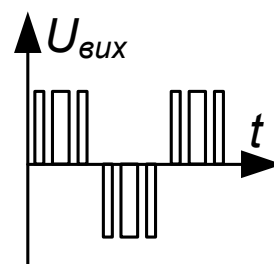
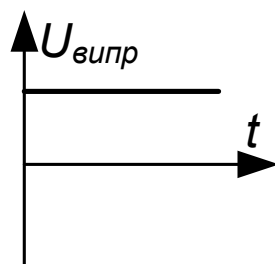
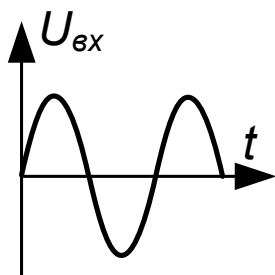
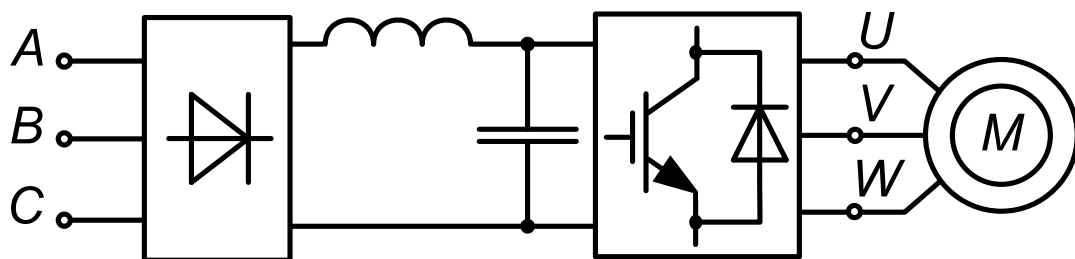


НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

НІЖИНСЬКИЙ АГРОТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ЧАСТОТНЕ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ПРИВОДОМ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ



УДК 62-83.01(076.5)

Рекомендовано до видання Вченою Радою Відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування України „Ніжинський агротехнічний інститут” (протокол № 3 від 27 жовтня 2011 року)

Укладачі: Ловеїкін В.С., Ромасевич Ю.О.

Рецензенти: **Човнюк Ю.В.**, к.т.н., доц., доцент кафедри конструювання машин Технічного навчально-наукового інституту Національного університету біоресурсів і природокористування України;

Кушніренко А.Г., к.т.н., доц., доцент кафедри автоматизації та електрифікованих технологій в аграрному виробництві відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування України „Ніжинський агротехнічний інститут”.

ЧАСТОТНЕ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ПРИВОДОМ:
Методичні вказівки для самостійної роботи з дисципліни „Основи електропривода” для студентів напряму підготовки 6.100101 – „Енергетика та електротехнічні системи в АПК” / Ловеїкін В.С., Ромасевич Ю.О. – Ніжин.: 2011. – 98 с.

Приведено матеріал по вивченню електромеханічних властивостей асинхронного двигуна, способів регулювання його швидкості. Описані основні показники регулювання швидкості електроприводу. Викладено загальні характеристики та принципи дії частотного перетворювача зі скалярним та векторним керуванням, вказані додаткові пристрої для частотно-керованого приводу, а також наведено методику вибору перетворювачів частоти.

ВСТУП

За останні роки асинхронний регульований електропривод зазнав істотних змін, витіснивши з багатьох галузей виробництва традиційний привод постійного струму а також синхронний привод. Частотне керування приводом стало свого роду технічним стандартом. Практично вийшли з використання такі способи регулювання асинхронного приводу: зміною числа пар полюсів, введенням додаткових опорів у коло ротора, зміною напруги живлення двигуна тощо. Таке широке розповсюдження частотно-керований привод отримав завдяки досягненням у області силової електроніки і мікропроцесорної техніки. Саме на основі силових транзисторів з ізольованим затвором побудовані сучасні перетворювачі частоти (ПЧ) напругою до 1000 В. Таке поєднання асинхронного двигуна (АД) та ПЧ дало змогу отримати високі енергетичні та динамічні показники регулювання приводу.

Важливим питанням у сфері проектування та експлуатації електроприводу є енергозбереження. Основним споживачем електроенергії є електропривод (більше 60 %) і саме на нього звернута головна увага світової технічної громадськості, яка працює в сфері енергозбереження. Розглянемо докладніше об'єкт енергозбереження - електропривод. Всі електроприводи за винятком численних малопотужних (до 1 кВт) електроприводів побутової техніки можна умовно розділити на дві великі групи [1].

Перша – це електроприводи, що обслуговують технологічні процеси з „тонким” керування технологічними координатами, наприклад прокатні стани, металообробні верстати, роботи тощо. До цієї групи відносяться не більше 10% всіх електроприводів.

