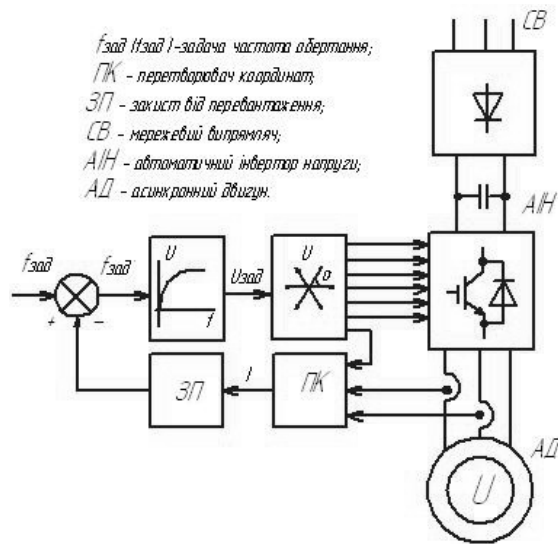


Рис. 4.20. Блок-схема скалярного керування

При регулюванні частоти f живлячої напруги потрібно забезпечити необхідну жорсткість механічних характеристик асинхронного електродвигуна у всьому діапазоні регулювання.

На **рис. 4.21** показаний бажаний вид механічних характеристик. Щоб одержати такого роду характеристики, необхідно виконати умову постійності амплітуди потоку Φ_{im} при різній вихідній частоті. Нехтуючи падінням напруги на статорі, можна записати:

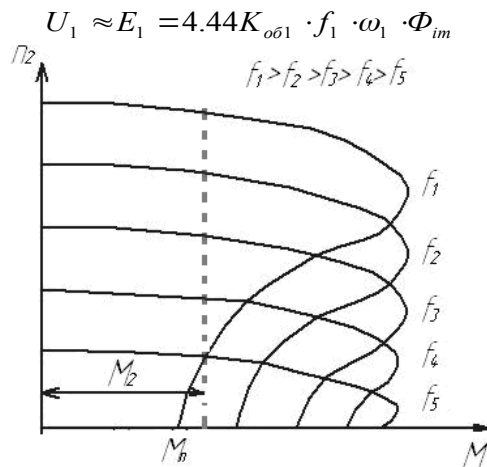


Рис. 4.21. Механічні характеристики асинхронних двигунів

Видно, що для збереження $\Phi_{im} = const$ при різних значеннях вихідної частоти інвертора необхідно регулювати її виходячи з умови:

$$\frac{U_1}{f_1} \equiv \Phi_{im} = const. \quad (4.23)$$

Регулятор швидкості підтримує частоту обертів, рівну заданій, незалежно від зміни навантаження. Регулятор моменту підтримує момент двигуна, рівний заданому, за зміни швидкості електродвигуна. Реалізація такого алгоритму можлива лише за наявності зворотного зв'язку за швидкістю (рис. 4.).

Блок-схема САР із **векторним** керуванням зображена на рис. 4.22. Таку модель використовують для регулювання частоти або моменту двигуна, а також обох параметрів почергово.

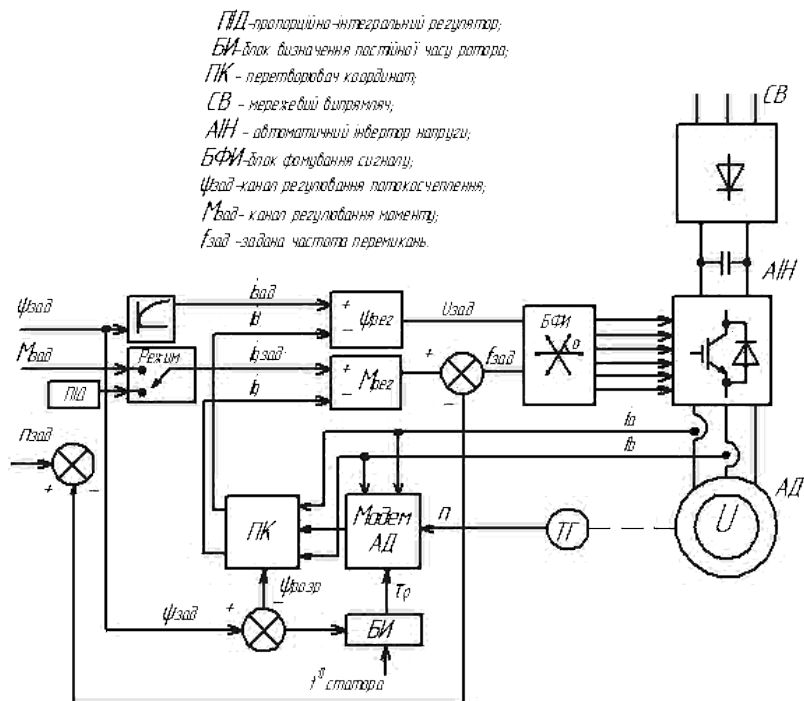


Рис. 4.22. Система автоматичного регулювання з векторним керуванням

Особливістю **векторного** керування є реалізація пуску «з ходу» при підключенні перетворювача до вже обертаючого двигуна. При цьому вимірюють струм статора i_a , i_b і оберти ротора. Отримані сигнали вводять у математичну модель двигуна (рис. 4.22).

У моделі двигуна розраховується магнітний потік і розподіл струму статора на дві складові – момент i_q і магнітний потік i_d . Складові струму можуть регулюватися окремо і незалежно – це дає можливість при збереженні потоку змінювати момент електродвигуна.

4.7. Регулювання швидкості двигунів сталого струму незалежного збудження за допомогою керованих тиристорних випрямлячів

Тиристорні випрямлячі (ТВ) можуть бути реверсивні чи нереверсивні, зібрані за нульовою чи мостовою (однофазною або трифазною) схемою. Він виконує дві функції:

- 1 – перетворення енергії змінного струму в енергію сталого струму;
- 2 – регулювання напруги живлення, яке здійснюється шляхом зміни тривалості перебування вентиля в провідному стані.

Випрямлена напруга є сталою за знаком, але пульсуючою у часі; випрямленим називається середнє значення напруги U_d за період зміни напруги живлячої мережі.

Для зменшення змінної складової випрямленого струму I_d , в коло вмикають – індуктивний фільтр (ωL).

Середнє значення напруги U_d та струму I_d визначається схемою ТВ.

За принципом дії розрізняють схеми:

1. схеми з нульовим виводом, в яких використовується лише одна півхвиля системи змінного струму;
2. мостові схеми, в яких використовуються обидві півхвилі.

4.7.1. Регулювання швидкості двигунів за допомогою однофазного тиристорного випрямляча

Нехай тиристри увімкнено за *однофазною нульовою двонапівперіодною* схемою випрямлення (рис. 4.23. а).

Схема містить узгоджувальний трансформатор з двома вторинними обмотками, 2 тиристри $VS1$ - $VS2$, згладжувальний реактор L і СІФК.

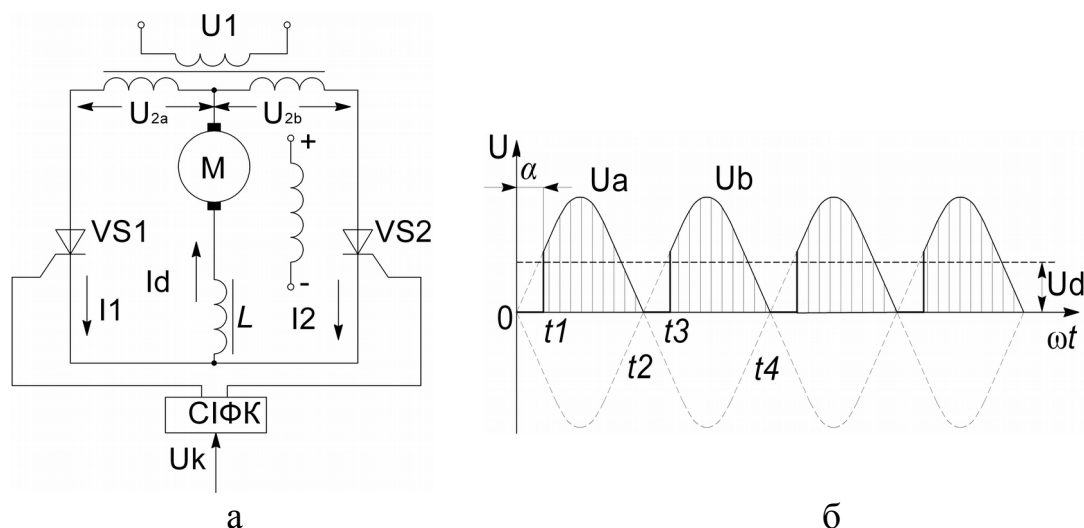


Рис. 4.23

На керуючий електрод тиристора $VS1$ подається імпульс у мить t_1 (рис. 4.23.б): отримуємо U_{2a} . В момент часу t_2 $U_{2a}=0$ і тиристор $VS1$ запирається. Протягом часу t_2 - t_3 обидва тиристри заперті і $I_d=0$. В момент t_3 починає діяти $VS2$ – отримуємо U_{2b} тощо.

U_d регулюємо змінюючи кут затримки α . Залежність середнього значення ЕРС на ДСС від α :

$$E_d = E_{2\phi} \sqrt{2} \frac{m}{\pi} \cdot \sin \left[\frac{\pi}{m} \right] \cos(\alpha) = E_{d0} \cos(\alpha),$$

де E_{d0} - ЕРС ТВ при $\alpha = 0$. $E_{2\phi}$ - діюче значення фазної ЕРС II обмотки трансформатора;

m - число фаз перетворювача ТВ.

При активному навантаженні крива випрямленого струму I_d повторює криву напруги U_d . Частота пульсацій 100 Гц.

Рівняння електромеханічної та механічної характеристик двигуна сталого струму, що живиться від ТВ:

$$\omega = \frac{E_{d0} \cos(\alpha)}{C_M \Phi} - \frac{I(R_A + R_B)}{C_M \Phi}, \quad (4.24)$$

$$\omega = \frac{E_{d0} \cos(\alpha)}{C_M \Phi} - \frac{M(R_A + R_B)}{(C_M \Phi)^2}, \quad (4.25)$$

де $R_B = \frac{X_T m}{2\pi} + R_T + R_L$ - еквівалентний опір випрямляча; X_T, R_T - зведені до II обмотки індуктивний опір розсіювання та активний опір обмотки фази трансформатора: $R_T = R_2 + R_1 \left[\frac{N_2}{N_1} \right]^2$; R_L - опір згладжувального реактора L .

Графіки електромеханічних (4.24) та механічних (4.25) характеристик двигуна сталого струму, що живиться від ТВ, зображено на рис. 4.24 (при зниженні U_d зменшується ω_0). Характеристики розташовані тільки в I і IV квадрантах внаслідок однобічної провідності ТВ.

При збільшенні α знижується швидкість ДСС за сталої жорсткості характеристик; при $\alpha = 90^\circ E_d = 0$ і двигун працює в режимі динамічного гальмування.

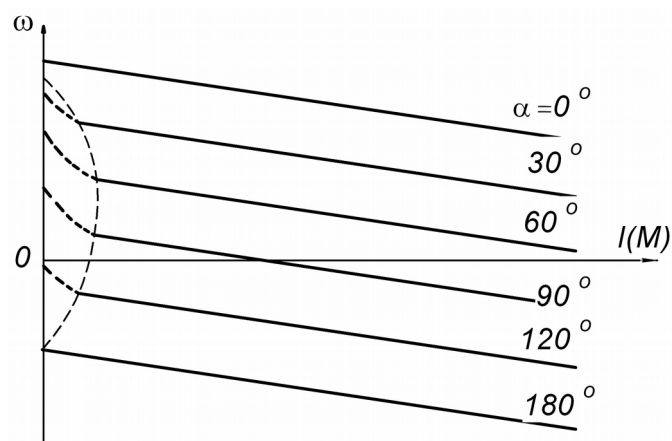


Рис. 4.24

Явище переривчастого струму (обмеженого на рис. 4.24 штриховою дугою) обумовлене тим, що при зменшенні навантаження (струму I) зменшується енергія $W_L = \frac{LI^2}{2}$, накопичена в L . Врешті ЕРС самоіндукції стає недостатньо для підтримки струму I при від'ємних наругах на анодах тиристорів. В області переривчатих струмів значно знижується жорсткість характеристик.

Пульсації випрямленої напруги $K_{пвл} = 0.25$ зменшуються при використанні багатофазних ($m > 1$) схем випрямлення.

4.7.2. Регулювання швидкості двигунів за допомогою трифазної нульової схеми

Трифазну нульову схему випрямлення (рис. 4.25.а) використовують при потужностях двигуна $P \leq 50$ кВт.

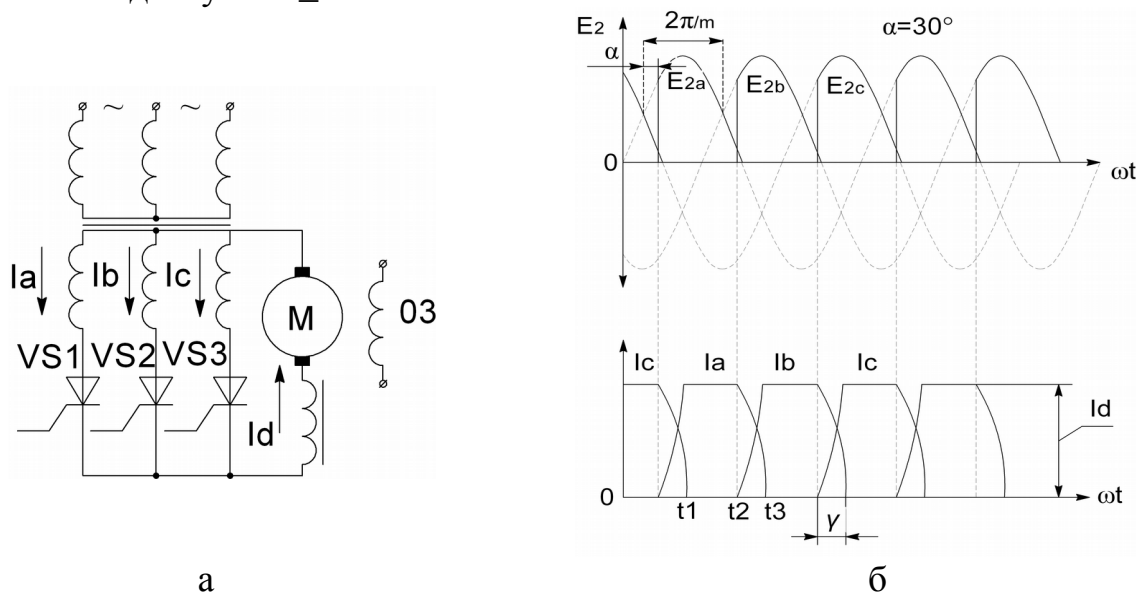


Рис. 4.25

В інтервалі t_1 - t_2 працює тиристор $VS1$. У мить t_2 починається комутація струму з $VS1$ на $VS2$. Внаслідок самоіндукції в обмотках трансформатора струм I_a спадає повільно (рис. 4.25.б), а струм I_b зростає не миттєво (кут комутації $\gamma \equiv t_3 - t_2$) протягом інтервалу працюють обидва тиристори $VS1,2$ так, що сумарний струм $I_a + I_b$ під час комутації є сталим $I_d = \text{const}$. Частота пульсацій 150 Гц.

Середнє значення випрямленої напруги з урахуванням втрат в трансформаторі та ТВ:

$$E_d = E_{d0} \cos(\alpha) - I_d \left[\frac{X_2 \cdot m}{2\pi} + R_{T2} + R_L \right] - \Delta U_B,$$

де $I_d \frac{X_2 \cdot m}{2\pi}$ - втрати напруги від перекриття тиристорів при одночасній роботі в інтервалі t_2 - t_3 .

R_{T2} - опір фази вторинної обмотки.

Для трифазної **напівперіодної** схеми ($m=3$):

$$E_{d0} = \sqrt{2} \frac{3}{\pi} \cdot \sin \left[\frac{\pi}{3} \right] E_{2\phi} = 1.17 E_{2\phi}.$$

4.7.3. Регулювання швидкості двигунів за допомогою мостових схем

Мостові схеми випрямлення використовують при потужностях двигуна $P \leq 3000$ кВт.

У мостових схемах одночасно працюють два тиристори.

а) **Однофазну мостову** схему випрямлення зображено на рис. 4.26 (число фаз випрямляча $m=2$):

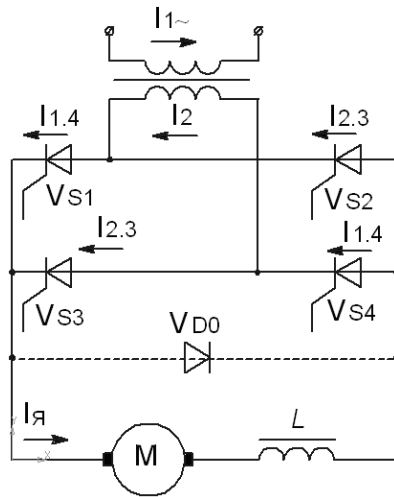


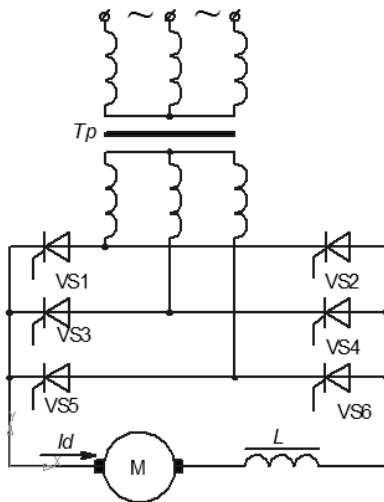
Рис. 4.26

Нульовий діод VD_0 шунтує ДСС для збільшення $\cos \varphi$ та зменшення зони переривчастих струмів (рис. 4.24).

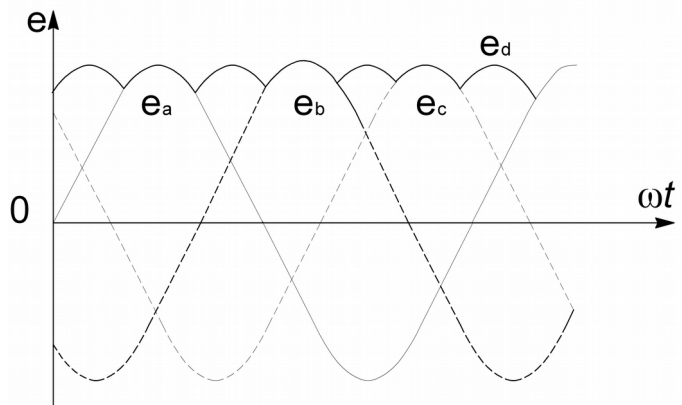
Для звуження діапазону напруг замість тиристорів $VS_{3,4}$ Треба використовувати діоди (несиметрична схема).

Недоліком однофазних мостових схем є те, що трансформатор використовується лише на 20...25 %.

б) **Трифазну мостову** схему випрямлення зображено на рис. 4.27.а (число фаз спрямляча $m=6$):



а



б

Рис. 4.27

Струм I_d проходить через дві фази трансформатора під дією відповідних лінійних ЕРС (різниці фазних $E_{\phi 0}$):

$$E_{d0} = \sqrt{2} \frac{6}{\pi} \cdot \sin \left[\frac{\pi}{6} \right] E_{2,l} = 1.35 E_{2,l} = 2.34 E_{2\phi}.$$

Перевагами трифазної мостової схеми випрямлення є:

- те, що частота пульсацій $f_{пуль} = 300 \text{ Гц}$ (рис. 4.27.б) ;
- можливість безтрансформаторного підключення при $U_d = 440 \text{ В}$ ($U_{MEP} = 380 \text{ В}$).

V. ЕФЕКТИВНЕ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ УСТАНОВКАХ

5.1. Електромеханічні споживачі

До електромеханічних споживачів належить устаткування, в якому електрична енергія перетворюється в механічну, зокрема:

- підйомно-транспортні установки циклічної дії (кранові установки, підйомники та ліфти, екскаватори тощо);
- транспортні установки безперервної дії (конвеєрні установки, транспортери, норії тощо);
- установки з переміщення рідин, борошна та газів (помпи, вентилятори, компресори);
- обробні верстати, молоти та преси;
- допоміжні механізми (затискання деталей, відчинення-зачинення шибєрів тощо).

Зазвичай робочі машини та механізми до руху приводить електричний двигун. Види електричних двигунів відрізняються за конструктивним виконанням, за принципом дії та керування ними. Найпоширенішими є асинхронні двигуни з короткозамкненим і фазним роторами, синхронні двигуни та двигуни сталого струму.

До переваг *асинхронних* короткозамкнених двигунів варто зарахувати: простоту конструкції, низьку вартість, високу надійність, відносно простий пуск, високий ККД, який зростає зі збільшенням потужності двигуна. Недоліки полягають у складності регулювання швидкості обертання, споживанні реактивної енергії, високій кратності пускового струму. Регулювання швидкості обертання може бути забезпечене використанням тиристорних чи транзисторних перетворювачів частоти (ПЧ). Асинхронні короткозамкнені двигуни застосовують у приводах верстатів, підйомників, конвеєрів, помп, вентиляторів тощо.

Асинхронні двигуни з фазним ротором дозволяють обмежити пусковий струм та забезпечують можливість регулювання швидкості обертання без ПЧ завдяки увімкненню додаткових опорів в коло ротора. Це ускладнює конструкцію двигунів внаслідок виведення кінців обмоток ротора. Але переваги під час пуску потужних двигунів (значні кратності максимальних та пускових моментів, зменшення втрати напруги в живильній мережі) та можливість управління швидкістю обертання обумовлюють переваги порівняно з короткозамкненими двигунами. Сферою застосування асинхронних двигунів з фазним ротором є потужні приводи кранів, конвеєрів, підйомників тощо.

Спільний недолік асинхронних двигунів обумовлений квадратичною залежністю обертального моменту від напруги живлення.

Крім того, асинхронні двигуни є споживачами реактивної енергії, а тому потребують додаткового встановлення пристроїв для компенсації реактивної потужності.

Натомість *синхронні* двигуни можуть працювати в режимі перезбудження як генератори реактивної потужності. До переваг синхронних двигунів можна

зарахувати високі енергетичні показники (ККД, $\cos \phi$) та стабільну швидкість обертання. Тому для можливості регулювання їх швидкості використовують, наприклад, ПЧ. Зазвичай синхронні двигуни застосовують у приводах з тривалим режимом роботи – компресорних, вентиляторних установках за практично незмінного навантаження.

Двигуни *сталого струму* потребують наявності джерел у вигляді випрямлячів або системи «двигун змінного струму-генератор сталого струму». Двигуни сталого струму мають послідовне, паралельне чи змішане збудження. У таких двигунах легко реалізується регулювання швидкості обертання, а обертальний момент не залежить від напруги живлення. Двигуни сталого струму використовують в електротранспорті, для приводу механізмів екскаваторів, спеціальних кранових та підйомних установок тощо.

Як *напругу* змінного струму використовують здебільшого низьку напругу 380 (220) В і високу напругу 10 (6) кВ. Між ними розподілено граничні потужності двигунів, які визначають за економічними показниками. Так для напруг 380 В – 10 кВ граничними є потужності 200 – 300 кВт, це означає, що за потужностей, нижчих від граничної, економічно доцільно випускати двигуни на напругу 380 В, а за потужності понад граничну – на напругу 10 кВ.

У більшості галузей промисловості *перерва в електропостачанні* потужних помпових, компресорних, вентиляційних установок пов'язана зі значним недовипуском або масовим бракуванням продукції, а в деяких випадках може спричинити аварії, небезпечні для життя людей. Наприклад, помпи водопостачання, повітродувки доменного виробництва, аварійна вентиляція хімічних виробництв належать до I (і навіть особливої) категорії за надійністю та безперебійністю електропостачання. До I категорії належать також підйомно-транспортні установки, робота яких пов'язана з переміщенням людей, а також власні потреби установок I категорії. Силкові установки, перерва електропостачання в яких впливає на недовипуск продукції і не пов'язана з непоправними наслідками, за надійністю живлення належать до споживачів II категорії. Силкові допоміжні споживачі здебільшого належать до III категорії.

Приклад силового каналу електроприводу наведено на рис. 5.1.

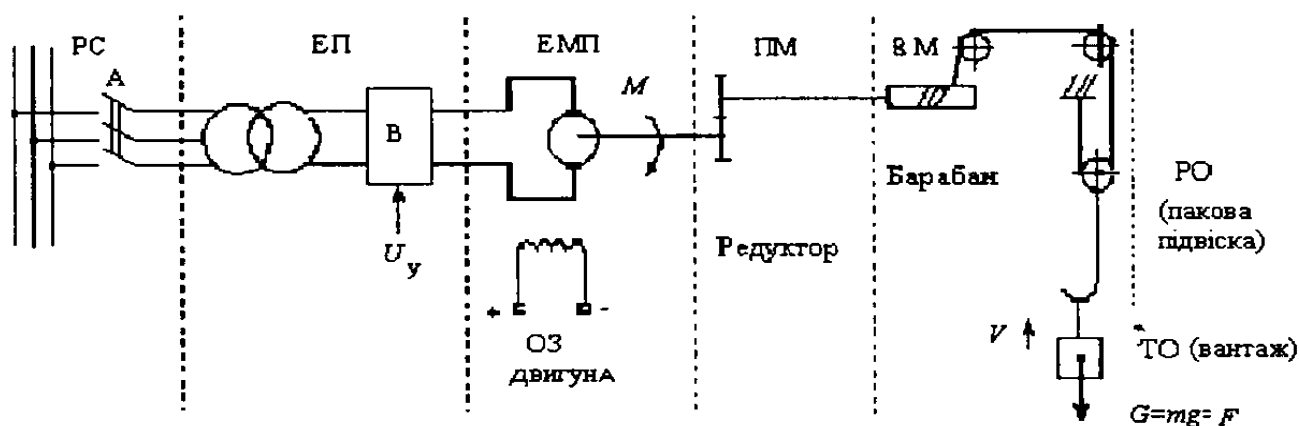


Рисунок 5.1. Приклад силового каналу електроприводу

(РС – розділювач мережі, ЕП – електричний перетворювач, ЕМП – електромеханічний перетворювач (двигун), ПМ – передавальний механізм, ВМ – виконавчий механізм, РО – робочий орган, ТО – технологічний об’єкт)

ЕП трансформує електричну енергію, що надходить на його вхід до виду, необхідного для перетворення її в механічну роботу. ЕП керує рівнями потоків енергії до ЕМП та керує параметрами споживаної та перетвореної енергії. ЕМП трансформує електричну енергію в механічну та з урахуванням параметрів механічної частини задає характер механічного руху робочого органа, електромагнітний момент M та частоту обертання ω у випадку обертального руху (силу F та лінійну швидкість V для поступального руху).

До складу силової частини належить ПМ, що зв’язує ЕМП та ВМ. Найчастіше використовується редуктор, що зменшує швидкість двигуна до рівня ВМ. ВМ, наприклад, барабан лебідки–трос–відхилювальні шківни, забезпечує остаточне узгодження швидкості підвіски (РО) зі швидкістю ТО.

Процес передавання та перетворення енергії в силовому каналі супроводжується її частковою втратою в кожному з елементів незалежно від напрямку її передавання. У підсумку втрати енергії виділяються у вигляді тепла.

Всі елементи силового каналу здатні накопичувати певну енергію залежно від типу елемента:

- на індуктивностях накопичується енергія магнітного поля;
- на ємностях – енергія електричного поля;
- на пружних елементах та піднятих над землею масах – потенційна енергія;
- на обертових елементах і масах, що рухаються лінійно, – кінетична енергія;
- у струмопровідниках – теплова енергія.

У силових електроприводах найенергоємнішими накопичувачами енергії є елементи механічної частини. Наприклад, електропривод підйому, зображений на рис. 5.1, застосований у мостовому крані.

5.2. Визначення факторів впливу на енергоефективність і технічний стан електромеханічних систем

Енергоефективність електромеханічних систем (ЕМС) з АД залежить від різноманітних чинників. Найбільш значимі фактори впливу на енергоефективність ЕМС (рис. 5.2): якість напруги живлення; режим навантаження; умови експлуатації; якість виготовлення, технічного обслуговування і ремонтів; якість активних та конструкційних матеріалів; відповідність застосування виконанню.

Відхилення напруги мережі змінює момент АД, а також реактивну потужність. Для двигуна напруга живлення не повинна бути вищою за 10% та нижчою за 5% від номінальної.

Несиметрія напруг викликає значні струми зворотної послідовності, які підвищують втрати та зменшують момент і потужність двигуна.

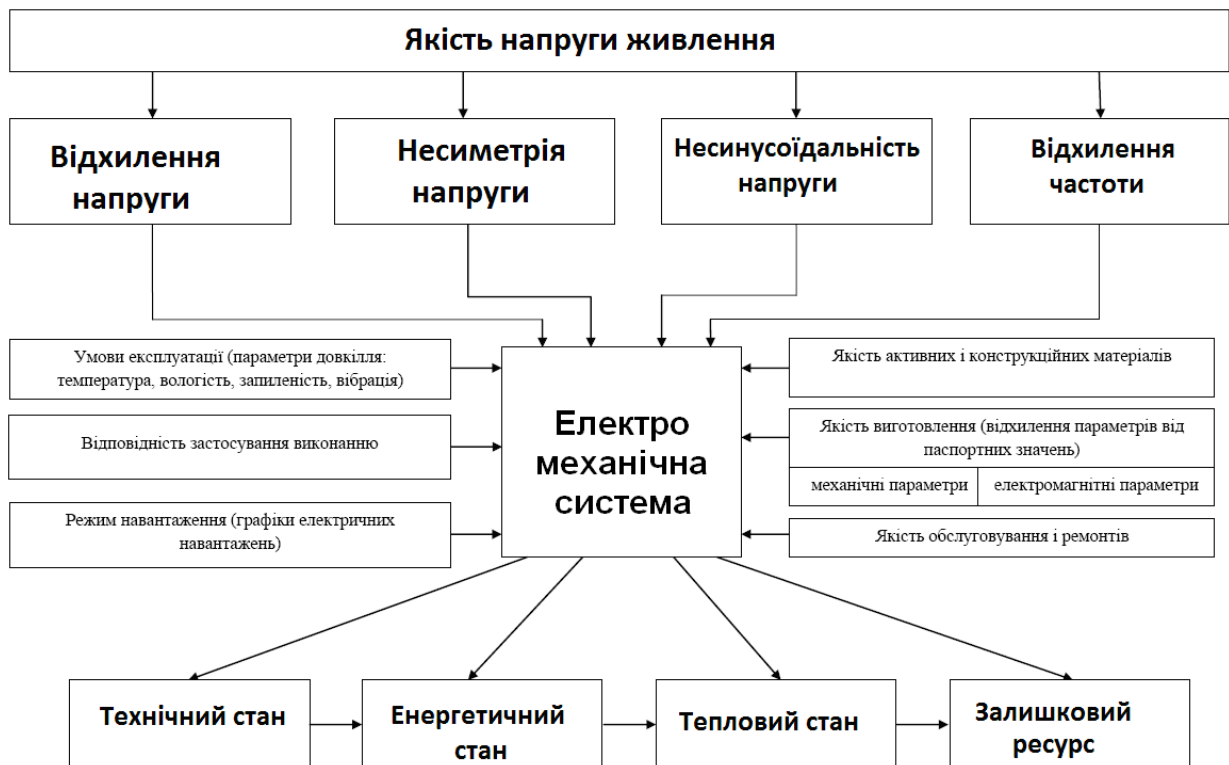


Рис. 5.2. Фактори впливу на енергоефективність та стан ЕМС

Несинусоїдальність напруги призводить до зростання опору обмоток струмам вищих гармонік, що викликає в двигуні надмірні втрати активної потужності та перегрівання.

Робота ЕМС в умовах неякісної електроенергії призводить до зниження рівня енергоефективності та працездатності устаткування.

Якість електричної енергії регламентується стандартами: Міждержавний стандарт на електроенергію ГОСТ 13109-97 “Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения”; Європейський стандарт EN50006; публікації МЭК 100-2-1, МЭК 1000-2-2 в частині рівнів електромагнітної сумісності в системах електропостачання та методів вимірювання електромагнітних завад.

За умови роботи в номінальному режимі ЕМС з АД має задовільні значення ККД та коефіцієнта потужності. У недовантаженому режимі встановлюється неефективний баланс складових потужності (зі збільшеним рівнем реактивної), що підвищує втрати в живильних мережах. В АД основну частину балансу реактивної потужності становить потужність неробочого ходу, яка може складати до 60% реактивної потужності двигуна за умови 100% завантаження.

Основним інструментом енергозаощадження на підприємствах є **енергоменеджмент**. Його основною метою є досягнення високого рівня енергоефективності виробництва, а основним завданням – забезпечення найбільш ефективного режиму роботи та складу устаткування.

5.3. Заощадження електричної енергії у двигунах

5.3.1. Впровадження енергоефективних двигунів

В енергоефективних двигунах за рахунок збільшення маси активних матеріалів (міді, сталі) та застосування високоякісної ізоляції, а також оптимізації конструкції зменшують втрати електричної енергії, що обумовлює збільшення їх ККД η на кілька відсотків [8]. Ступінь підвищення η ілюструють дані табл. 5.1, в якій наведено значення ККД для різних співвідношень втрат потужності в двигуні ΔP та потужності навантаження P_H . Розрахунок ККД двигунів виконують за формулою:

$$\eta = \frac{P_H}{P_H + \Delta P} = \frac{1}{1 + \Delta P/P_H}. \quad (5.1)$$

Таблиця 5.1 – Залежність ККД двигуна від співвідношення $\Delta P / P_H$

$\Delta P/P$	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05
η	71	74	77	80	83	87	91	95

ККД енергоефективних двигунів можна визначити за формулою:

$$\eta_{E\Phi} = \frac{\eta_{CT}}{1 - e \cdot (1 - \eta_{CT})}. \quad (5.2)$$

де e – відносне зниження сумарних втрат; η_{CT} – ККД стандартного двигуна.

Відносне зниження сумарних втрат у двигуні визначають за виразом:

$$e = \frac{\Delta P_{CT} - \Delta P_{E\Phi}}{\Delta P_{CT}}. \quad (5.3)$$

де ΔP_{CT} , $\Delta P_{E\Phi}$ – втрати потужності відповідно в стандартному та енергоефективному двигунах.

Значення річної *заощадженої* електричної енергії ΔW у разі використання енергоефективного двигуна визначають із виразу:

$$\Delta W = \left[\sum_1^n \frac{P_i}{\eta_{iCT}} - \sum_1^n \frac{P_i}{\eta_{iE\Phi}} \right] \cdot t_i, \quad (5.4)$$

де P_i – потужність двигуна на i -й ділянці роботи, кВт; η_{iCT} , $\eta_{iE\Phi}$ – ККД стандартного та енергоефективного двигуна відповідно, %; t_i – тривалість роботи двигуна з потужністю P_i , год; n – кількість ділянок роботи електропривода з різним навантаженням.

5.3.2. Заміна недовантажених електродвигунів двигунами меншої потужності

Аналізування роботи діючих електричних приводів показало, що більшість встановлених приводних двигунів значно потужніші, ніж необхідно для реалізації технологічного процесу.

Крім того, електроприводи багатьох робочих машин та виробничих механізмів частину свого робочого циклу працюють з незначними механічними

навантаженнями або в режимі неробочого ходу. До них належать електроприводи ковальсько-пресового устаткування, обробних верстатів, підйомно-транспортних механізмів тощо.

На рис. 5.3 зображено залежність ККД η та коефіцієнта потужності $\cos\varphi$ від коефіцієнта навантаження двигуна k_H , з якої видно, що двигуни в разі недовантаження працюють із незначним η та зі зниженим $\cos\varphi$. Підвищення цих показників зумовлює зниження втрат енергії в електроприводі та системі електропостачання і може бути досягнуто, наприклад, за рахунок заміни недовантажених двигунів двигунами меншої потужності.

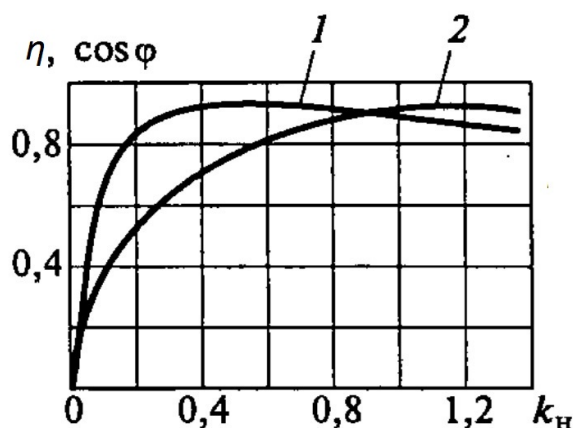


Рисунок 5.3. Залежність ККД (крива 1) та коефіцієнта потужності (крива 2) від коефіцієнта навантаження двигуна

У випадках значень коефіцієнта навантаження $k_H < 0,4$ в більшості випадків заміна недовантажених двигунів економічно доцільна, для $k_H > 0,7$ – недоцільна, а для $0,4 < k_H < 0,7$ необхідно виконати техніко-економічні розрахунки.

ККД двигуна η з відомим коефіцієнтом навантаження k_H можна розрахувати з виразу:

$$\eta = \frac{k_H \cdot P_{НОМ}}{k_H \cdot P_{НОМ} + K + k_H^2 \cdot \Delta P_{НОМ}^{\square}}$$

де $K = \Delta P_{НОМ} - \Delta P_{НОМ}^{\square}$ – втрати потужності в сталі, кВт; $\Delta P_{НОМ}$ – значення повних втрат, кВт; $\Delta P_{НОМ}^{\square}$ – значення номінальних змінних втрат, кВт.

Знайдемо умову роботи двигуна з максимальним ККД за відомим коефіцієнтом навантаження, взявши похідну $d\eta/dk_H$ та прирівнявши її до 0. Після перетворень отримаємо значення коефіцієнта навантаження, за якого ККД максимальний:

$$k_{H.ОПТ} = \sqrt{\frac{K}{\Delta P_{НОМ}^{\square}}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{НОМ} - \Delta P_{НОМ}^{\square}}{\Delta P_{НОМ}^{\square}}} \quad (5.5)$$

Значення $k_{H.ОПТ}$ для $K < \Delta P_{НОМ}^{\square}$ наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Значення $k_{H.ОПТ}$ для різних співвідношень $K/\Delta P_{НОМ}^{\square}$

$K/\Delta P_{НОМ}^{\square}$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
$k_{H.ОПТ}$	0,32	0,55	0,71	0,84	0,95

Із формули (5.5) видно, що для $K > \Delta P_{НОМ}^{\square}$ максимальний ККД можна отримати в разі навантаження, що перевищує номінальне.