Друга група використовується в простих агрегатах: насосах, вентиляторах, транспортерах, конвеєрах тощо. Зазначимо, що переважна більшість електроприводів цієї групи працює в сільськогосподарському виробництві. Цій групі донедавна приділялося мало уваги, тому що в подібних агрегатах звичайно використовуються найпростіші електроприводи з не завжди правильно вибраними двигунами, але саме в цій групі існує величезний резерв енерго- і ресурсозбереження. Це пов'язано, головним чином, з об'єктивно існуючим протиріччям: переважна більшість таких електроприводів (більше 95%) нерегульовані, а технологічні процеси, що обслуговуються ними, як правило, потребують регулювання яких-

небудь технологічних координат: швидкості, тиску, витрати, температури тощо. Це регулювання здійснюється енергетично неефективно й приводить до великих втрат енергії, породжує недосконалість самого технологічного процесу – знижує його продуктивність і надійність, а також якість продукту. Характерним прикладом може бути широко використовуваний нерегульований асинхронний електропривод насосних станцій водопостачання. У більшості випадків він створює надлишковий напір, тобто підводить до гідравлічної системи зайву потужність. За некорисно витрачену енергію платить споживач. Крім того, надлишковий напір приводить, за рахунок зростання витоків, до більших втрат води, гідравлічних ударів при пуску системи, розривів труб. Аналогічні наслідки застосування найпростішого електропривода можна виявити в багатьох технологічних процесах сільськогосподарського виробництва.

Сучасні системи частотного керування асинхронними електроприводами розділяють на скалярні й векторні. При помірних вимогах до динамічних показників і діапазону регулювання швидкості, що характерно для більшості сільськогосподарських механізмів, використання скалярних систем частотного керування є розумним технічним рішенням (вентилятори, насоси тощо). У той же час в електроприводах з високими вимогами до динаміки застосовують векторні системи керування (наприклад, підйомно-транспортні, кормоприготувальні машини, обкатувальні стенди двигунів внутрішнього згорання тощо).

Для розуміння перспектив розвитку електроприводу вкажемо основні, найбільш виражені сучасні тенденції у цій сфері, які ґрунтуються на аналізі продукції провідних світових виробників систем привода і матеріалів опублікованих наукових досліджень [2]:

- знижується частка систем привода із двигунами постійного струму й збільшується частка систем привода із двигунами змінного струму. Це пов'язано з низькою надійністю механічного колектора і високою вартістю двигунів постійного струму в порівнянні із двигунами змінного струму. За прогнозами фахівців на початку наступного сторіччя частка приводів постійного струму скоротиться до 10% від загального числа приводів;
- швидко збільшується частка частотно-керованих електроприводів за рахунок значного зниження вартості ПЧ;
- приводом наступного століття, за прогнозами більшості фахівців, стане привод на основі вентильно-індукторного двигуна. Двигуни

цього типу прості у виготовленні, технологічні й дешеві. Разом з тим, високі динамічні та енергетичні властивості привода можуть бути забезпечені тільки при застосуванні потужної мікропроцесорної системи керування в сполученні із сучасною силовою електронікою. Зусилля багатьох розробників у світі сконцентровані в цій області;

- ускладнення структур керування приводами вимагає різкого збільшення продуктивності центрального процесора й переходу до спеціалізованих процесорів зі специфічними системами команд, адаптованими до вирішення завдань цифрового регулювання в реальному часі. Ряд фірм (Intel, Texas Instruments, Analog Devices) випустили на ринок нові мікроконтролери для керування двигунами на базі процесорів для обробки сигналів (DSP-мікроконтролери). Вони не тільки забезпечують необхідну продуктивність центрального процесора (більше 20 мільйонів операцій на секунду), але й містять ряд вбудованих периферійних пристроїв, призначених для оптимального сполучення контролера з іншими елементами ПЧ (інвертор, генератор періодичних сигналів);
- ріст обчислювальних можливостей вбудованих систем керування приводами супроводжується розширенням їхніх функцій (основні функції сучасних ПЧ описані у 5 розділі);
- перспективні системи керування електроприводами розроблюються з орієнтацією на комплексну автоматизацію технологічних процесів. Сучасні розробки направлені на „злагоджену” роботу декількох приводів у складі промислової мережі, керування якою виконує контроллер або керуюча ЕОМ високого рівня. Найбільш перспективні типи інтерфейсів: RS-485, CAN;
- прагнення максимально здешевити привод привело до відмови від електромеханічних датчиків і переходу до систем бездатчикового керування, де для оцінки координат привода (положення, швидкість, струм) використовуються спеціальні цифрові спостерігачі. Це можливо тільки при високій продуктивності центрального процесора, коли система диференціальних рівнянь (математична модель АД), що описують зміну показників привода, може бути розв’язана в реальному часі;
- основні фінансові витрати при розробці систем керування приводами припадають не на створення апаратної частини

контролера, а на розробку алгоритмічного й програмного забезпечення. Тому роль фахівців в області теорії електропривода істотно зростає.

Отже, широке розповсюдження частотно-керованого асинхронного електроприводу є наслідком розвитку та детальної розробки деяких теоретичних та прикладних питань керування електроприводом. Частотний привод займає зараз домінуючі позиції у сфері регульованого приводу, однак, у подальшому його замінять більш досконалі розробки.

Метою даної методичної розробки є ознайомлення студентів з сучасним станом розвитку частотно-керованого асинхронного електроприводу. У методичних вказівках викладено опис основних електротехнічних та механічних властивостей найпоширенішого у сільському господарстві АД, приведено способи його регулювання та вказані характеристики цих способів з точки зору загальних показників якості регулювання приводу. Крім того, приведена інформація про принцип дії ПЧ зі скалярним та векторним керуванням, вказані додаткові пристрої для частотно-керованого приводу, а також наведено методику вибору ПЧ.

1. ВЛАСТИВОСТІ Й ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

1.1. Теоретичні основи роботи асинхронного двигуна

Приведемо короткі відомості про АД, необхідні для розуміння їхніх основних властивостей і характеристик.

Загальний вигляд асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (АДКЗ) показаний на рис. 1.1. У пазах статора розміщена обмотка, що утворює фазні зони, зсунуті в просторі на 120 електричних градусів. При підключенні обмотки статора до трифазної мережі, напруги фаз якої зсунуті на 120°, виникає магнітне поле, що обертається у статорі з кутовою швидкістю:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} \quad (1.1)$$

де ω_0 - швидкість ідеального холостого ходу АД, рад/с; f_1 - частота мережі, Гц; p - число пар полюсів.

Частота обертання поля статора у обертах за хвилину n_0 визначається за формулою:

$$n_0 = \frac{60f_1}{p}. \quad (1.2)$$

Для стандартної частоти $f_1 = 50$ Гц вона залежить від конструкції машини й може становити 3000, 1500, 1000, 750, 600 об/хв.

У пазах короткозамкненого ротора закладені металеві стержні (обмотка ротора), з'єднані по кінцях, вони утворюють „білячу клітку”. При обертанні ротора зі швидкістю поля $\omega = \omega_0$ (ідеальний холостий хід) у його стержнях не наводиться ЕРС, не протікає струм, не створюється електромагнітний момент. Прикладена до обмоток напруга U_1 , врівноважується ЕРС самоіндукції E_1 :

$$E_1 = 4,44\Phi w_1 f_1 k_{об}, \quad (1.3)$$

де Φ - магнітний потік АД; w_1 - число витків фази; $k_{об}$ - конструктивний обмотувальний коефіцієнт.

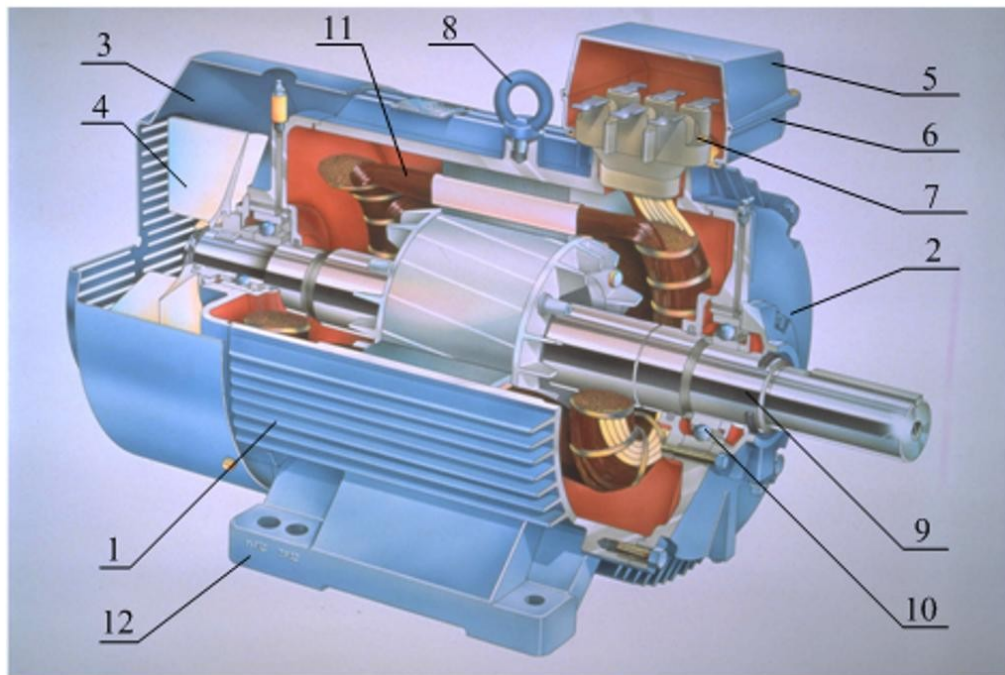


Рис. 1.1. Будова АДКЗ

На рис. 1.1: 1 - статор; 2 - підшипниковий щит; 3 - кришка вентилятора; 4 - вентилятор; 5 - кришка; 6 - клемна коробка; 7 - клемна панель; 8 - рем-болт; 9 - ротор; 10 - підшипник; 11 – обмотка статора; 12- лапи.