5.3.3. Техніко-економічне обґрунтування ефективності використання електромеханічних систем

За експлуатаційний строк роботи насосної установки з АД 10 років основні складові витрат розподіляються таким чином: вартість електроенергії – 84%, обслуговування – 10%, первинні інвестиції – 5%, монтаж – 1%.

У випадку низького коефіцієнту потужності можливі варіанти придбання нового ЕП з високим коефіцієнтом потужності або встановлення пристроїв компенсації реактивної потужності.

Рішення про вибір одного з варіантів для конкретних умов ($P_{\phi}, \cos \varphi_{\phi}$) відповідатиме найменшому значенню вартості життєвого циклу.

5.3.4. Визначення енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами

Для комплексного оцінювання енергоефективності ЕМС з АД застосовують енергетичні критерії: енергія, яка споживається за цикл роботи, питомі витрати енергії на одиницю продукції, втрати енергії. У деяких випадках застосовують критерій максимального ККД, оптимального імпедансу тощо. Для визначення енергетичного і технічного стану ЕМС з урахуванням режиму навантаження та погіршення якості напруги живлення використовують показники енергоефективності – *коефіцієнт потужності $\cos \varphi$* та *ККД η* .

Визначення стану ЕМС з АД здійснюють порівнянням фактичних параметрів з їх еталонними значеннями. Умови визначення енергоефективної роботи ЕМС [9]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_e(k_3) - 0,15(1 - \eta_n) \leq \eta_{\phi} \leq \eta_e(k_3), \\ \cos \varphi_e(k_3) - \frac{1 - \cos \varphi_n}{6} \leq \cos \varphi_{\phi} \leq \cos \varphi_e(k_3), \\ (0,7 \dots 0,75) \leq k_{3\phi} < 0,9, \end{array} \right. \quad (5.6)$$

де $\eta_e(k_3)$, $\cos \varphi_e(k_3)$ – еталонні (паспортні) характеристики ККД та коефіцієнту потужності; $\cos \varphi_{\phi}$, η_{ϕ} – фактичні (визначені) значення ККД та коефіцієнту потужності; η_{\min} , $k_{3\min}$ – найменші значення ККД та коефіцієнту завантаження для області енергоефективної роботи.

Еталонні характеристики представлені залежностями $\eta_e(k_3)$ і $\cos \varphi_e(k_3)$, а точки з координатами $k_{3\phi}, \eta_{\phi}$ та $\cos \varphi_{\phi}, k_{3\phi}$ відповідають фактичним значенням ККД і коефіцієнту потужності (рис. 5.4). В залежності від того, до якої області потрапляє точка з координатами та $\cos \varphi_{\phi}, k_{3\phi}$, роблять висновок щодо рівня енергоефективності ЕМС.

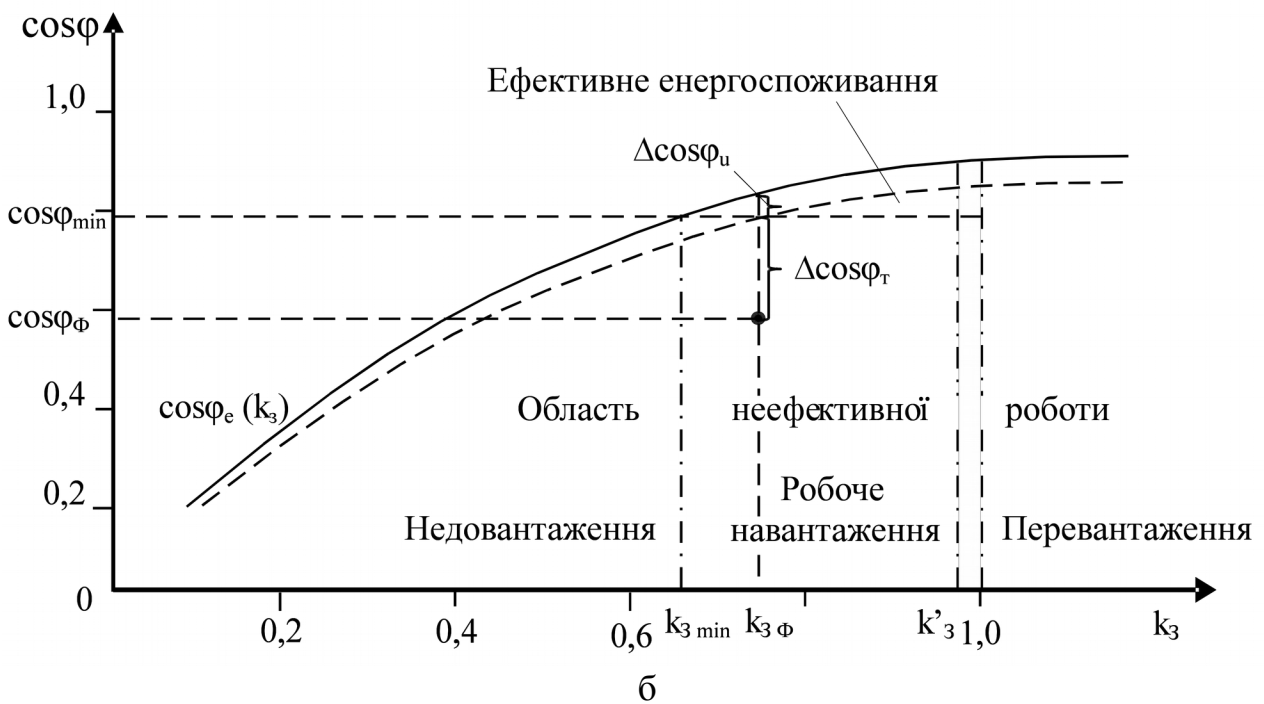
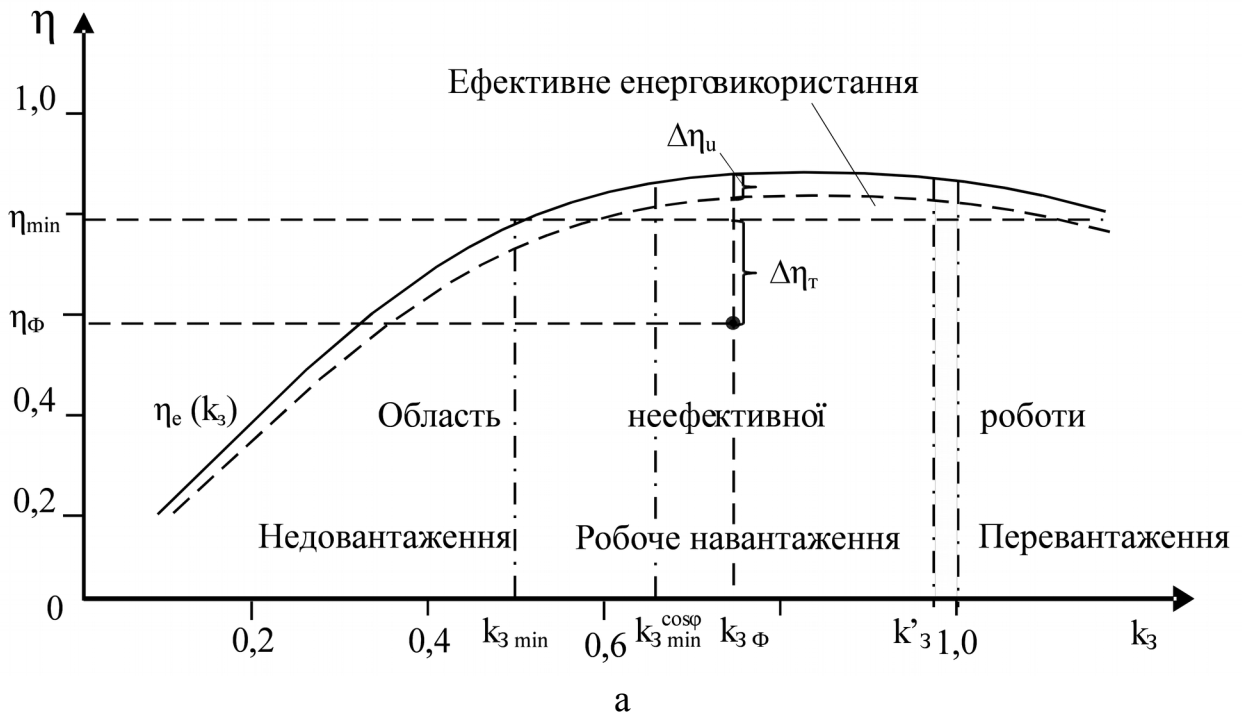


Рис. 5.4. Области ефективного енерговикористання (а) і енергоспоживання (б) ЕМС з АД

Можливі рівні енергоефективності роботи ЕМС наведено в табл. 5.3.

Таблиця 5.3. Рівні енергоефективної роботи ЕМС з АД [9]

Рівень енергоефективності	Області роботи		Висновки
	η	k_3	
Високий	$\eta_\phi \geq \eta_{\min}$	$k_{3\min} \leq k_{3\phi} \leq k'_{31,0}$	Ефективне енерговикористання

Низький	Недовантаження	$\eta' \leq \eta_\phi \leq \eta_\epsilon$	$k_{3\phi} < k_{3\min}$	Низька якість електроенергії
		$\eta_\phi < \eta'$		Незадовільний технічний стан ЕМС
	Робоче навантаження	$\eta_\phi < \eta_{\min}$	$k_{3\min} \leq k_{3\phi} \leq k'_{3\phi}$	Незадовільний технічний стан АД
	Перевантаження	$\eta' \leq \eta_\phi \leq \eta_\epsilon$	$k_{3\phi} > k'_{3\phi}$	Низька якість електроенергії
$\eta_\phi < \eta'$		Незадовільний технічний стан ЕМС		

Використовуючи залежність $\cos \varphi_e(k_3)$, можна отримати подібну таблицю також для процесу енергоспоживання.

5.3.5. Заощадження електричної енергії за рахунок перемикання обмоток статора за схемою «трикутник-зірка»

Достатньо ефективним способом заощадження електричної енергії в асинхронних двигунах є зниження напруги, що підводять до двигуна в режимах незначних навантажень або ж у режимі неробочого ходу. У такому випадку відбувається зменшення споживаної реактивної потужності, що обумовлює зменшення втрат в системі електропостачання електропривода.

У разі зниження напруги обмотки двигуна перемикають на схему «зірка» (Y). До обмоток підводиться знижена в $\sqrt{3}$ напруга, за рахунок чого знижують струм намагнічування, реактивну потужність та сумарні втрати в двигуні та в системі електропостачання.

Визначимо зниження реактивної потужності $\Delta Q_{\Delta-Y}$ у разі перемикання обмоток статора зі схеми «трикутник» на схему «зірка»:

$$\Delta Q_{\Delta-Y} = Q_{\Delta} - \Delta Q_Y = 2 \cdot Q_0 / 3 - 2 \cdot k_H^2 \cdot \Delta Q_{НОМ}, \quad (5.7)$$

а також зниження втрат активної потужності $\Delta(\Delta P_{\Delta-Y})$ у разі перемикання обмоток:

$$\Delta(\Delta P_{\Delta-Y}) = \Delta P_{\Delta} - \Delta P_Y = 2 \cdot \Delta P_0 / 3 - 2 \cdot k_H^2 \cdot \Delta P_{НОМ}. \quad (5.8)$$

Аналізування співвідношення (5.7) у випадку найімовірніших значень $Q_0 = (0,60 \dots 0,75) \cdot Q_{НОМ}$ показує, що за коефіцієнта навантаження $k_H < 0,7$ реактивна потужність у схемі з'єднання «зірка» завжди менша, ніж для схеми «трикутник». Аналізування співвідношення (5.8) за найімовірнішого співвідношення $\Delta P_0 \approx (0,30 \dots 0,35) \cdot \Delta P_{НОМ}$ показує, що зменшення втрат у двигуні в разі переходу на схему «зірка» відбуватиметься, починаючи із значень коефіцієнта навантаження двигуна $k_H < 0,4$.

Далі наведено дані, що дозволяють оцінити зміну ККД (табл. 5.4) та $\cos \varphi$ (табл. 5.5) у разі перемикання обмоток для різних значень k_H .

Таблиця 5.4 – Співвідношення ККД для варіантів з'єднання обмоток

k_H	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
-------	-----	-----	-----	-----	-----

η_Y/η_Δ	1,27	1,1	1,04	1,01	1,0
----------------------	------	-----	------	------	-----

Таблиця 5.5 – Співвідношення $\cos\varphi_Y/\cos\varphi_\Delta$ для варіантів схем з'єднання обмоток статора за різних значень k_H та $\cos\varphi$

$\cos\varphi_{НОМ}$	k_H				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,78	1,94	1,80	1,64	1,49	1,35
0,80	1,86	1,73	1,58	1,43	1,30
0,82	1,78	1,67	1,52	1,37	1,26
0,84	1,72	1,61	1,46	1,32	1,22
0,86	1,66	1,55	1,41	1,27	1,18
0,88	1,60	1,49	1,35	1,22	1,14
0,90	1,57	1,43	1,29	1,17	1,10
0,92	1,50	1,36	1,23	1,11	1,06

Аналізування даних табл. 5.4 та табл. 5.5 показує, що у випадках, коли $k_H < 0,5$ ККД та $\cos\varphi$ в схемі «зірка» вищі, ніж у схемі «трикутник». Тобто перемикання за таких навантажень обмоток статора зі схеми «трикутник» на схему «зірка» забезпечує ефект енергоощадження.

Однак у разі увімкнення обмоток статора за схемою «зірка» двигун за умовою нагрівання не може бути навантажений понад 60 %.

5.3.6. Впровадження автоматичних обмежувачів неробочого ходу двигунів

У разі відсутності навантаження асинхронний двигун споживає з мережі реактивну потужність, що обумовлює додаткові втрати як у двигуні, так і в елементах системи електропостачання. У зв'язку із цим для створення енергоефективного режиму роботи можна відімкнути двигун від мережі на період його роботи в режимі неробочого ходу.

Основним аргументом для прийняття такого рішення є порівняння втрат електричної енергії за період роботи двигуна в режимі неробочого ходу з втратами енергії, які будуть мати місце у разі виконання операції увімкнення двигуна в роботу. Якщо втрати енергії під час пуску двигуна менші, ніж втрати енергії впродовж режиму неробочого ходу, то вимкнення забезпечить енергоефективну роботу електропривода, і навпаки.

Отримаємо вираз для визначення граничної тривалості неробочого ходу, у разі перевищення якого вимкнення двигуна виявиться доцільним з погляду енергоефективності.

Рівність втрат енергії для режиму неробочого ходу (НХ) та під час пуску можна подати як:

$$K \cdot t_{НХ} = K \cdot t_{ПВСК} + J_{ЗВ} \cdot \omega_0^2 \cdot (1 + R_1/R_2) \cdot k_H / 2, \quad (5.9)$$

де K – постійні втрати потужності у двигуні; $t_{НХ}$ – гранична тривалість роботи двигуна в режимі неробочого ходу; $t_{ПВСК}$ – тривалість пуску двигуна в режимі

неробочого ходу; $J_{ЗВ}$ – зведений до вала двигуна сумарний момент інерції електропривода, $J_{ЗВ} = J_{\Sigma}$; k_H – коефіцієнт, що враховує навантаження двигуна для розрахунку втрат енергії під час пуску, $k_H = M_{CP} / (M_{CP} - M_{HX})$.

Використання обмежувачів неробочого ходу на верстатах з міжопераційним часом (тривалість неробочого ходу) понад 10 с завжди дозволяє заощадити електричну енергію.

Діаграма на рис. 5.5 дозволяє визначити показник рівня енергоефективності, якого досягають впровадженням обмежувачів неробочого ходу, і встановити економічну доцільність їх використання.

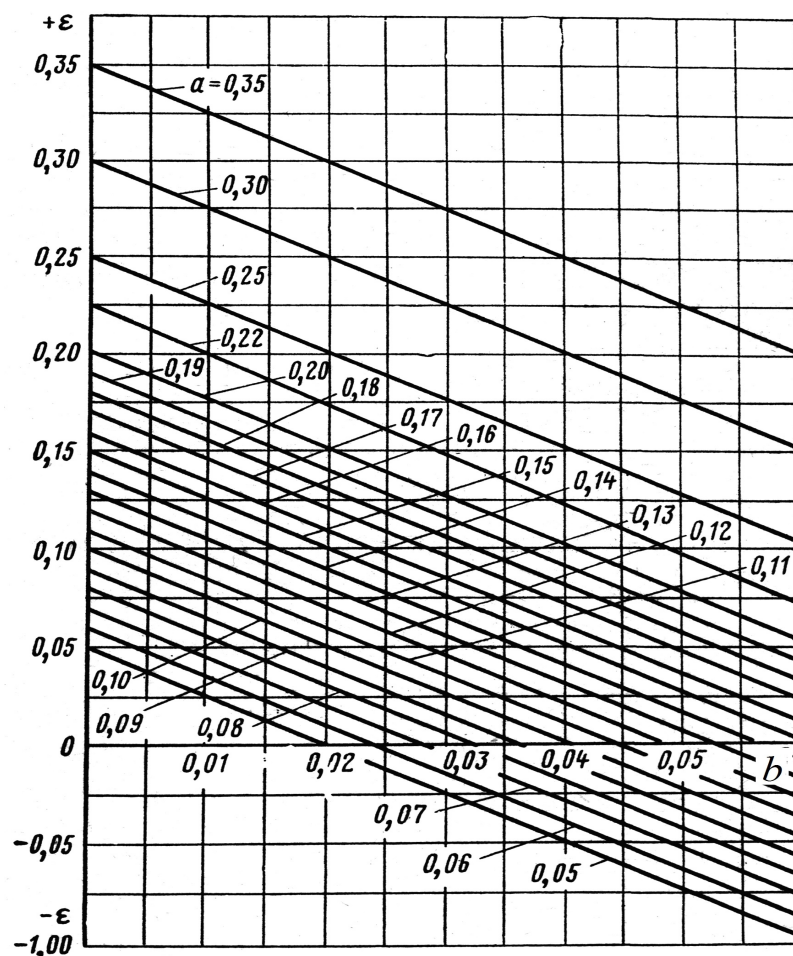


Рисунок 5.5 – Діаграма визначення показника рівня ефективності обмежувачів неробочого ходу

Очікуване заощадження електричної енергії, кВт·год/год, за використання обмежувачів неробочого ходу визначають за [10]:

$$\Delta W = \varepsilon \cdot z \cdot P_H \cdot \frac{T_H}{3600}, \quad (5.10)$$

де ε – показник рівня енергоефективності, який визначають за діаграмою (рис. 5.5) в функції коефіцієнтів a і b , $a = \frac{P_0}{P_H}$, $b = \frac{1}{4 \cdot T_H}$; z – кількість циклів за

годину, цикл/год, P_H – номінальна потужність, кВт; P_0 – потужність неробочого ходу, кВт; T_H – середня тривалість неробочого ходу, с.

5.3.7. Енергозаощаджуючі режими роботи асинхронних двигунів

Оскільки електропривод споживає понад 60% виробленої електроенергії, то саме тут є величезні резерви енергозаощадження. Тому необхідні зручні та достовірні критерії оцінки енергетичної ефективності електроприводу, що дозволяють розкрити резерви енергозаощадження [5, 8, 9].

Мірою корисного використання енергії є ККД електроприводу:

$$\eta = P_{po} / P_c,$$

де P_{po} - корисна потужність, яка витрачається на рух робочого органу; P_c - потужність, споживана електроприводом.