Струм в обмотці статора при швидкості ідеального холостого ходу - струм намагнічування I_μ - витрачається на створення магнітного поля й визначається з кривої намагнічування машини $\Phi = f(I_\mu)$ (рис. 1.2), звичайно $I_\mu = (0,35 \dots 0,40) I_{ном}$.

Якщо на вал двигуна прикласти зовнішній момент навантаження M_c ротор починає відставати від обертового поля статора, тобто $\omega \neq \omega_0$, у його стержнях наводиться ЕРС і протікає струм, що, взаємодіючи з магнітним полем, створює електромагнітний момент M , який врівноважує момент навантаження M_c .

Різниця швидкостей ω_0 і ω характеризується ковзанням s :

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{n_0 - n}{n_0}, \quad (1.4)$$

через яке можна визначити частоту струму в роторі f_2 :

$$f_2 = f_1 s. \quad (1.5)$$

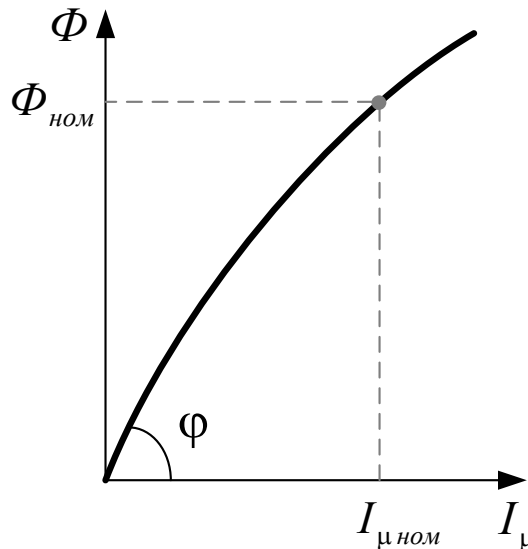


Рис. 1.2. Крива намагнічування АД

Для аналізу процесів в АД звичайно використовують схему заміщення, побудовану для однієї фази (рис. 1.3) [3]. Ця схема справедлива при таких припущеннях: параметри двигуна постійні; насичення магнітного ланцюга не впливає на реактивні опори обмоток статора X_1 й ротора X_2' ; струм намагнічування є постійним і не залежить від навантаження; вплив вищих гармонійних МРС не враховується.

Найпростіша схема заміщення з контуром намагнічування X_μ , винесеним на затискачі, показана на рис. 1.3. У цій схемі:

R_1 , R_2' - первинний (статорний) та вторинний (роторний) приведені активні опори;

X_1 , X_2' - первинний та вторинний приведені індуктивні опори розсіювання;

X_μ - індуктивний опір контуру намагнічування;

I_1 , I_2' , I_μ - відповідно струм статора, приведений струм ротора й струм намагнічування;

U_1 - діюче значення фазної напруги мережі.

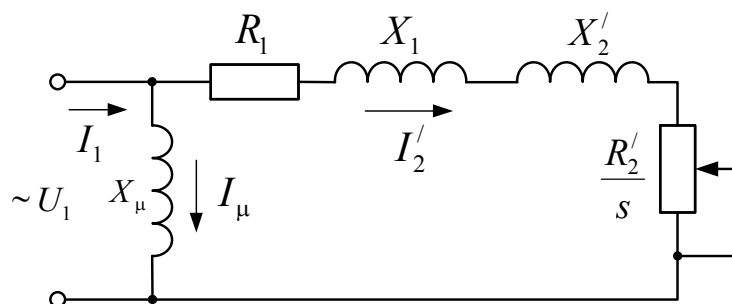


Рис. 1.3. Схема заміщення однієї фази АД

Схема заміщення дозволяє на якісному рівні оцінити вид основних характеристик двигуна, тобто залежностей I'_2 і M від ковзання s (рис. 1.4).

Відповідно до схеми заміщення АД приведений струм ротора:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad (1.6)$$

Вираз (1.6) є рівнянням електромеханічної характеристики (ЕМХ) АД.

Відмітимо, що крива $I_1 = f(s)$ практично повторює залежність $I'_2 = f(s)$, тому що спрощена схема заміщення припускає сталість струму намагнічування I_μ при незмінній напрузі U_1 (рис. 1.4), отже:

$$I_1 = I'_2 + I_\mu. \quad (1.7)$$

На рис. 1.4. штриховою лінією чорного кольору показана залежність струму статора від ковзання двигуна. Як видно з графіка ця характеристика знесена вправо на величину струму намагнічування I_μ , що відповідає рівнянню (1.7).

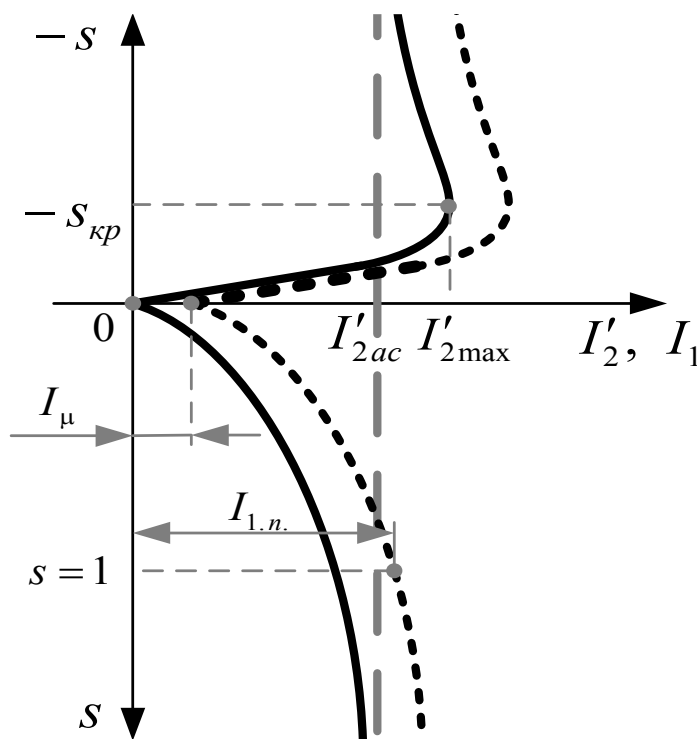


Рис. 1.4. ЕМХ АД

Проаналізуємо характерні ділянки ЕМХ:

1. $\omega = \omega_0, s = 0, I'_2 = 0, I_1 = I_\mu$ - точка ідеального холостого ходу (струм ротора дорівнює нулю, струм статора найменший і дорівнює струму намагнічування);

2. $\omega = 0, s = 1, I'_2 = I'_{2.n.}, I_1 = I_{1.n.}$ - режим короткого замикання, де $I'_{2.n.} = I'_{2.к.з.}, I_{1.n.} = I_{1.к.з.}$ - відповідно пусковий струм ротора та статора (струм короткого замикання). Знайдемо пусковий струм статора АД відповідно до виразів (1.6) та (1.7):

$$I_{1.n.} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} + I_\mu. \quad (1.8)$$

Пусковий струм статора – це важлива каталожна величина для АД. З виразу (1.9) видно, що пусковий струм статора можна зменшити, якщо у момент пуску до обмоток статора АД прикладати знижену напругу живлення U_1 , або збільшити опір у колах статора R_1 чи ротора R'_2 :

3. $\omega \rightarrow -\infty, s \rightarrow \infty, I'_2 \rightarrow I'_{2.ac}, I_1 = I_{1.ac}$ - режим гальмування противмиканням. Зі збільшенням ковзання крива ЕМХ ротора наближається до асимптоти (показана на рис. 1.4. вертикальною штриховою лінією сірого кольору):

$$I'_{2.ac} = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}. \quad (1.9)$$

Вираз для $I_{1.ac}$ можемо отримати додаванням $I'_{2.ac}$ та струму намагнічування I_μ ;

4. $\omega \rightarrow \infty, s \rightarrow -\infty, I'_2 \rightarrow I'_{2.ac}, I_1 = I_{1.ac}$ - режим рекуперативного гальмування. Тут $I'_{2.ac}$ визначається за формулою (1.9);

5. $\omega = \omega_0(1 + R_1 / R'), s = -R_1 / R'_2, I'_2 \rightarrow I'_{2.max}, I_1 = I_{1.max}$ - максимальне значення струму ротора і відповідно статора при рекуперативному гальмуванні:

$$I'_{2.max} = \frac{U_1}{X_1 + X'_2}. \quad (1.20)$$

Вираз (1.20) легко знайти, дослідивши функцію (1.6) на екстремум.

Рівняння механічної характеристики (МХ) може бути отримане на основі балансу потужностей в колі ротора. Для цього знайдемо втрати потужності у колі ротора, які визначаються за відомою формулою Джоуля-Ленца (для трьох фаз ротора):

$$\Delta P_2 = 3I_2'^2 R_2'. \quad (1.21)$$

Вираз для ΔP_2 можна знайти іншим способом. Втрати потужності у роторі визначаються різницею між електромагнітною потужністю P_1 (потужність, яка споживається з мережі) та корисною механічною потужністю P_2 (потужність на валу двигуна):

$$\Delta P_2 = P_1 - P_2 = M\omega_0 - M\omega = M\omega_0 s, \quad (1.22)$$

де M - момент на валу двигуна. З виразів (1.21) і (1.22) можемо записати [4]:

$$M = \frac{3I_2'^2 R_2'}{\omega_0 s} = \frac{3U_1^2 R_2'}{\omega_0 s \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]}. \quad (1.23)$$

Варто відмітити квадратичну залежність моменту на валу АД від величини напруги живлення. Оскільки електропостачання сільського господарства характеризується значною протяжністю ліній електропередач та невеликою потужністю силових трансформаторів то напруга живлення АД може змінюватись значно, що впливає на момент, який розвивається двигуном. Якщо двигун вибраний неправильно, то падіння напруги живлення може призвести до зупинки двигуна, який працює під навантаженням.