У практичних розрахунках відомі ККД перетворювачів електричної енергії, двигунів і механічних передач. Тому ККД електроприводу зручно подати у вигляді:

$$\eta_{en} = \eta_{np} \eta_{dv} \eta_{mex} = \frac{P_{np}}{P_c} \cdot \frac{P_{v.dv}}{P_{nep}} \cdot \frac{P_{po}}{P_{v.dv}},$$

де η_{np} , η_{dv} , η_{mex} - ККД перетворювача, двигуна і механічних передач; P_{np} - електрична потужність на виході перетворювача (вході двигуна); $P_{v.dv}$ - механічна потужність на валу двигуна.

Кожна із складових ККД є змінною величиною, що залежить від навантаження, кутової швидкості та низки інших факторів.

У відповідності до енергетичного балансу АД структура витрат електроенергії при його роботі містить:

- витрати на нагрів дротів обмотки статора – $\Delta P_{мс}$;
- витрати у статорі на гістерезис та вихрові струми – $\Delta P_{ск}$;
- витрати на нагрів обмотки ротора – $\Delta P_{мр}$;
- витрати в осерді ротора на перемагнічування та вихрові струми – $\Delta P_{ср}$.

Метою реалізації енергозаощаджуючих режимів роботи АД є зниження споживаємої з мережі активної потужності, частиною якої є наведені вище витрати електроенергії, без зміни технологічного режиму роботи. Аналіз енерговикористання АД показує, що рівень витрат електроенергії залежить від режиму споживання активної потужності.

У разі роботи в **режимі S1** допускають випадки значного зниження навантаження на валу на великий період часу (від десятків хвилин до кількох годин). Для зниження питомої потужності і збільшення $\cos\phi$ доцільно симетрично знизити напругу на статорі АД за допомогою симістерного перетворювача напруги (ПН) (рис. 5.6).

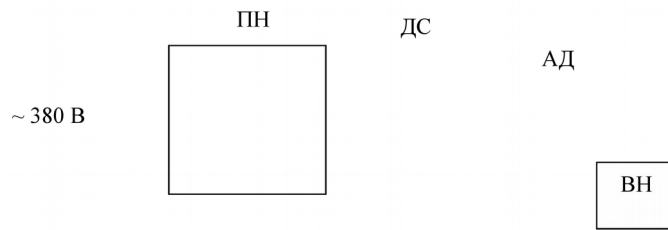


Рис. 5.6. Регулювання напруги за допомогою симістерного перетворювача

Рівень зниження напруги залежить від ступеня й тривалості скидання навантаження та визначають із принципу збереження обертаючого моменту, достатнього для підтримки такої частоти обертання, за якої гальмівне S_d не перевищує критичне S_k : $S_d \leq S_k$. Контроль за рівнем статичного моменту навантаження встановлюють за допомогою визначника навантаження (ВН на рис. 5.6) із змінною уставкою на знижену напругу.

Можливим є зниження енергоспоживання при довготривалому скиді навантаження за рахунок підключення АД до однієї з трьох фаз мережі по команді від ВН (рис. 5.7); К1, К2, К3, К4 – елементи схеми комутації.

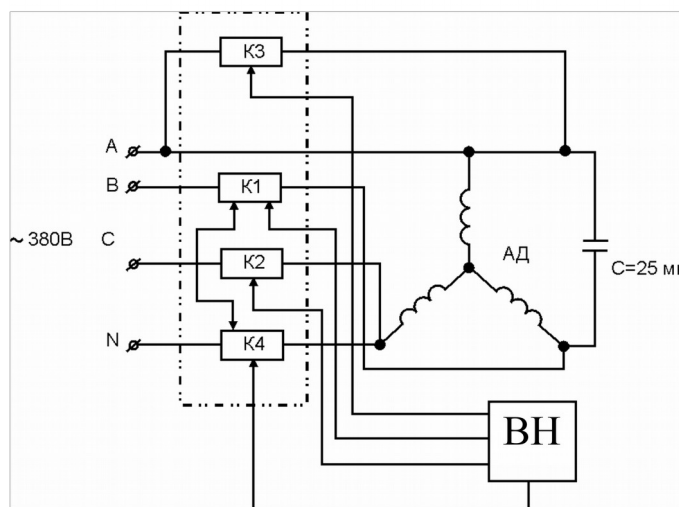


Рис. 5.7. Схема керування і комутації АД

Визначення фазозсувної ємності C і схеми вмикання фаз АД в однофазну мережу здійснюють з умови мінімуму еліптичності основного поля і повної відсутності зворотного поля.

Надійним технічним рішенням є електронні пускачі ПЕ-002 і ПЕ-004, що випускають в Україні, які дозволяють проводити запуск трифазного АД від однофазної мережі, — без використання неполярних конденсаторів; оскільки вбудований перетворювач фаз здійснює «індуктивний» і «ємнісний» зсув для будь-яких двох фаз. Початковий пусковий момент можна регулювати до найбільшого за повної відсутності зворотного поля й мінімумі еліптичності.

Оригінальним є рішення, яке вигідно замінює попередній варіант підключення АД до однофазної мережі (рис. 5.8).

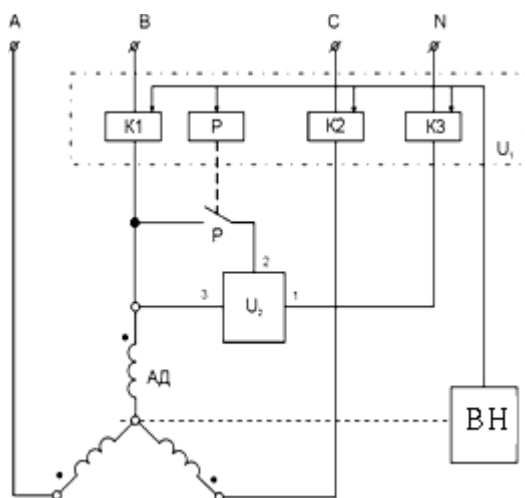


Рис. 5.8 Схема керування і комутації АД

У схемі використовують одноканалний перетворювач фаз ПЕ-001 (ПЕ-003), блок безконтактних комутаторів струму (К1 К2, К3) з релейним виходом P . При тривалому розвантаженні АД, по команді з визначника навантаження, відключаються К1, К2, включається К3 на час неробочого ходу і реле P на 4...5 с для запуску перетворювача фаз U_2 .

Робота АД в **режимах S2—S8** супроводжується перехідними процесами, що викликають значні втрати електроенергії. Проведемо оцінку втрат електроенергії і часу перехідного процесу електроприводу з АД як в режимі неробочого ходу (привод розвантажений), так і при постійному навантаженні на валу ($M_H = \text{const}$).

Втрати енергії ΔW_0 при пуску і динамічному гальмуванні в режимі неробочого ходу:

$$\Delta W_0 = (1 + R_1/R'_2) J_1 \cdot \omega_0^2 / 2, \quad (5.11)$$

де R_1, R'_2 — активні опори обмоток статора і ротора (зведені);

J_1 — момент інерції електроприводу;

ω_0 — синхронна кутова швидкість.

Час перехідного процесу $t_{\text{ПП}}$ при пуску і гальмуванні як при $M_H = 0$, так і при $M_H = \text{const}$ визначають за виразом:

$$t_{\text{ПП}} = J_1 \cdot \omega_0 / M_{\text{П}} = J_1 \cdot \omega_0 / M_{\text{Г}}, \quad (5.12)$$

де $M_{\text{П}}, M_{\text{Г}}$ — середні пусковий і гальмівний моменти.

Втрати енергії в перехідних режимах при $M_H = \text{const}$ і при максимально допустимому електромагнітному моменті $M_{\text{ЕМ}}$ можна визначити:

$$\text{— при пуску} \quad \Delta W_{\text{П}} = \Delta W_0 [M_{\text{ЕМ}} / (M_{\text{ЕМ}} - M_H)] = M_{\text{ЕМ}} / M_{\text{ДП}}, \quad (5.13)$$

$$\text{— при гальмуванні} \quad \Delta W_{\text{Г}} = \Delta W_0 [M_{\text{ЕМ}} / (M_{\text{ЕМ}} + M_H)] = M_{\text{ЕМ}} / M_{\text{ДГ}}, \quad (5.14)$$

де $M_{\text{ДП}} = M_{\text{ЕМ}} - M_H$ — динамічний момент при пуску;

$M_{\text{ДГ}} = M_{\text{ЕМ}} + M_H$ — динамічний момент при гальмуванні.

Сумарні втрати за час пуску і гальмування:

$$\Delta W \approx 2 \Delta W_0 M_{\text{ЕМ}}^2 / (M_{\text{ЕМ}}^2 - M_H^2), \quad (5.15)$$

де ΔW_0 – втрати енергії при розвантаженому приводі.

Знизити втрати ΔW_0 , ΔW_{Π} і ΔW_{Γ} можна шляхом використання спеціальних електродвигунів, що мають оптимальні значення критичного ковзання для пускогальмівних режимів. Наприклад, для зменшення часу перехідного процесу і втрат енергії використовують електродвигуни з підвищеним ковзанням:

- при пуску $S_K \approx S_{K, \text{опт}} \approx 0,41$;
- при гальмуванні противмиканням $S_K \approx S_{K, \text{опт}} \approx 1,48$;
- за наявності реверсу $S_K \approx S_{K, \text{опт}} \approx 0,74$.

АД використовують у промисловості, сільському господарстві і в побутовій техніці, і споживають понад 60 % електроенергії, що виробляється. Тому зниження електроспоживання АД є актуальним.

Основними параметрами робочого режиму АД є:

1. Споживана комплексна потужність:

$$S_1 = P_1 + j \cdot Q_1 = 3U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 + j \cdot 3U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1$$

де P_1 , Q_1 — активна і реактивна складові.

Активна потужність P_1 відображує середню потужність необоротного перетворення в АД електроенергії з мережі. Реактивна потужність Q_1 визначає потужність енергетичного обміну між мережею і працюючим АД.

2. Споживаний лінійний струм:

$$I_1 = \frac{P_2}{U_1 \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3}}$$

де P_2 — корисна потужність на валу АД, кВт; U_1 — напруга мережі, В; η — коефіцієнт корисної дії %; $\cos \varphi$ — коефіцієнт потужності.

3. Коефіцієнт корисної дії η виражає відношення:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_2},$$

де ΣP — сумарні втрати в АД.

4. Ковзання S :

$$S = \frac{\omega_0 - \omega_p}{\omega_0} = \frac{n_1 - n}{n_1},$$

де n_1 , n — частоти обертання магнітного поля і ротора.

5. Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$, що визначає співвідношення між активною і реактивною потужностями:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}$$

З виразів (Error: Reference source not found) і (Error: Reference source not found) видно, що показниками енергоефективності АД є параметри η і $\cos \varphi$.

За показник енергоефективності можна прийняти відносне зниження сумарних втрат асинхронного електродвигуна з підвищеним ККД (ΣP_E) в порівнянні з попередніми сумарними втратами (ΣP):

$$E = \frac{\Sigma P - \Sigma P_E}{\Sigma P}$$

За показником E ККД економічнішого електродвигуна визначають як:

$$\eta_E = \frac{\eta}{1 - E(1 - \eta)},$$

де: η — ККД раніше вживаного електродвигуна.

Зниження електроспоживання може бути досягнуто впровадженням енергозаощаджуючих режимів асинхронних двигунів за умов:

- контролю використаної потужності та лінійного струму;
- контролю температури обмоток;
- виміру навантаження на валу;
- оптимізації режимів роботи, пуску та гальмування;
- засобів перемикання обмоток двигунів;
- контролю зони ефективної роботи електродвигуна;
- оптимізації поєднання параметрів робочого режиму: потужності, лінійного струму, ковзання.

5.4. Заощадження електричної енергії в помпових установках

Потужність промислових pomp міститься в межах від одиниць кіловат до декількох десятків мегават. Потужність електродвигуна помпи, кВт:

$$P = \frac{k \cdot Q \cdot H \cdot \gamma}{3600 \cdot 102 \cdot \eta_H \cdot \eta_P}, \quad (5.16)$$

де Q – продуктивність помпи, м³/год; k – коефіцієнт запасу потужності електродвигуна (для $Q \leq 100$ м³/год $k = 1,2 \div 1,3$; для $Q > 100$ м³/год $k = 1,1 \div 1,5$); H – повний напір з урахуванням висоти всмоктування, м вод. ст.; η_H – ККД помпи, %; η_P – ККД передачі, %; γ – густина рідини, кг/м³.

Питоме споживання електричної енергії помпою, кВт·год/м³:

$$w = \frac{H \cdot 1000}{3600 \cdot 102 \cdot \eta_H \cdot \eta_P} = 0,00272 \cdot \frac{H}{\eta_H \cdot \eta_P}, \quad (5.17)$$

де H – дійсний напір, який розвивається помпою за заданого режиму, м вод. ст.; η_H, η_P – ККД електродвигуна та помпи за заданого режиму.

Відцентрові помпи. Втрати потужності помпи поділяються на гідравлічні, об'ємні та механічні.

Гідравлічні втрати становлять:

– втрати напору внаслідок тертя рідини в каналах робочого колеса, напрямному апараті та в спіральному кожусі;

– втрати, пов'язані з перетворенням кінетичної енергії (швидкісного напору) у потенціальну в напрямному апараті та в спіралі, а також втрат на поворотах, у переходах від одного рівня до іншого тощо.

Втрата потужності за рахунок гідравлічних втрат пропорційна кубу продуктивності, кВт:

$$\Delta P_{Г.В} = f(Q^3).$$

Об'ємні втрати (втрати витоку) визначаються об'ємним витоком рідини через повітряні проміжки між робочим колесом та ущільненими кільцями.

Механічні втрати становлять втрати на тертя диска робочого колеса, втрати на тертя в сальниках, підшипниках.

Загальний ККД помпи визначається цими втратами і залежить як від стану помпи, так і від його режиму роботи. Зазвичай ККД відцентрової помпи становить: для низького напору 0,4 – 0,7; середнього та високого напору 0,6 – 0,8. Для помп нових конструкцій ККД становить 0,9.

Поршневі помпи. Значення ККД поршневих помп коливається від 0,6 до 0,9 залежно від розмірів, стану помпи й типу передачі.

Зниження витрати електричної енергії на помпових установках досягають за рахунок таких заходів: збільшення ККД помп; покращення завантаження помп та вдосконалення регулювання їх роботи; зменшення опору трубопроводів; зменшення витрат і втрат води.

5.4.1. Підвищення коефіцієнта корисної дії помп

Заощаджену електричну енергію у випадку заміни застарілих малопродуктивних помп помпами з вищим ККД знаходять за виразом, кВт·год/рік:

$$\Delta W = 0,00272 \cdot \frac{H}{\eta_D} \cdot \frac{1}{\eta_{H_{\text{нов}}} - \eta_{H_{\text{стар}}}} \cdot Q \cdot T, \quad (5.18)$$

де H – напір, м вод. ст.; Q – продуктивність помпи, м³/год; T – річна тривалість роботи, год/рік; η_D – ККД електродвигуна; $\eta_{H_{\text{нов}}}$, $\eta_{H_{\text{стар}}}$ – ККД нової та старої помп.

5.4.2. Вдосконалення регулювання роботи помп

Подача помпи регулюється трьома способами:

- дроселюванням за допомогою клапанів;
- переривистим регулюванням (пуск-запинка);
- регулюванням частоти обертів за допомогою ПЧ.

ККД переривистого регулювання рідко буває задовільним, а часті пуски викликають додаткові втрати електроенергії. Регулювання шляхом дроселювання зводиться до зменшення потоку рідини в трубопроводі, що призведе до додаткових затрат енергії, так як насос постійно повинен долати протитиск, що створюється клапаном. Потужність, споживану помпою знаходимо за формулою:

$$P = \frac{QH\rho g}{\eta}, \text{ кВт} \quad (5.19)$$

де Q - подача, м³/с; H - напір, м; ρ - густина рідини, середовища, кг/м³; g - прискорення вільного падіння, м/с²; η - ККД помпи.

З виразу (5.19) виходить, що потужність P знаходиться в прямій залежності від добутку подачі на напір. Споживана потужність при регулюванні частоти обертів менше половини потужності, споживаної при регулюванні дросельними клапанами (рис. 5.9).

Вочевидь, що найменшою питомою витратою електроенергії буде за максимальної продуктивності помпи, яка безпосередньо залежить від характеристики системи водопостачання.

Помпи працюють у змінному режимі залежно від режиму споживання води. Зміну режиму роботи помпи здійснюють:; кількістю працюючих помп; швидкістю обертання електродвигуна.

Аналізування способів регулювання дає можливість зробити такі висновки:

– у випадку регулювання засувкою (шибером) із зменшенням витрати води ККД помпи зменшується, а значення напору збільшується. Відповідно із зменшенням витрати води питоме електроспоживання різко зростає;

– у разі регулювання зміною кількості працюючих помп ККД двигуна та помпи залишаються незмінними. Напір внаслідок зменшення витрати й втрат знижується; питоме споживання електричної енергії також зменшиться;

– у разі регулювання швидкості обертання вала помпи із зменшенням питомого електроспоживання ККД помпи та електродвигуна знижуються, напір також зменшується. Питоме споживання електричної енергії змінюються несуттєво.

Найекономічнішим способом регулювання є зміна кількості працюючих помп, надалі – регулювання швидкості обертання вала двигуна помпи. Тому, у системах з постійною витратою раціонально регулювати роботу помп зміною кількості працюючих помп, натомість, у випадку різкозмінних витрат раціональнішим буде регулювання зміною швидкості обертання валу електродвигуна.

Використання шиберів для регулювання допускається тільки для невеликих помп, а також, коли регулювання проводять упродовж невеликої кількості годин на рік.

Зменшити питоме електроспоживання на подавання води також вдається ліквідацією в системі трубопроводів зайвої запірної-регулювальної арматури та поворотів або зниження їх опору згладжуванням гострих кутів.

5.4.3. Впровадження енергоефективного частотно-регульованого електропривода помп

Помпи, як правило, працюють на мережу з протитиском, причому статичний напір у мережі становить не менше 20 % від повного напору. Наявні системи водопостачання з нерегульованим електроприводом не забезпечують зниження споживаної потужності зі зменшенням витрати води, а також обумовлюють істотне зростання тиску (напору) в системі, що призводить до витікання води й несприятливо позначається на роботі технологічного устаткування й мереж водопостачання.

Проілюструємо енергетичну та технологічну неефективність дросельного регулювання (тобто неповного відкриття засувки на напірному трубопроводі) подавання води помпою,. Потужність, споживану помпою, визначають за (5.19).

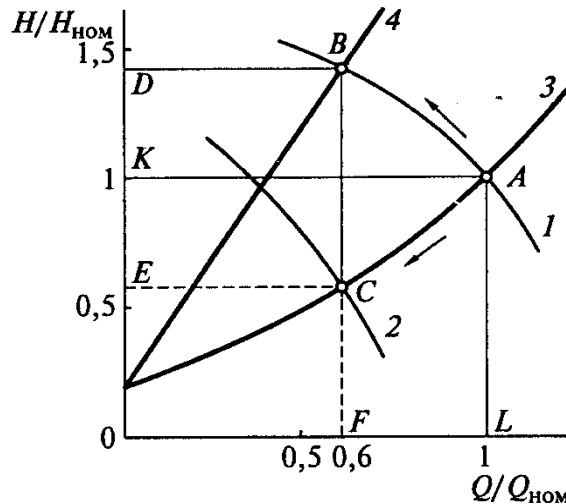


Рисунок 5.9 – Характеристики продуктивності відцентрової помпи у випадках дросельного й частотного регулювання

На рис. 5.9 зображено характеристики продуктивності відцентрової помпи у випадках дросельного й частотного регулювання. Крива 1 характеризує роботу нерегульованого електропривода на номінальній частоті обертання, крива 3 характеризує роботу магістралі з повністю відкритим шиббером. Значення витрати й напору води показано у відносних одиницях з використанням як базових величин номінальних значень витрати $Q_{НОМ}$ і напору $H_{НОМ}$. За номінальних значень витрати й напору помпа працює в точці А, а потужність, споживана помпою, пропорційна до площі прямокутника $OKAL$. Зі зменшенням витрати до $0,6Q_{НОМ}$ за рахунок дросельного регулювання відбувається зміна опору магістралі (крива 4 на рис. 5.9), помпа працює в точці В кривої 1, що призводить до зростання напору ($1,5H_{НОМ}$) понад номінальне значення. Потужність помпи стає пропорційною до площі прямокутника $ODBF$; вона істотно не відрізняється від потужності, споживаної за номінальної витрати, а отже, практично не вдається знизити енергоспоживання. Необхідно також звернути особливу увагу на те, що за дросельного регулювання витрати (подавання) води зростає напір (тиск) у системі водопостачання, що викликає пориви та істотні втрати (витікання) води через нещільності.

Враховуючи, що зростання вартості електричної енергії має випереджувальний характер порівняно із вартістю інших витрат, проблема енергоощадження в приводах pomp водопостачання стає нагальною.

За енергоефективного регулювання зменшенням швидкості обертання валу помпа працює зі зниженою витратою в точці С на кривій 2 за незмінної характеристики магістралі (крива 3 на рис. 5.9). Потужність, споживана електроприводом у цьому випадку, пропорційна до площі прямокутника $OECF$, що наочно ілюструє істотне зниження енергоспоживання. Водночас зменшується й напір до $0,5H_{НОМ}$, що зумовлює зменшення втрат (витікання) води.

Наведемо методику порівняльної оцінки енергоспоживання в разі зміни подавання Q за рахунок дросельного або частотного регулювання швидкості приводного електродвигуна.

Сталий режим роботи помпової установки визначають за точкою перетину характеристики помпи і характеристики магістралі, приєднаної до помпи.

Характеристикою помпи є залежність напору H від витрати Q :

$$H = H_{0H} \left[\frac{\omega}{\omega_{НОМ}} \right]^2 - C \cdot Q^2, \quad (5.20)$$

де H_{0H} - напір помпи у випадку $Q = 0$ і $\omega = \omega_{НОМ}$; $\omega_{НОМ}$ - номінальна швидкість електродвигуна; C - конструктивний коефіцієнт помпи, $C = (H_{0H} - H_{НОМ}) / Q_{НОМ}^2$; $Q_{НОМ}$ і $H_{НОМ}$ - номінальні витрата й напір.

Характеристику магістралі визначають за виразом:

$$H = H_C + R \cdot Q^2, \quad (5.21)$$

де H_C - статичний напір (протитиск), який відповідає $Q = 0$ (закритий шибер); R - коефіцієнт гідравлічного опору магістралі, визначають залежно від діаметру магістралі та її протяжності, а також місцевих опорів.

Характеристики способів регулювання відцентрової помпи та магістралі наведено на рис. 5.10.

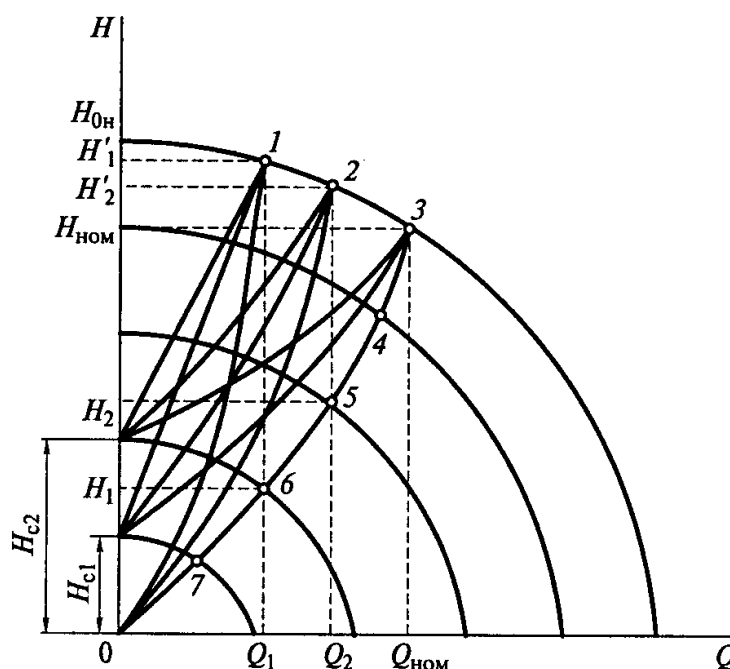


Рисунок 5.10 – Характеристики способів регулювання відцентрової помпи:
 1, 2, 3 — робочі точки у випадку дросельного регулювання подавання;
 4, 5, 6, 7 — робочі точки в разі регулювання подавання за рахунок зміни частоти обертання двигуна

Потужність, яку споживає помпова установка з мережі:

$$P_1 = \frac{P_{МЕХ}}{\eta_1},$$

де P_{MEX} - потужність на валу двигуна помпи, $P_{MEX} = M_C \cdot \omega$; M_C - статичний момент навантаження на валу двигуна; η_1 - ККД двигуна.

Регулювання подавання шибром ґрунтується на зміні опору магістралі. У цьому випадку для $\omega = \omega_{НОМ} = const$ робоча точка механізму переміщується за $Q - H$ - характеристикою, що відповідає номінальній швидкості двигуна, у бік зниження подавання до точки перетину з новою характеристикою магістралі (точки 1, 2, 3 на рис. 5.10).

У разі частотного способу регулювання подавання робоча точка переміщується за незмінною характеристикою магістралі (точки 4, 5, 6, 7 на рис. 5.10). Тут із зменшенням Q зменшується й H , що обумовлює зниження статичної потужності помпи.

Розглянемо ККД двигуна за різних способів регулювання подавання.

У разі частотного регулювання, здійснюваного за постійності абсолютного ковзання, ККД:

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + \frac{\omega_{НОМ}}{\omega} \cdot \frac{S_{НОМ}}{1 - S_{НОМ}} (1 + a)}, \quad (5.22)$$

де $S_{НОМ}$ - номінальне ковзання двигуна; a - відношення активних опорів фази статора R_1 і ротора R_2 , $a = R_1 / R_2$.

За регулювання шибром, коли $\omega = \omega_{НОМ} = const$, ККД двигуна постійний, його обчислюють за виразом:

$$\eta_1 = \frac{1 - S_{НОМ}}{a \cdot S_{НОМ} + 1}.$$

Для отримання розрахункових виразів у функції витрати, ковзання двигуна можна подати через витрату. Для цього у формулі (5.20) замінимо $\left[\frac{\omega}{\omega_{НОМ}} \right]^2$ на $\left[\frac{1 - S}{1 - S_{НОМ}} \right]^2$ і, розв'язавши його спільно з виразом (5.22) відносно S , отримаємо:

$$S = 1 - (1 - S_{НОМ}) \sqrt{h_C + Q_*^2 \cdot (1 - h_C)} = 1 - (1 - S_{НОМ}) \cdot A,$$

де $h_C = \frac{H_C}{H_{0H}}$; $Q_* = Q / Q_{НОМ}$; $A = \sqrt{h_C + Q_*^2 \cdot (1 - h_C)}$.

Залежність для відносного моменту μ на валу турбомеханізму, який працює на мережу з постійними параметрами, має вигляд:

$$\mu = \mu_{0C} \left[\frac{\omega}{\omega_{НОМ}} \right]^2 + (1 - \mu_{0C}) \frac{\omega}{\omega_{НОМ}} \sqrt{\frac{(\omega/\omega_{НОМ})^2 - h_C}{1 - h_C}},$$

де $\mu = \frac{M}{M_{C MAX}}$ ($M_{C MAX}$ - максимальний статичний момент на валу механізму для $\omega = \omega_{НОМ}$); μ_{0C} - статичний момент на валу (M_{0C}) для $Q_* = 0$ (закритий шибр), у відносних одиницях $\mu_{0C} = \frac{M_{0C}}{M_{C MAX}}$.

Для універсального використання розрахункових формул доцільно

визначати потужність P_1 у відносних одиницях $\left[\frac{P_1}{P_B} \right]$, прийнявши за базове

значення потужності P_B максимальну статичну потужність на валу двигуна $P_{C \text{ МАКС}}$ для $\omega = \omega_{\text{НОМ}}$, тобто $P_B = P_{C \text{ МАКС}} = M_{C \text{ МАКС}} \cdot \omega_{\text{НОМ}}$.

Якщо вважати, що $M_{C \text{ МАКС}} = M_{\text{НОМ}}$ ($M_{\text{НОМ}}$ - номінальний момент двигуна, $M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}}$), то базова потужність $P_B = P_{\text{НОМ}}$.

Вирази для розрахунку $P_{1\star}$ для різних способів регулювання подавання помпи мають такий вигляд:

для дросельного регулювання:

$$P_{1\star} = \frac{[\mu_{0C} + (1 - \mu_{0C}) \cdot Q_{\star}] \cdot (1 + a \cdot S_{\text{НОМ}})}{1 - S_{\text{НОМ}}}; \quad (5.23)$$

для частотного регулювання:

$$P_{1\star} = \left[\mu_{0C} \cdot A^3 + (1 - \mu_{0C}) \cdot A^2 \cdot Q_{\star} \right] \cdot \left[1 + \frac{S_{\text{НОМ}} \cdot (1 + a)}{(1 - S_{\text{НОМ}}) \cdot A} \right]; \quad (5.24)$$

Вирази (5.23) і (5.24) отримано за умови, що ККД помпи дорівнює одиниці і залишається незмінним у всіх режимах роботи. Вирази (5.23) і (5.24) дозволяють розрахувати споживану помпою потужність $P_{1\star}$ від витрати рідини Q_{\star} і здійснити порівняльне оцінювання способів регулювання. У випадку дросельного регулювання потужність $P_{1\star}$ залежить від μ_{0C} , a , $S_{\text{НОМ}}$, а для частотного регулювання — від H_C , μ_{0C} , a , $S_{\text{НОМ}}$. У табл. 5.6 наведено відносні значення споживаної потужності $P_{1\star} = f(Q_{\star})$ для дросельного й частотного регулювання за $\mu_{0C} = 0,4$, $a = 1$, $S_{\text{НОМ}} = 0,04$.

Табл. 5.6 та рис. 5.11 із залежностями $P_{1\star} = f(Q_{\star})$, побудованими за даними табл. 5.6 для $H_C = 0$ ілюструють перевагу частотного регулювання порівняно з дросельним. За заданою витратою $Q_{i\star}$ можна розрахувати споживану потужність для дросельного ($P_{1i\star1}$) і частотного регулювання ($P_{1i\star2}$) та визначити вигоду $\Delta P_{1i\star} = P_{1i\star1} - P_{1i\star2}$, що дозволяє знизити річні видатки на оплату електричної енергії.

Таблиця 5.6 – Споживана електроприводом відцентрової помпи потужність P_{1*} , в.о., за дросельного та частотного регулювання залежно від витрати рідини Q_* і статичного напору H_C

Q_*	P_{1*}					
	Дросельне регулювання	Частотне регулювання				
		$H_C = 0$	$H_C = 0,2$	$H_C = 0,4$	$H_C = 0,6$	$H_C = 0,8$
0	0,41	0	0,04	0,1	0,19	0,29
0,2	0,53	0,01	0,07	0,17	0,27	0,4
0,4	0,65	0,07	0,16	0,26	0,38	0,51
0,6	0,77	0,22	0,32	0,42	0,53	0,65
0,8	0,89	0,52	0,59	0,68	0,75	0,81
1	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02

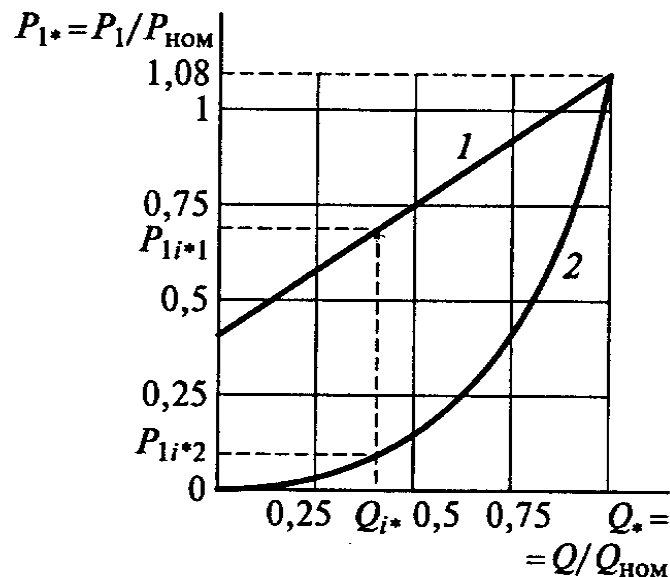


Рисунок 5.11 – Залежності $P_{1*} = f(Q_*)$ для дросельного (крива 1) й частотного (крива 2) регулювання

Як видно із табл. 5.6, зі збільшенням статичного напору H_C дещо знижується заощадження електричної енергії від впровадження частотно-регульованого електропривода, проте за будь-яких значень H_C автоматика забезпечує сталий тиск H в системі незалежно від витрати Q .

Для оцінювання впливу початкового статичного моменту (μ_{0C}) на споживану потужність у табл. 5.7 наведено залежності $P_{1*} = f(Q_*)$ для дросельного та частотного регулювання за $\mu_{0C} = 0$ і $H_C = 0$.

Таблиця 5.7 – Споживана електроприводом відцентрової помпи потужність для різних способів регулювання за початкового статичного моменту $\mu_{0C} = 0$ та статичного напору води $H_C = 0$

Спосіб регулювання	Q_*					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
P_{1i*1} , дросельне регулювання	0	0,2	0,41	0,61	0,81	1,02
P_{1i*2} , частотне регулювання	0	0,01	0,07	0,22	0,53	1,02

Відзначимо, що для моменту лопатного вентилятора статичного навантаження (за $\mu_{0C} = 0$ та квадратичної залежності μ_C від швидкості) відносні значення витрати, напору, моменту та потужності на валу двигуна можуть бути виражені у функції кутової швидкості:

$$Q_* = \frac{Q}{Q_{НОМ}} = \frac{\omega}{\omega_{НОМ}}; \quad (5.25)$$

$$H_* = \frac{H}{H_{НОМ}} = \left(\frac{\omega}{\omega_{НОМ}} \right)^2; \quad (5.26)$$

$$M_* = \frac{M}{M_{НОМ}} = \left(\frac{\omega}{\omega_{НОМ}} \right)^2; \quad (5.27)$$

$$P_* = \frac{P}{P_{НОМ}} = \left(\frac{\omega}{\omega_{НОМ}} \right)^3, \quad (5.28)$$

де $\omega_{НОМ}$, $M_{НОМ}$, $P_{НОМ}$ - номінальні швидкість, момент та потужність двигуна.

ККД помпи в цьому випадку вважається постійним.

5.5. Заощадження електричної енергії у вентиляційних установках

5.5.1. Вибір вентиляторів та систем регулювання подавання повітря

Вибір вентилятора для вентиляції промислового приміщення відбувається в такій послідовності.

За сумарним питомим тепловиділенням в приміщенні $Q_{сум}$ (Дж/год) визначають витрату повітря L_m (м³/год):

$$L_m = \frac{Q_{сум}}{\gamma (c (\tau_k - \tau_n))},$$

де γ – густина повітря, кг/м³; c – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·°C); τ_k – температура нагрітого повітря в приміщенні, °C; τ_n – температура повітря зовнішнього середовища, °C.

Далі визначають необхідну витрату повітря для видалення вологи з приміщення, а також необхідну витрату повітря для видалення шкідливих газівиділень в приміщенні; на основі цього розраховують найбільшу необхідну витрату повітря L для приміщення.

Визначають кратність оновлення повітря в приміщенні за одиницю часу:

$$m = \frac{L}{V},$$

де L – потрібна витрата повітря, м³/год; t – одиниця часу, $t = 1$ год; V – об'єм приміщення, м³.

Для вибору вентиляторів складають схему вентиляційної мережі, яку показано на рис. 5.12.

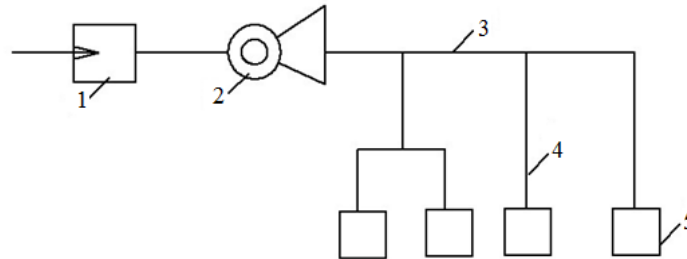


Рисунок 5.12 – Схема вентиляційної мережі приміщення
1 – фільтр; 2 – вентилятор; 3 – магістральний повітропровід;
4 – повітропровід відгалуження; 5 – впускний пристрій

Втрату тиску в повітропроводі Δp (Па) визначають для найвіддаленішої ділянки. Сумарну втрату тиску розраховують за:

$$\Delta p = \sum_{i=1}^n (F_i \cdot l_i) + \sum_{i=1}^n (H_{Ди} \cdot \xi_i),$$

де F_i – питома втрата тиску на погонний метр залежн від перерізу й форми трубопроводу на i -й ділянці, Па/м; l_i – довжина i -ої ділянки одного перерізу й форми, м; $H_{Ди}$ – динамічний тиск i -ої ділянки, Па; ξ_i – коефіцієнт місцевих опорів i -ої ділянки.

$$H_{Ди} = \frac{\gamma \cdot v^2}{2},$$

де v – швидкість повітря в окремій ділянці, м/с; для виробничих приміщень у магістралях

Потужність двигуна вентилятора визначають за виразом:

$$P_{ДВ} = \frac{k_3 \cdot L \cdot \Delta p}{\eta_B \cdot \eta_{II}}, \quad (5.29)$$

де k_3 – коефіцієнт запасу, $k_3 = 1,1 \dots 1,3$; η_B – ККД вентилятора; η_{II} – ККД системи передавання.

Регулювання подавання повітря може відбуватися:

- шиберами вентиляційних каналів (діафрагмування);
- зміною кута нахилу лопатей спрямувального апарата;
- використанням регульованого електропривода.

Зменшення витрат електричної енергії у вентиляційних установках можна досягти за рахунок впровадження таких заходів:

- заміна старих вентиляторів новими економічнішими;

- впровадження енергоощадних способів регулювання продуктивності вентиляторів;
- блокування вентиляторів теплових завіс з пристроями відчинення та зачинення дверей;
- вимкнення вентиляційних установок під час перерв;
- впровадження автоматичного керування вентиляційними установками.

Споживання електричної енергії приводом вентиляторів визначають за потужністю двигунів, кВт·год/рік:

$$W_{\text{ВЕНТ}} = \sum_{i=1}^n k_{B_i} \cdot P_{\text{ВСТ}_i} \cdot t_i, \quad (5.30)$$

де n – кількість вентиляційних установок на підприємстві; $P_{\text{ВСТ}}$ – встановлена потужність електродвигуна (за паспортними даними); t – тривалість роботи вентилятора впродовж року, год; k_B – коефіцієнт використання вентиляторів (табл. 5.8).