З виразу (1.23) видно, що момент АД є складною функцією ковзання й має два максимуми при додатному та від'ємному ковзанні. Для знаходження максимуму моменту необхідно взяти похідну по s з (1.23), прирівняти її нулю й розв'язати отримане квадратне рівняння (пропонуємо студентам самим виконати вказані розрахунки). Ковзання, при якому момент двигуна досягає максимального значення, називається критичним і для природної МХ дорівнює:

$$s_{кр} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (1.24)$$

Знак „+” ставиться для приводного режиму, а знак „-” для режиму рекуперативного гальмування (генераторний режим з віддачею енергії в мережу).

Для штучної (реостатної) МХ до чисельника дробу (1.24) необхідно додавати величину додаткового опору $R'_{2.\delta}$, який включений у коло ротора.

Підставивши в рівняння (1.23) значення $s_{кр}$ з (1.24), одержимо вираз для максимального (критичного) моменту:

$$M_{\max} = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right)}. \quad (1.25)$$

З наведеного виразу видно, що максимальний момент не залежить від додаткового опору, включеного в роторне коло. Зі зміною додаткового опору змінюється лише критичне ковзання, при якому на валу двигуна виникає максимальний (критичний) момент.

На рис. 1.4. суцільною лінією показана МХ АД (залежність моменту на валу двигуна від його швидкості або ковзання), штрихова лінія показує провал моменту при ковзанні $s \approx 0,85$ (це мінімальний момент АД). Виникнення провалу функції моменту на графіку МХ є наслідком впливу моментів створюваних вищими непарними гармоніками в магнітному полі обмоток.

Підставивши у вираз (1.23) $s = 1$ (момент пуску двигуна) можемо отримати формулу для пускового моменту:

$$M_n = \frac{3U_1^2 R_2'}{\omega_0 \left[(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]}. \quad (1.26)$$

Відмітимо, що пусковий момент двигуна залежить (у квадраті) від величини прикладеної напруги та від опору роторного кола. При значенні опору роторного кола $R_2' = \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}$ пусковий момент двигуна стає максимальним. Отже, підбором величини опору додаткового реостату включеного у коло ротора можна добитись пуску двигуна при максимальному моменті.

МХ АД можна описати наближеною формулою:

$$M = \frac{2M_{\max}(1 + s_{кр})}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} + 2s_{кр}}, \quad (1.27)$$

яка має назву рівняння Клосса. Для потужних двигунів можна скористатись спрощеним рівнянням Клосса, отриманим при допущенні, що $R_1 \approx 0$ (дійсно двигуни з $P_{ном} > 5 \text{ кВт}$ мають дуже малий активний опір статорних обмоток):