Таблиця 5.8 – Значення коефіцієнта використання для різних типів вентиляторів

Тип вентилятора	k_B
Вентилятори загального призначення	0,6 – 0,8
Вентилятори високого тиску	0,75
Вентилятори дробарень	0,4 – 0,5
Газодувки	0,5 – 0,6

5.5.2. Заміна застарілих вентиляторів на сучасні

Заміна вентиляторів старих типів з низьким ККД на вентилятори нового типу дає річне заощадження електричної енергії, кВт·год:

$$\Delta W = \frac{h \cdot Q \cdot (\eta_2 - \eta_1) \cdot t}{102 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_E \cdot \eta_M}, \quad (5.31)$$

де h – тиск вентилятора, Па; Q – продуктивність вентилятора, м³/с; t – тривалість роботи вентилятора впродовж року, год/рік; η_1 і η_2 – ККД старого та нового вентиляторів; η_E і η_M – ККД електродвигуна та мережі відповідно.

5.5.3. Впровадження енергоефективного регулювання подавання вентиляторів

Розрізняють відцентрові та осьові вентилятори. Характеристики відцентрових вентиляторів аналогічні до характеристик відцентрових pomp.

Якщо подавання вентилятора регулювати зміною швидкості обертання, то характеристика мережі відповідає виразу для $H_C = 0$, тобто $H = R \cdot Q^2$, а ККД вентилятора у всьому діапазоні регулювання залишається постійним.

Потужність, яку споживає з мережі двигун вентилятора можна оцінити за виразами, отриманими за $H_C = 0$ і $\mu_{oc} = 0$. Так, у випадку регулювання шибера:

$$P_{1*} = \frac{1+a \cdot S_{НОМ}}{S_{НОМ}} \cdot Q_*, \quad (5.32)$$

а у випадку частотного регулювання:

$$P_{1*} = Q_*^3 + \frac{S_{НОМ} \cdot (1+a)}{1 - S_{НОМ}} \cdot Q_*^2. \quad (5.33)$$

Залежності споживаної потужності, побудовані згідно з формулами (5.32) і (5.33), показано на рис. 5.13.

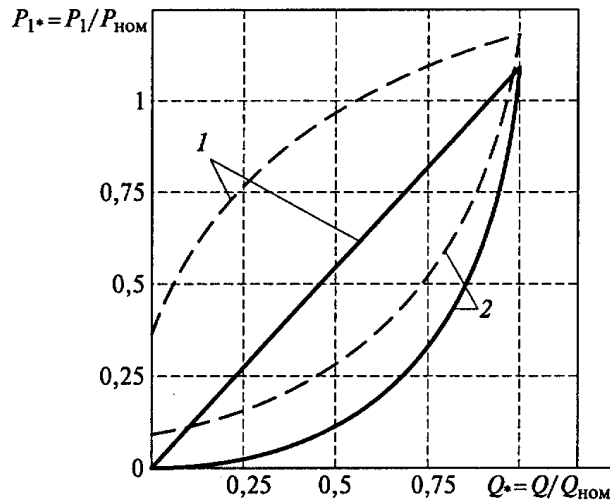


Рисунок 5.13 – Залежності зміни потужності, споживаної з мережі електроприводом вентилятора, за регулювання шибера (1) та за частотного регулювання (2)

З рис. 5.13 видно, що споживана потужність частотно-регульованого вентилятора значно нижча, ніж регульованого шибером. Графіки потужності двигуна з урахуванням ККД вентилятора позначено пунктирною лінією.

Особливе значення для деяких вентиляторів має застосування регульованого електроприводу, оскільки відомо, що ККД вентиляторів з регульованим електроприводом повинен бути більшим, ніж з нерегульованим, у середньому на 12%. Окрім підвищення ККД, застосування регульованого приводу вентиляторів дозволяє спростити конструкцію турбомашин, усунувши спрямувальний апарат.

Вентилятори – це механізми з режимом тривалого навантаження та значною тривалістю роботи впродовж року; навантаження на валу приводного двигуна спокійне, перевантажень не виникає.

Необхідний діапазон регулювання швидкості для вентиляторів зазвичай не перевищує 2:1.

5.5.4. Покращення роботи вентиляторів зміною режиму їхньої роботи

Втрати електричної енергії у вентиляторній установці можна зменшити за рахунок зміни частоти обертання вала. Заощадження електричної енергії в цьому випадку становитиме, кВт·год:

$$\Delta W = \frac{(h_1 \cdot Q_1 \cdot \eta_1 - h_2 \cdot Q_2 \cdot \eta_2) \cdot t}{102 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_E \cdot \eta_M \cdot \eta_{PP}}, \quad (5.34)$$

де Q_1 і Q_2 – подавання вентилятора до та після зміни режиму його роботи, яке визначають за суміщеними характеристиками вентилятора й вентиляційної мережі, м³/с; h_1 і h_2 – тиск вентилятора до і після зміни режиму, Па; $\eta_E, \eta_{PP}, \eta_M$ – ККД електродвигуна, передачі й електричної мережі (вказаними коефіцієнтами з переходом на новий режим роботи вентилятора для практичних розрахунків можна знехтувати); t – тривалість роботи вентилятора впродовж року, год/рік; η_1 і η_2 – ККД вентилятора до і після зміни його режиму.

5.5.5. Впровадження автоматичного керування вентиляційними установками

1. Пристрій блокування індивідуальних витяжних систем знижує витрату електричної енергії на 25 – 30 %.
2. Пристрій блокування вентилятора повітряних завіс з механізмом відкривання може забезпечити заощадження електричної енергії до 70 %.
3. Пристрій автоматичного регулювання та керування вентиляційними установками залежно від температури зовнішнього повітря дозволяє заощадити електричну енергію до 10 – 15 %.

5.6. Заощадження електричної енергії в компресорних установках

Нерідко безпосередні втрати стисненого повітря (витікання в мережах, невиробничі витрати, невпорядкованість повітряного господарства та незадовільна його експлуатація) сягають 20...25% і в окремих випадках становлять половину вироблення стисненого повітря на підприємстві.

Зменшення споживання електричної енергії для забезпечення підприємства стисненим повітрям можливе за такими напрямками:

- покращення роботи компресорів регулюванням подавання за коливаний споживання стисненого повітря;
- автоматизація відкриття клапанів для всмоктування повітря;
- зниження номінального робочого тиску компресорної установки;
- впровадження в поршневих компресорах прямоточних клапанів;
- підігрівання стисненого повітря перед пневмоприймачами;
- зміна компресорів старих конструкцій на нові з вищим ККД;
- систематичний контроль витікання стисненого повітря на окремих ділянках, усунення нещільностей у сальниках, трубопроводах, з'єднувальній та запірній арматурі;
- від'єднання окремих ділянок або всієї мережі стисненого повітря в неробочий час;
- заміна пневмоінструмента на електроінструмент тощо.

5.6.1. Визначення потужності, яку споживають компресори

Однією із властивостей повітря є його здатність до стискування. Якщо стисненому повітрю надати можливість розширитися, то за рахунок його внутрішньої енергії повітря може виконати механічну роботу. Якщо процес відбувається за умови сталого тиску, то роботу A визначають за виразом:

$$A = p(V_2 - V_1), \quad (5.35)$$

де p – тиск, під дією якого виконується робота, Па; V_1, V_2 – відповідно об'єми повітря після і до виконання роботи, м³.

Для вироблення стисненого повітря, яке використовується як енергоносіє, найбільшого розповсюдження набули компресори об'ємного типу (поршневі, ротаційні, гвинтові) та лопатні компресори (відцентрові, осьові). Основні параметри компресорів наведено в табл. 5.9.

Таблиця 5.9 – Основні параметри промислових компресорів

Тип компресора	Продуктивність компресора, м ³ /хв	Ступінь стиснення повітря
Поршковий	до 500	2,5 – 1000
Ротаційний	до 500	3 – 12
Гвинтовий	до 300	4 – 15
Відцентровий	100 – 4000	3 – 20
Осьовий	100 – 15000	2 – 20

Роботу компресорів легко дослідити за допомогою індикаторної діаграми в системі координат $p-V$. На рис. 5.14 показано спрощену індикаторну діаграму теоретичного процесу, що відбувається в поршковому компресорі.

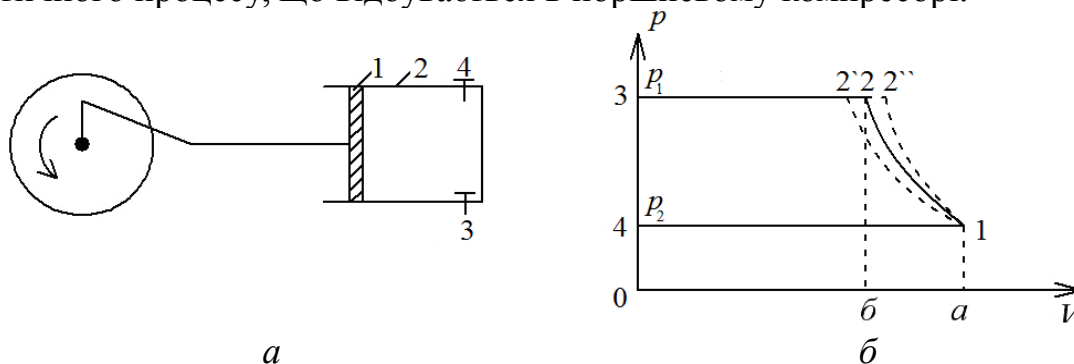


Рисунок 5.14 – Схема поршкового компресора (а) та діаграма теоретичного процесу (б)

Під час руху поршня 1 справа наліво в циліндрі 2 з відкритим всмоктувальним клапаном 3 відбувається всмоктування повітря вздовж ліній «4-1». На зворотному русі поршня повітря починає стискатися в циліндрі, оскільки всмоктувальний клапан закритий. Процес стискування відбувається вздовж ліній «1-2», і за умови досягнення тиску p_2 повітря відкриває випускний клапан 4; у подальшому відбувається виштовхування повітря під тиском p_2 – лінії «2-3».

Після закінчення виштовхування відкривається всмоктувальний клапан, тиск знижується до атмосферного (p_1) – лінії «3-4», і під час руху поршня вправо починається всмоктування повітря.

Підсумкова робота замкненого процесу дорівнює алгебраїчній сумі робіт окремих процесів та графічно визначається площиною, обмеженою кривими процесу (рис. 5.14, б). Отже, підсумкова робота A складається з таких робіт: A_{CT} – робота стискування (площина $a-1-2-b$), яка виконується приводом від зовнішнього двигуна; $A_{ВИШТ}$ – робота виштовхування (площина $b-2-3-0$); A_{BC} – робота всмоктування (площина $a-1-4-0$), що виконується за рахунок атмосферного повітря, зусилля якого діє на поршень у напрямку, оберненому зусиллям двигуна.

Таким чином, підсумкова робота компресора графічно визначається площиною 1-2-3-4, а аналітично виражається рівнянням $A = A_{CT} + A_{ВИШТ} + A_{BC}$.

Лінія стискування 1-2 (рис. 5.14, б) здебільшого являє собою політропу ($p \diamond^n = const$, n – показник політропи), яка близька з одного боку до ізотерми (лінія 1-2' – $p \diamond = const$), а з другого боку – до адіабати (лінія 1-2'' (процесу без теплообміну з навколишнім середовищем) – $p \diamond^k$, k – показник адіабати).

На основі рис. 5.14.б потужність двигуна компресора (кВт) можна визначати за виразом:

$$P_K = \frac{k_3 \cdot Q}{60 \cdot \eta_K \cdot \eta_{II}} \cdot \frac{A_{I3} + A_A}{2},$$

де k_3 – коефіцієнт запасу; Q – напір компресора, м³/хв; η_K – ККД компресора; η_{II} – ККД системи передавання; A_{I3} , A_A – відповідно робота для ізотермічного та адіабатичного процесів стиснення до визначеного тиску, кДж/м³.

Потужність двигуна компресора (кВт) можна визначити за виразом:

$$P_K = \frac{1380}{\eta_{I3} \cdot \eta_{EII}} \cdot \frac{p_1 \cdot Q_K \cdot \gamma_0}{\gamma_g} \cdot \lg \frac{p_2}{p_1}, \quad (5.36)$$

де p_1 – початковий тиск всмоктувального повітря, МПа; p_2 – тиск стиснутого повітря, МПа; Q_K – продуктивність компресора, м³/с; γ_0 – густина повітря за температури 273 К та значення тиску 0,1 МПа, кг/м³; γ_g – густина всмоктувального повітря в дійсних умовах, кг/м³; η_{I3} – ізотермічний ККД компресора; η_{EII} – ККД електропривода.

5.6.2. Визначення потужності, яку споживають компресори

Одним з ефективних заходів з економії електричної енергії під час використання стисненого повітря є теплоізоляція повітряпроводу, яка дозволяє подати стисле повітря з підвищеною температурою. У такому випадку зменшується витрата повітря і відповідно втрати електричної енергії.

Розмір річного заощадження електричної енергії за рахунок встановлення теплоізоляції повітряпроводу визначають за виразом, кВт·год/рік:

$$\Delta W = 0,22 \cdot Q \cdot \Delta \tau \cdot w \cdot t, \quad (5.37)$$

де Q – витрата стисненого повітря, м³/хв; $\Delta\tau$ – різниця температури до встановлення теплоізоляції повітропроводу та після (в середньому на рік), °С; W – питома витрата електричної енергії на вироблення 1 м³ стисненого повітря, кВт·год/м³; t – тривалість роботи компресорної установки впродовж року, год/рік.

Підігрівання стисненого повітря перед пневмоприймачем до 150 °С здійснюється за рахунок вторинних ресурсів. У такому випадку заощадження електричної енергії може сягати 15-20 %, а у разі нагрівання на 50 °С – 10 %.

5.6.3. Підігрівання стисненого повітря перед пневмоприймачами

Використання компресорів досконаліших конструкцій замість застарілих дає значне заощадження електричної енергії, тис. кВт·год/рік:

$$\Delta W = \left[\frac{P_1}{\eta_1} - \frac{P_2}{\eta_2} \right] \cdot t \cdot 10^{-3}, \quad (5.38)$$

де t – тривалість роботи компресора, год/рік; P_1 – потужність електродвигуна компресора старої конструкції, кВт; P_2 – потужність електродвигуна компресора нової конструкції, кВт; η_1 – ККД електродвигуна компресора старої конструкції, %; η_2 – ККД електродвигуна компресора нової конструкції, %.

5.6.4. Зменшення витоків стисненого повітря

Витоки стисненого повітря є потужним джерелом енергетичних втрат, а також суттєво збільшують експлуатаційні витрати. Зазвичай, єдиним способом є збільшення робочого тиску для компенсації втрат.

Втрати електричної енергії на витікання стисненого повітря визначають виразом, кВт·год:

$$\Delta W = \alpha \cdot n \cdot w \cdot t, \quad (5.39)$$

де α – витрата повітря через нещільності арматури та шлангів, м³/хв; n – кількість точок, де необхідно усунути витікання стисненого повітря; W – питоме споживання електричної енергії на вироблення 1 м³ стисненого повітря, кВт·год/м³; t – тривалість перебування повітропроводу під тиском, год.

VI. СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ У ПРОМИСЛОВОСТІ ТА СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

6.1. Системи автоматизованого керування електричним приводом у промисловості

На сучасному етапі у промисловості виконують електричні приводи з автоматичним керуванням – програмовані, слідкуючі, адаптивні.

Слідкуючий електричний привод є замкненою автоматичною системою (рис. 6.1), яка забезпечує рух робочої машини у відповідності з довільним сигналом керування – застосовують у супутникових радіоантенах, копіювальних верстатах, маніпуляторах тощо.

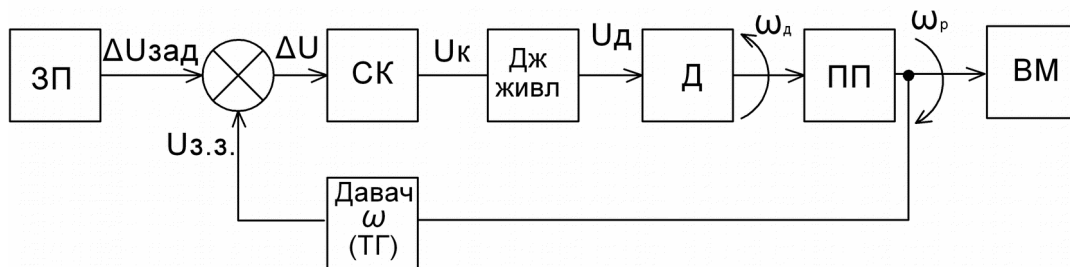


Рис. 6.1. Структурна схема слідкуючого електроприводу

Система керування (СК) виробляє керуючий сигнал U_k у функції заданого від програмного пристрою (ЗП) сигналу $U_{зад}$ і додаткових сигналів зворотного зв'язку $U_{з.з.}$ за швидкістю виконавчого пристрою (ВП); давачем швидкості слугує тахогенератор (ТГ). СК містить підсилювач і силовий тиристорний перетворювач, які забезпечують потрібний закон зміни живлячої двигун Д напруги у часі $U_d(t)$.

Робота слідкуючого електроприводу зводиться до безперервного автоматичного усунення виникаючої різниці ΔU на виході суматора.

Якщо характеристики робочої машини й ВП є невідомими, а збурення, що на неї діють можуть змінюватись непередбачуваним чином, тоді необхідно додатково налагоджувати електропривод в процесі роботи.

Електричні приводи з **програмним** керуванням забезпечують рух робочої машини за програмою, заданою наперед (наприклад, верстати з ЧПК). Системи з ЧПК можуть бути розімкненими (коли умови, в яких відбувається технологічний процес, є відомими наперед) і замкненими. В замкненій системі за допомогою давачів вимірюють дійсні координати робочої машини і цю інформацію через зворотній зв'язок порівнюють із сигналом від програмного пристрою $U_{зад}$; у разі їх розбіжності до СК подають додатковий корегуючий сигнал ΔU .

6.1.1. Система автоматичного керування електрозварюванням

Під час електрозварювання важливим є підтримання стабільного зазору між оброблюваною деталлю й електродом; це завдання ускладнює знос електроду та вібрації при його русі вздовж шву.

Автоматичне керування електрозварюванням здійснюють шляхом контролю ВАХ дуги. Поки існує різниця між напругою дуги та заданим її значенням $U_p = U_3 - U_{дуги}$, відбувається переміщення вольфрамового електрода за допомогою редуктора вгору або вниз (рис. 6.2).

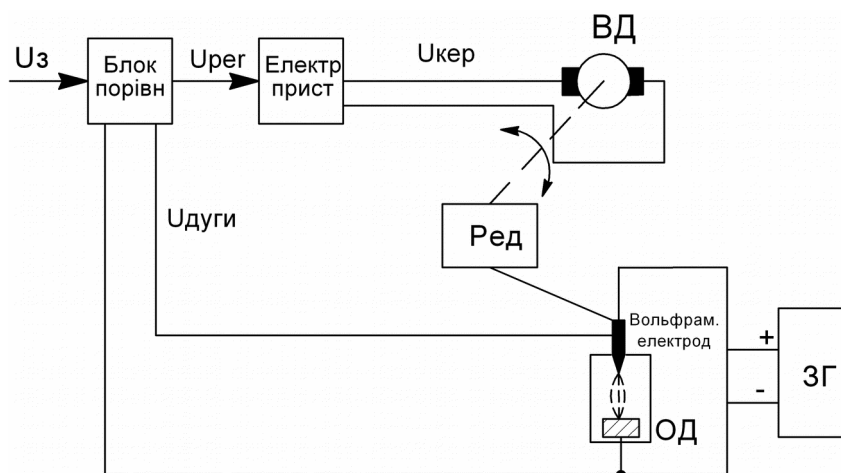


Рис.6.2. Система автоматичного керування електрозварюванням:

БП – блок порівняння; ЕП – електронний пристрій; ВД – виконавчий двигун; ВЕ – вольфрамовий електрод; ЗГ – зварювальний генератор; ОД – оброблювана деталь.

6.1.2. Система автоматичного керування шліфувальним верстатом

Система автоматичного керування (САК) *шліфувальним верстатом* реалізує адаптивне керування за екстремальним принципом. Під час шліфування непередбачуваними факторами є припуски δ деталі і зношування шліфувального диска (ШД) діаметром \emptyset . Найвищої продуктивності верстат досягає за максимально припустимого навантаження F на шліфувальний диск ШД – для цього швидкість V та зусилля F здиру металу мають регулюватись у функції розмірів припусків δ і діаметру шліфувального диска.

Розглянемо відповідну блок-схему (рис. 6.3).

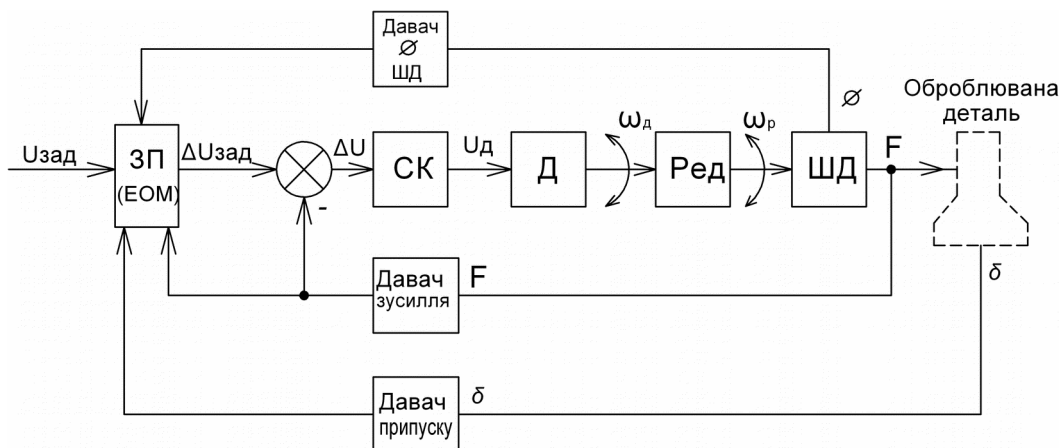


Рис.6.3. Блок-схема САК шліфувальним верстатом

Двигун через редуктор обертає шліфувальний диск, який обробляє деталь. Двигуном керує система керування (СК).

Для виміру зусилля подачі F використовують давач зусилля ДЗ. Для контролю поточного значення припуску δ – давач припуску ДП. Для контролю діаметра шліфувального диска – давач діаметра ДШд.

Зусилля F регулюють пристроєм адаптивного керування (ПАК) к функції δ та діаметра \emptyset .

6.1.3. Система автоматичного керування графобудувачем

Систему автоматичного керування *графобудувачем* зображено на рис. 6.4.

Точність побудови залежить від електронного пристрою ЕП.

Контроль за пересуванням каретки та траверси здійснюють давачі положення ДП_{x,y}. ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач.

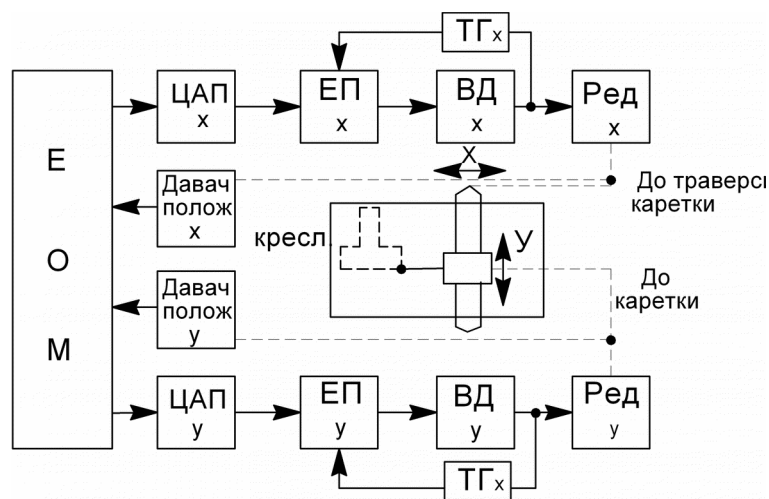


Рис.6.4. Система автоматичного керування графобудувачем

6.1.4. Система автоматичного керування подаванням стрижня до реактору

Для дистанційного керування подаванням стрижня до небезпечної зони реактору АЕС використовують слідкуючу система електроприводу (рис. 6.5).

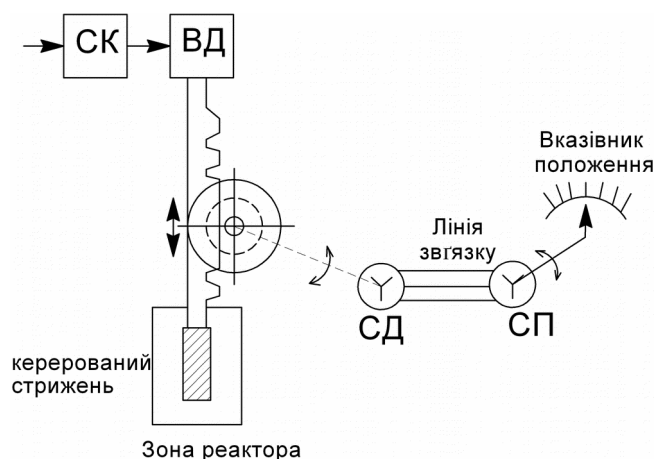


Рис.6.5. САК подавання стрижня до реактору АЕС

У лінії зв'язку між „Сельсин-Давачем” (СД) та „Сельсин-Приймачем” (СП) виникає розбіжність і з'являється ЕРС пропорційна кутові $Q=Q_{CD}-Q_{CP}$, яка слугує сигналом для виконавчого двигуна (ВД). Сельсин-давач встановлений на валу рейкового колеса. Одночасно із „Сельсин-Приймачем” сигнал подають до системи керування електроприводом.

6.2. Характеристика технологічних комплексів сільськогосподарського виробництва

У сільськогосподарському виробництві використовують наступні механізми і машини:

- відцентрові механізми – помпи, відцентрові і осьові вентилятори, молочні та інші центрифуги, вакуумні помпи;
- установки з кривошипно-шатунним механізмом – поршневі помпи, поршневі компресори, поршневі преси сіна і соломи, лісопильні рами;
- механічні транспортери (стрічкові, ковшові, шнекові, спіральні), роздачі кормів (скребкові), прибирання гною (ланцюгові, штангові, скреперні);
- машини первинної переробки продуктів і приготування кормів – зернодробарки, подрібнювачі грубих кормів, змішувачі, гранулятори, молотарки-терки, сортувальні тощо.

Зв'язок машин і механізмів між собою в технологічному комплексі здійснюється за допомогою конвеєрів різних конструкцій, тельферів або маніпуляторів. У технологічних комплексах сільськогосподарського виробництва застосовують системи управління як з централізованим управлінням (елеватори, комбікормові заводи), так і з децентралізованим управлінням від мікро-ЕОМ, контролерів або промислових комп'ютерів [5, 11]. У технологічних комплексах застосовують нерегульовані і регульовані електроприводи машин і механізмів, більшість яких працюють в режимах $S1$ і $S2$, значно менше число – в режимі $S3$; режими роботи $S4$ - $S8$ використовують украй рідко.

Сільськогосподарське виробництво характеризується специфічними умовами, тому до електричних приводів пред'являють додаткові вимоги: допустиме відхилення напруги електродвигуна – від $-7,5\%$ до $+10\%$ номінального значення; електродвигуни сільськогосподарського призначення повинні допускати короткочасну роботу (до 10 хв) за напруги до 0,8 від номінальної з номінальним навантаженням й тривалу роботу із зниженням потужності до 0,8 від номінальної; електричний привод повинен бути розрахований для роботи за температури від -40°C до $+40^{\circ}\text{C}$ і відносної вологості 95 %.

У ряді сільськогосподарських виробничих приміщень концентрація пилу може досягати $1,3 \text{ г/м}^3$ (склади і сховища кормів, кормоцехи, скотні двори і пташники, цехи первинної обробки технічних культур). Встановлені в таких приміщеннях електроприводи повинні бути пилезахищеними.

6.3. Автоматизація технологічного процесу вентиляції та керування помповими установками

Для забезпечення потрібного повітрообміну та створення необхідного мікроклімату в тваринницьких і птахівницьких приміщеннях застосовують вентиляційне устаткування, яке за призначенням поділяють на три групи: припливне, витяжне та комбіноване. Найбільшого розповсюдження набули витяжні системи вентиляції, які видаляють відпрацьоване повітря разом із шкідливими домішками (аміак, сірководень, вуглекислий газ, волога).

Приплив свіжого повітря відбувається через вікна, двері, спеціальні шахти.

Типовим є проект вентиляційного устаткування "Клімат" [1, 5]. Станція керування забезпечує плавне регулювання частоти обертання асинхронних електродвигунів витяжних вентиляторів для автоматичного підтримання температури повітря у приміщеннях. Пристрій містить тиристорний регулятор напруги з цифровою системою керування на інтегральних мікросхемах, який забезпечує плавну зміну вихідної напруги за принципом фазового регулювання залежно від значення температури повітря в приміщенні. У силовому блоці встановлено шість силових тиристорів, захисні RC-ланцюжки, трансформатори системи керування, вузол захисту від перенапруги. Давачами температури є термоперетворювачі типу ТСМ, що розподілені по довжині приміщення.

Функціональна схема пристрою наведена на рис. 6.6, де прийнято такі позначення: БР — блок регулятора, БП — блок перемикача, ТП — термоперетворювачі, БС — блок силовий, БУ — блок керування, ИП — джерело живлення, СРС — система регулювання та сигналізації, СІФУ — система імпульсно-фазового керування, УИ — підсилювач імпульсів.

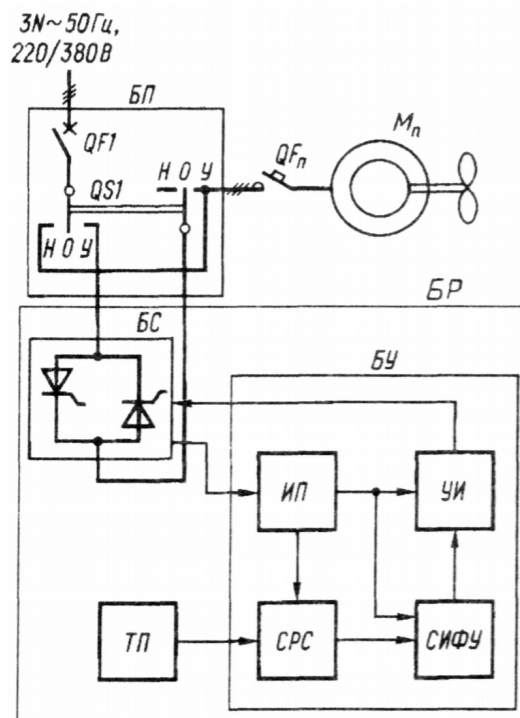


Рис. 6.6. Функціональна схема пристрою

Структурна схема системи регулювання та сигналізації наведена на рис. 6.7. Вона містить вимірювальний міст, в плече якого увімкнені термоперетворювачі. Для балансування моста в разі під'єднання різної кількості термоперетворювачів, а також для забезпечення постійного значення чутливості за рахунок підтримання постійного значення напруги живлення моста, слугує вузол Д.

Задавачем температури УТ є перемикач діапазону та резистор "Установлення температури"; УТ дозволяє виконувати установлення температури від 0°C до 40°C. Діапазон зміни температур задає блок перемикачів з позначками "0°C", "10°C", "20°C", "30°C".

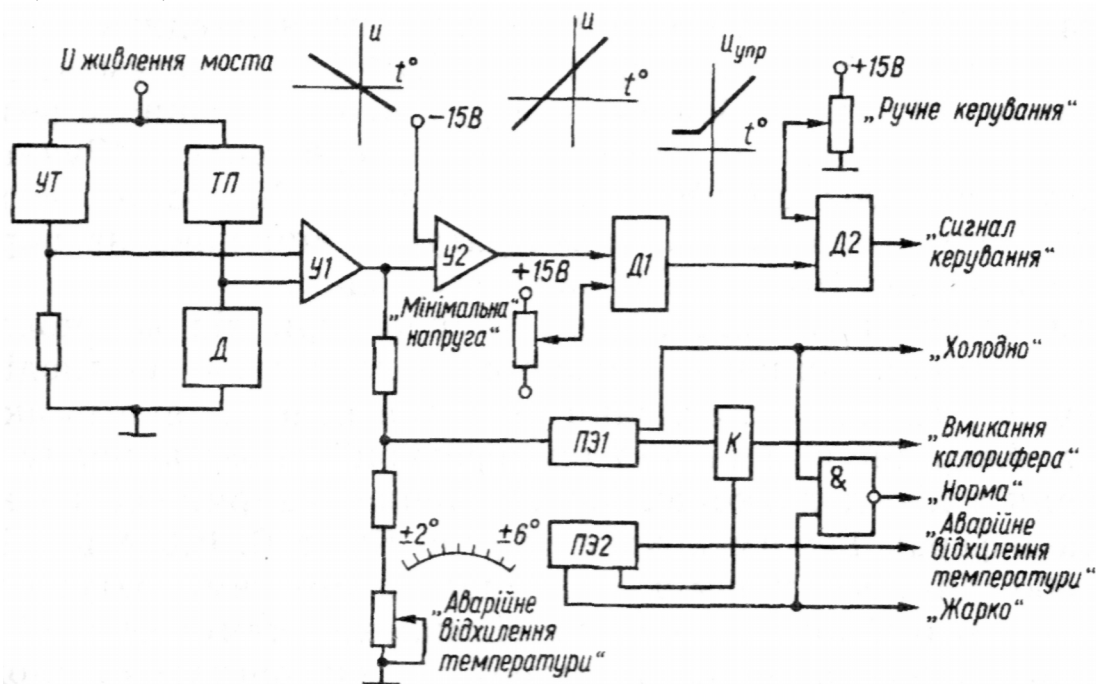


Рис. 6.7. Структурна схема системи регулювання та сигналізації

Робоча характеристика пристрою (рис. 6.8) визначає залежність вихідної напруги $U_{вих}$ від відхилення температури Δt відносно встановленого значення для підтримання оптимальної роботи пристрою. Величина $U_{вих.min}$ задається резистором "Мінімальна напруга" і визначається з умов мінімально допустимого повітрообміну.

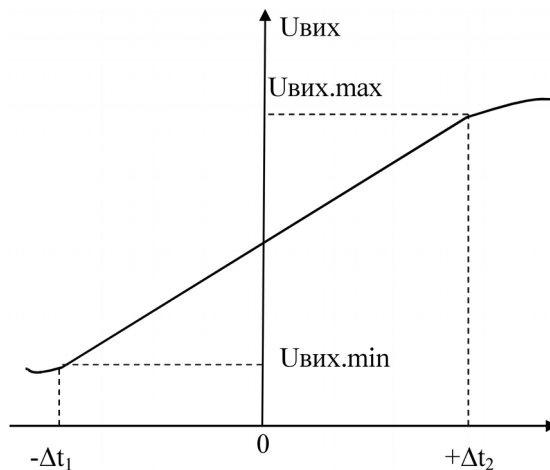


Рис. 6.8. Робоча регульовальна характеристика

Сигналізація "Жарко", "Норма", "Холодно", а також "Аварійне відхилення температури" виконана на порогових елементах та світлодіодах.

У схемі станції використано два терморегулятори, один з яких контролює температуру всередині приміщення за трьома позиціями "Вище норми", "Норма", "Нижче норми", а другий — температуру зовнішнього середовища за межами приміщення, за тими самими трьома позиціями. За співвідношенням позицій терморегуляторів всередині приміщення і ззовні виробляється сигнал для подачі відповідної напруги на електроventильатори. Наприклад, ступеням швидкості від першої до шостої відповідають напруги 70, 90, 110, 160, 220, 380 В.

6.4. Комплектні пристрої керування помповими установками

Установки водопостачання об'єктів сільськогосподарського виробництва, як правило, надходять у вигляді комплектів устаткування: електропомпа, станція керування, давачі, спеціальні проводи тощо.

Так, комплектний пристрій "Каскад" залежно від типу керування виконує такі функції [1, 5]:

- автоматичний пуск і зупинку електропомпи водопідйому (В) та дренажу (Д) залежно від рівня води відповідно у водонапірному баку або дренажній свердловині;

- автоматичний пуск електропомпи в режимі водопідйому залежно від тиску стовпа води у водонапірній башті та автоматичну зупинку помпи в цьому режимі протягом часу, що заданий (від 5 до 90 хв);

- дистанційний пуск і зупинку електропомпи;

- місцевого та автоматичного керування за рівнем води;

- захист електродвигуна від перевантажень, коротких замикань та неповнофазних режимів;

- захист електродвигуна від "сухого ходу" для пристроїв керування двигунами потужністю 4,5 кВт і вище;

- запам'ятовування аварії, тобто неможливість самовмикання після спрацювання будь-якого захисту;

- світлову сигналізацію з розшифруванням аварійної зупинки від перевантаження та "сухого ходу";

- самозапуск електропомпи при короткочасному зникненні і відновленні напруги мережі у межах 2...30 с.

На функціональній схемі пристрою (рис. 6.9) основні блоки позначені: ЯП — система живлення; ЯЗ — система захисту; ЯУУ — система керування за рівнем води; ЯУД — система керування за тиском; ВУ-ЯЗ — вихідний пристрій системи захисту; ДДВ — давач тиску води; ДСХ — давач "сухого ходу".

Вибір режимів керування помповою установкою здійснюється перемикачем SA2, який має чотири положення: АУ — автоматичне керування, ДУ — дистанційне керування, МУ — місцеве (ручне) керування з двома позиціями "Ввімк." та "Вимк."

6.5. Автоматизовані системи контролю і управління енергоспоживанням

Автоматизована система контролю і управління енергоспоживанням (АСКУЕ) крім контролю та обліку енергоспоживання має функції управління технологічними процесами енергоспоживання і вироблення електроенергії нетрадиційними (відновлювальними) джерелами енергії.

Контроль за електроспоживанням дає змогу оцінити динаміку енергоспоживання протягом доби, тижня, місяця, та являється вихідною інформацією для вирішення задач автоматизованого управління енергоспоживання за допомогою АСКУЕ. Для програмно-технічного комплексу АСКУЕ слугує система на основі процесора 80486DX (рис. 6.10).