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}. \quad (1.28)$$

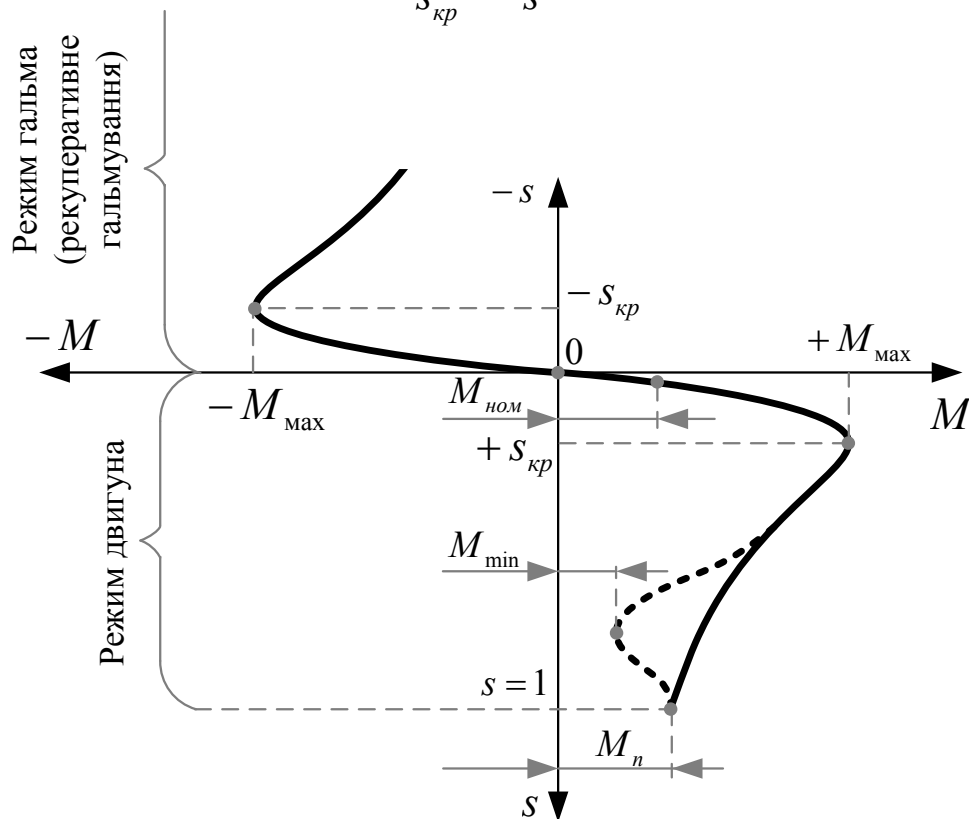


Рис. 1.5. МХ АД

МХ та ЕМХ АДКЗ також можна побудувати по паспортним (каталожним) даним двигуна.

В каталогах на АД звичайно наводять такі показники:

$U_{1номY} / U_{1ном\Delta}$ - номінальні напруги при з'єднанні обмоток по схемі „зірка” і „трикутник”, В;

$I_{1номY} / I_{1ном\Delta}$ - відповідні схемам з'єднань обмоток номінальні струми, А;

$f_{1ном}$ - номінальна частота мережі, Гц;

$P_{ном}$ - номінальна потужність на валу, кВт;

$n_{ном}$ - номінальна частота обертання, об/хв;

$\eta_{ном}$ - номінальний ККД;

$\cos\varphi_{ном}$ - номінальний коефіцієнт потужності;

$I_{\text{пуск}} / I_{\text{ном}}$ - кратність пускового струму;
 $M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}}$ - кратність пускового моменту;
 $M_{\text{мах}} / M_{\text{ном}}$ - кратність максимального моменту;
 $M_{\text{мін}} / M_{\text{ном}}$ - кратність мінімального моменту;
 $J_{\text{дв}}$ - момент інерції двигуна, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Деякі фірми, які виготовляють АД, приводять типові природні характеристики $n(M)$ і $n(I_1)$, а також $\eta(P_2)$ і $\cos\varphi(P_2)$.

Приведене вище відноситься до усталених режимів руху двигуна. Перехідні процеси - пуск, гальмування, зміна швидкості, збільшення та зменшення навантаження - підкоряються загальному рівнянню руху електропривода:

$$M - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.12)$$

де M - момент, який розвивається двигуном; M_c - момент створюваний навантаженням; J_{Σ} - сумарний момент інерції системи „двигун - механічна передача - робоча машина”.

1.2. Основні технічні характеристики асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором

1.2.1. Асинхронні двигуни серії 4АМ

Асинхронні трифазні двигуни серії 4АМ загального призначення виготовляють з висотами осі обертання від 50 до 250 мм. Порівняно з двигунами серії 4А вони мають менший на 5дБ рівень шуму, більший пусковий момент, в деяких типорозмірах поліпшені енергетичні характеристики. Шкала потужностей двигунів серії 4АМ відповідає шкалі потужностей двигунів серії 4А, їх установочно-приєднувальні розміри також збігаються.

Для виготовлення двигунів серії 4АМ застосовують електротехнічну сталь з меншими питомими втратами і більшою магнітною проникністю, нові стійкі проти дії теплоти та високоміцні ізоляційні матеріали, більш досконалу технологію, а також удосконалену систему вентиляції. Вони мають ступінь захисту IP44.

У двигунах цієї серії є такі відмінності: **1)** станина із поздовжніми горизонтально-вертикальними ребрами для двигунів з висотою осі обертання 132, 160 і частково 100 мм; **2)** проміжні станини меншої довжини порівняно із станинами двигунів серії 4А для шести- і

восьмиполюсних двигунів з висотою осі обертання 200 - 250 мм; **3)** застосовуються закриті підшипники типу 180000 з двостороннім ущільненням і закладеним на весь строк служби мастилом для двигунів з висотою осі обертання 160 та 180 мм; **4)** спрощена конструкція підшипникових вузлів з пристроями для поповнення мастила; **5)** збільшення кількості лопатей вентиляторів чотири-, шести- і восьмиполюсних двигунів з висотою осі обертання 160-250 мм до дев'яти та зменшення для них діаметра кожухів вентиляторів. Інші характеристики двигунів серії 4АМ і 4А збігаються. Умовні позначення двигунів серії 4АМ розшифровуються так:

<u>4АМ</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>XXX</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>XX</u>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