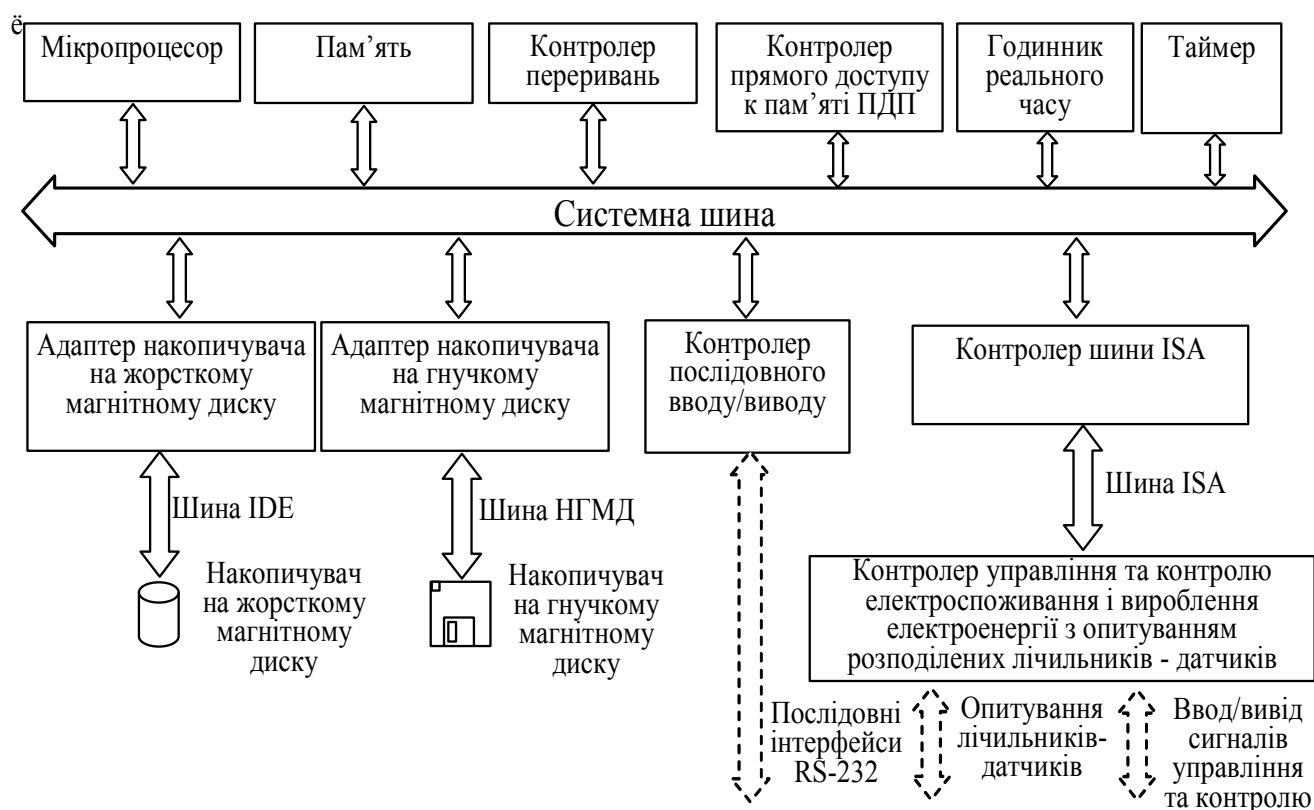


Рис. 6.10. Структурна схема програмно-технічного комплексу АСКУЕ

Для забезпечення операцій вводу/виводу, опитування матриці лічильників-давачів, необхідний спеціалізований контроллер. Для зв'язку з програмно-технічним комплексом АСКУЕ існує кілька варіантів стандартних інтерфейсів: порти, шини ISA, PCI та інтерфейс USB.

Програмно-технічний комплекс АСКУЕ містить ПЕОМ з шиною ISA та контроллер (рис. 6.11), який використовує 8-бітний режим програмної адресації до портів вводу/виводу [5].

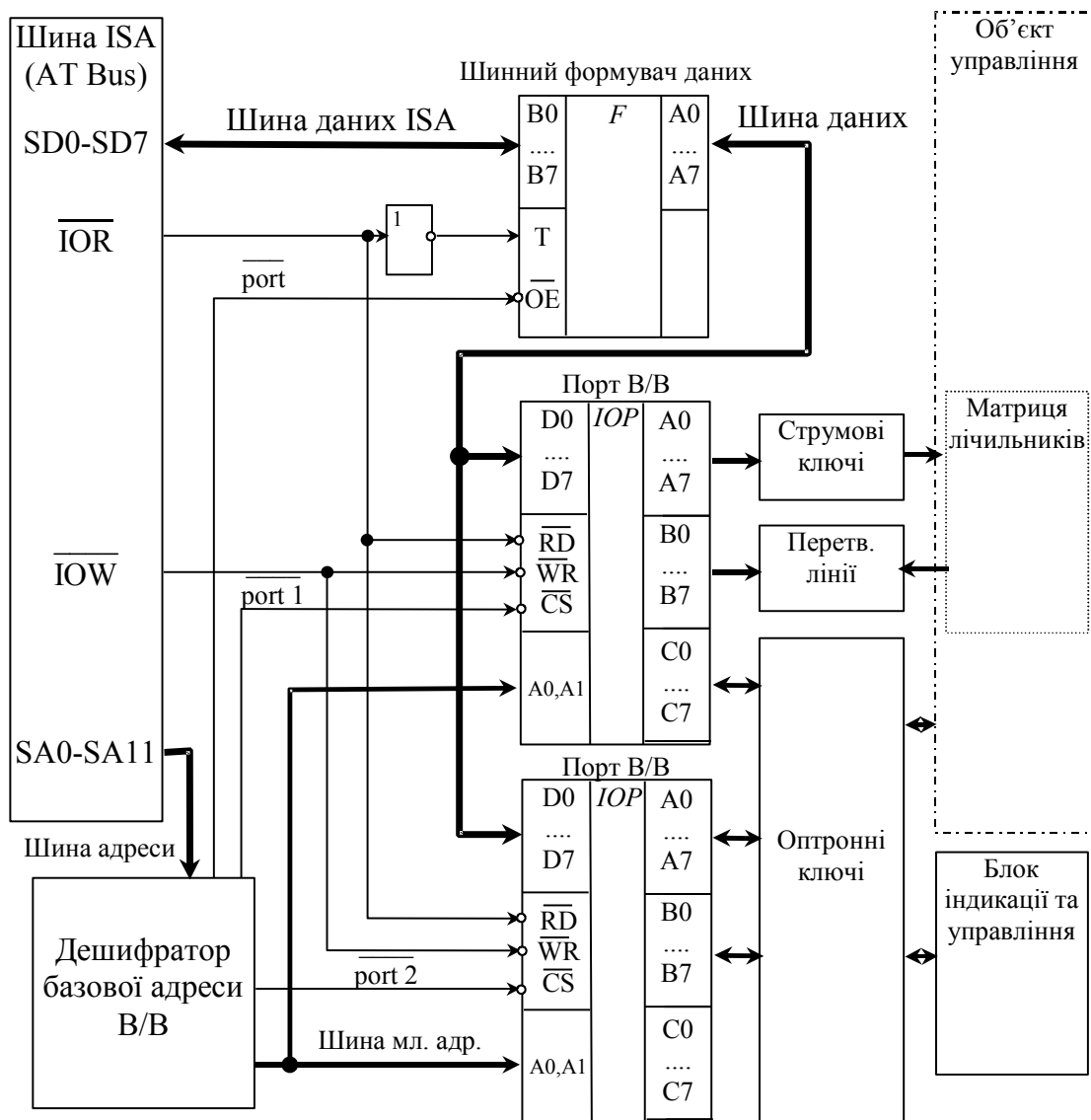


Рис. 6.11. Структурна схема контролеру управління та контролю енергоспоживання в складі програмно-технічного комплексу АСКУЕ

Доступ до портів вводу/виводу здійснює процесор у режимі програмного вводу/виводу, для виконання операцій у реальному часі використовується переривання від таймеру.

Сигнал на вході T шинного формувача, показує напрямок передачі інформації (при нульовому логічному рівні, передача здійснюється в напрямку $A > B$, а інакше, у напрямку $A < B$).

Сигнали IOR та IOW видає на шину ISA центральний процесор для доступу до порту (IOR - читання порту, IOW - запис у порт), адреса якого встановлюється на шині адреси ($SA0-SA11$).

Інформаційний зв'язок між операціями реального часу і програмою-супервізором, виконується за допомогою трьох динамічно змінюваних потокових буферів (рис 6.12). Програма-супервізор забезпечує сумісну роботу різних моделей і об'єктів, за допомогою інформаційних об'єктно-орієнтованих повідомлень.

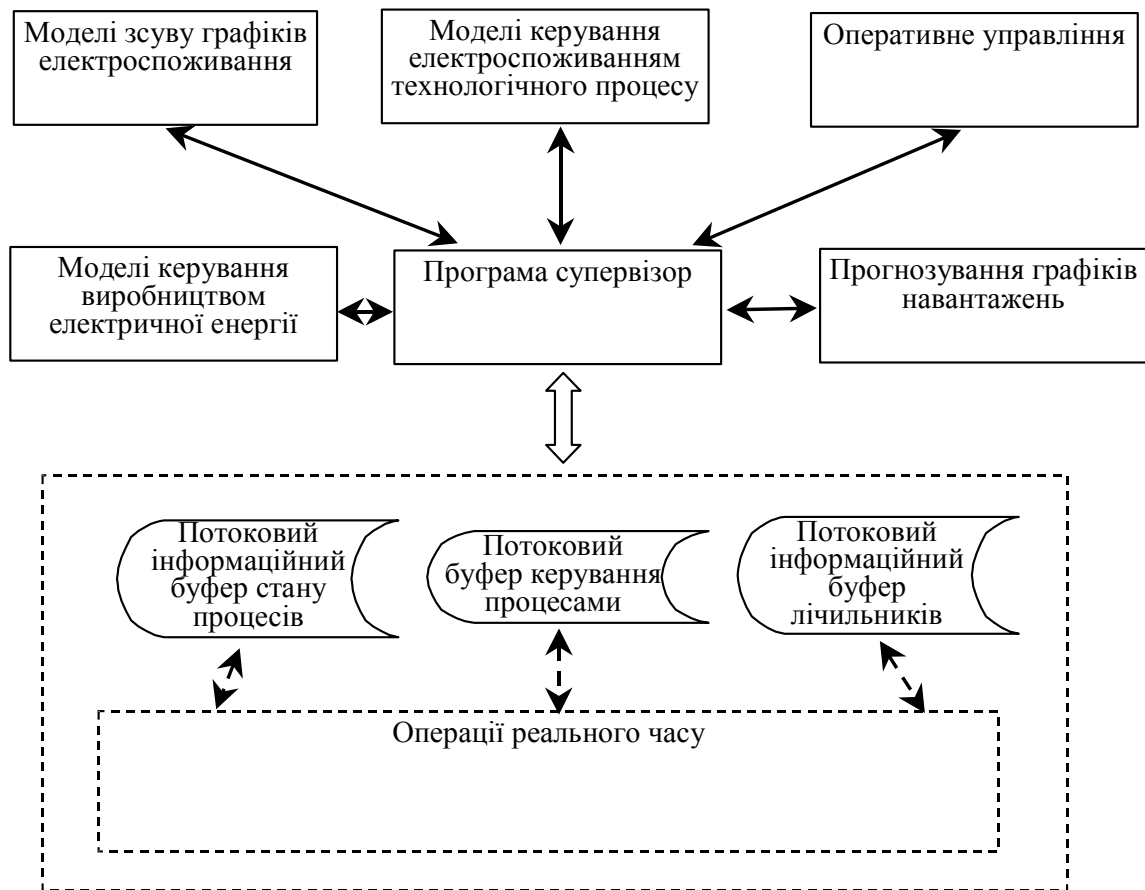


Рис. 6.12. Взаємодія моделей і об'єктів в програмному забезпеченні АСКУЕ

Для виконання критичних операцій вводу/виводу в реальному часі використовують апаратне переривання від таймеру (рис. 6.13).

Розроблений програмно-апаратний комплекс контролю, обліку і управління енергоспоживанням для сільськогосподарського виробництва виконує функції:

- технічний і комерційний облік перетоків електроенергії;
- управління технологічним процесом;
- управління нетрадиційними джерелами енергії тощо.

Пропонована схема програмно-апаратного комплексу забезпечує наступні технічні можливості:

- прийом інформації про електроспоживання, та вироблення електроенергії нетрадиційними джерелами живлення, що надходить від первинних вимірювальних перетворювачів з імпульсним виходом, з частотою імпульсів до 10 Гц (кількість каналів обліку 64);
- одержання інформації про поточний стан керованого об'єкта (16 каналів);
- формування керуючих сигналів по 16 каналам.

АСКУЕ енергоспоживанням забезпечує виконання наступних функцій:

- 1) Багатотарифний комерційний і технічний облік перетоків електроенергії.
- 2) Одержання інформації про поточний стан керованого об'єкта чи джерела енергії.
- 3) Формування керуючих сигналів для управління енергоспоживаючими об'єктами й альтернативними джерелами енергії.

- 4) Збереження, обробка і резервне архівування отриманої інформації про режими електроспоживання, захист інформації від несанкціонованого доступу.
- 5) Високорівневий діалог з оператором.
- 6) Передача і прийом інформації по лініям зв'язку чи по локальній мережі, при роботі в складі багаторівневої автоматизованої системи обліку, контролю і управління енергоспоживанням.

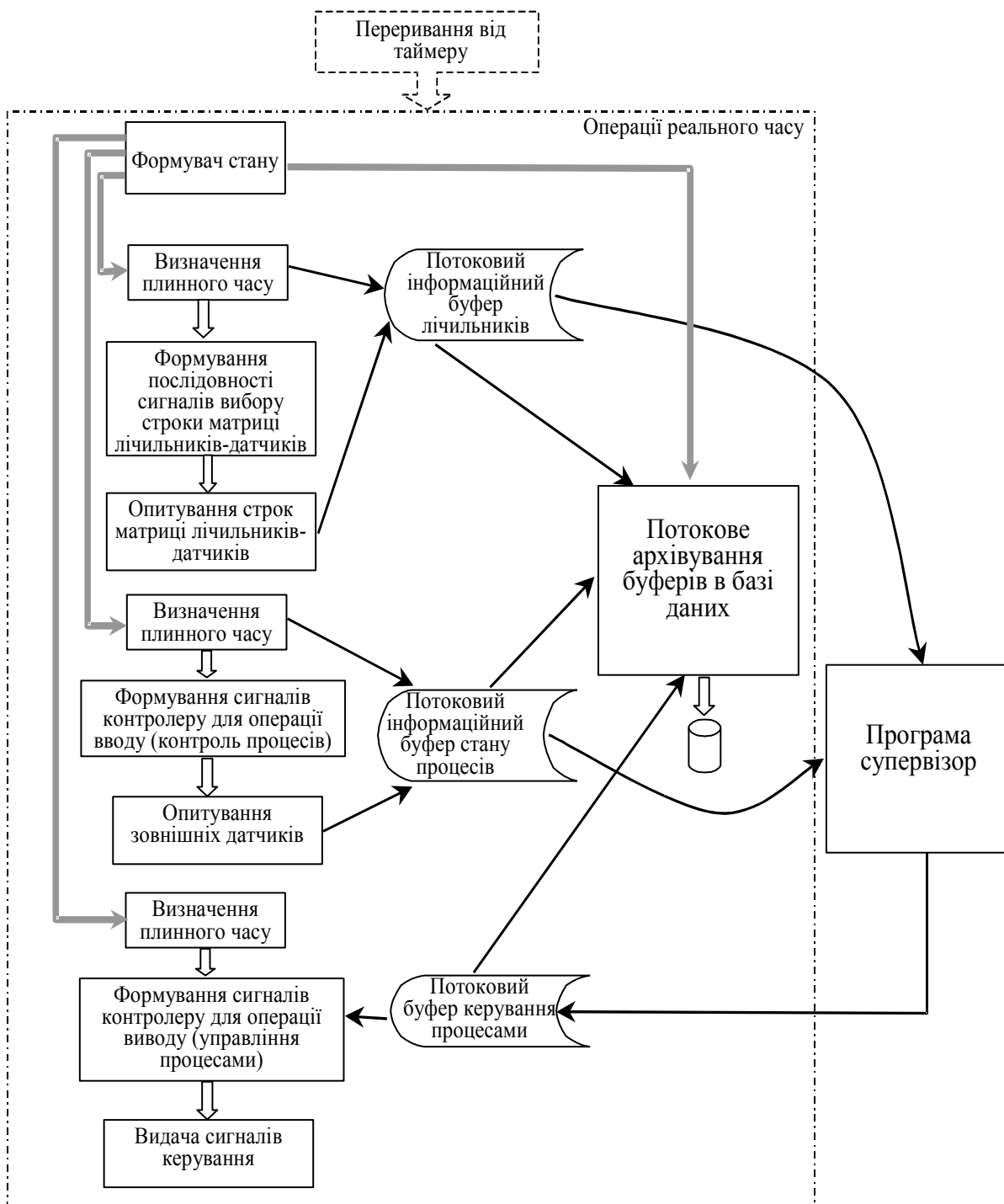


Рис. 6.13. Взаємодія операцій реального часу з програмою-супервізором

ЛІТЕРАТУРА

1. Електропривод сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній: Підручник / Є.Л. Жулай, Б.В. Зайцев, Н.М. Лавріненко, О.С. Марченко, Д.Г. Войтюк / За ред. Є.Л. Жулай – К.: Вища освіта, 2001. – 288 с.
2. Колб А.А., Колб А.А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. - Д., Національний гірничий університет, 2006. - 511 с.
3. Основи електроприводу: методичні вказівки до курсового проекту для студентів IV курсу денної форми навчання / Укл.: С. В. Серебренніков, С. П. Плешков, О. А. Козловський. Кіровоград: КНТУ, 2007. – 122 с.
4. Вещневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. - М, Энергия, 1977 - 432 с.
5. Плешков С.П., Віхрова М.С., Рибаківа Л.В. Автоматизований електропривод та системи управління технологічними процесами у сільськогосподарському виробництві: Навчальний посібник. - Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2009. – 162 с.
6. Промислова електроніка. Підручник / В. С. Руденко, В. Я. Ромашко, В. В. Трифонюк. - К.: Либідь, 1993. - 432 с.
7. Диоды: Справочник / О. П. Григорьев, В. Я. Замятин, В. В. Кондратьев, С. Л. Пожидаев. - М.: Радио и связь, 1990. - 336 с.
8. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. / [Соловей О. І., Розен В. П., Плешков П.Г. та ін.]; М-во освіти і науки України, Кіров. нац. техн. ун-т. – Черкаси: вид. Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.
9. Енергоощадження засобами промислового електропривода: навч. посібник / О. М. Закладний, А. В. Праховник, О. І. Соловей. – К.: Кондор, 2005. – 408 с.
10. Копытов Ю. В. Экономия электроэнергии в промышленности: справочник / Ю. В. Копытов, Б. А. Чуланов. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 112 с.
11. Гончар В.Ф. Електрообладнання і автоматизація сільськогосподарських агрегатів і установок. – К.: Вища шк., 1985. – 207 с.
12. Електропривод. Підручник / за ред. Лавриненка Ю.М. – К.: Ліра. – 2009. – 540 с.
13. Основи електроприводу: методичні вказівки до лабораторних робіт / Укл.: С. В. Серебренніков, О. А. Козловський. – Кіровоград: КДТУ, 2003. – 85 с.
14. Телемеханіка та автоматизовані системи управління в електроенергетиці: навч. посіб. / [Плешков П.Г., Серебренніков С.В., Петрова К.Г.]; М-во освіти і науки України, Кіров. нац. тех. ун-т. – Кіровоград : КНТУ, 2016. – 167 с.
15. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. – М.: Высшая школа, 2000. – 290с.