- 1 - серія;
- 2 - виконання за способом захисту від дії навколишнього середовища: Н - захищені; відсутність даного знаку означає закриті обдувні;
- 3 - виконання за матеріалом станини та щитів: А - станина та щити алюмінієві; Х - станина із алюмінію, підшипникові щити - чавунні; відсутність знаків означає, що станина і щити чавунні або сталеві;
- 4 - позначення електричної модифікації: С - з підвищеним ковзанням; Р - з підвищеним пусковим моментом; К - з фазним ротором; В - вбудовані;
- 5 - висота осі обертання, мм (дві або три цифри);
- 6 - установочний розмір за довжиною станини (S - коротка, М - середня, L - довга);
- 7 - довжина осердя статора (А або В) при збереженні установочного розміру. Відсутність літер вказує на наявність тільки однієї довжини осердя;
- 8 - кількість полюсів (2, 4, 6, 8 і 10);
- 9 - додатковий індекс - позначення спеціалізованого виконання двигуна: Х2 - стійкі проти дії хімічних речовин; С - сільськогосподарські; УП - пилозахищені; РЗ - для зубчастих мотор-редукторів; Ж - з подовженим кінцем вала для моноблочних насосів; Б - з вбудованим температурним захистом; Е - з вбудованим електро механічним гальмом; Н - малошумні;
- 10 - кліматичне виконання і категорія розміщення.

Поряд з двигунами загального призначення основного виконання в серії 4АМ передбачені модифікації та спеціалізовані виконання. Електродвигуни серії 4АМ загального призначення з висотами осі обертання 50 - 132 мм і 160 - 250 мм мають ізоляцію класу нагрівостійкості відповідно В і F. Двигуни надійно працюють при умовах: висота над рівнем моря не більше 1000 м; температура навколишнього середовища $-40 - +40^{\circ}\text{C}$; відносна вологість повітря при температурі $+25^{\circ}\text{C}$ до 93 %; запиленість повітря не більше 10 мг/м^3 для двигунів із ступенем захисту IP44 і не більше 2 мг/м^3 - IP23; навколишнє середовище вибухобезпечне, не повинно містити струмопровідного пилу, агресивних газів у концентраціях, що руйнують метал та ізоляцію. Допускається робота при коливаннях напруги у живильній мережі в межах $-5 - +10\%$ і частоти змінного струму $\pm 2,5\%$ від номінальних значень [5].

1.2.2. Асинхронні двигуни серії АИ

Електродвигуни серії АИ розроблені в рамках міжнародної організації по співробітництву у галузі електротехнічної промисловості „Інтерелектро” і відповідають перспективному рівню світового електромашинобудування.

Порівняно з двигунами серії 4А та 4АМ вони мають кращі енергетичні показники: менші рівень шуму та масу; підвищену надійність і ступінь захисту (для двигунів з висотами осі обертання 45-132 мм основного виконання - IP54, інших - IP44). Двигуни серії АИ виготовляються з чавунними станиною та підшипниковими щитами і станиною з алюмінієвого сплаву й чавунними або алюмінієвими щитами.

Для досягнення підвищеної точності і зниження шуму використовують серію підшипників із зниженою віброактивністю. Підшипники мають дві ущільнювальні шайби і закладене на весь строк служби підшипника мастило.

Вертикально-горизонтальне оребріння поверхні станини забезпечує інтенсивніше охолодження оболонки двигуна. Коробку струмовводу відливають разом із станиною, що забезпечує надійну герметизацію і дозволяє підвести живлення з кожного боку двигуна через один або два герметизованих штуцери.

Клас нагрівостійкості ізоляції - F. Для підвищення надійності двигунів з висотами осі обертання 45-132 мм перегрівання обмоток встановлено по класу В.

Умовні позначення електродвигунів серії АИ розшифровуються так:

<u>A</u>	<u>И</u>	<u>P</u>	<u>XXX</u>	<u>XX</u>	<u>X</u>	<u>X</u>	<u>XX</u>
1	2	3	4	5	6	7	8

- 1 - асинхронний;
- 2 - уніфікована серія („Интерэлектро”);
- 3 - ув'язка потужності з установочними розмірами (потужності двигунів серії АИР збігаються з потужностями двигунів серій 4А та 4АМ);
- 4 - висота осі обертання, мм;
- 5 - А і В - довжина осердя магнітопроводу при однаковій довжині станини (S, M, L - позначення довжини станини);
- 6 - кількість полюсів (2, 4, 6 і 8);
- 7 - додаткові індекси: Б - з вбудованим температурним захистом, Х2 - стійкий проти дій хімічних речовин, Н - малошумний, С - сільськогосподарський тощо;
- 8 - кліматичне виконання та категорія розміщення.

На замовлення двигуни виготовляють на всі стандартні напруги до 660 В при з'єднанні обмоток за схемою трикутника чи зірки або за іншими схемами і на всі монтажні (ГОСТ 2479-79) та кліматичні (ГОСТ 15150-69) виконання. Двигуни призначені для тривалого режиму роботи S1 за ГОСТ 183-74. Вони можуть бути виготовлені і на інші режими (S2 і S3). За установочними та приєднувальними розмірами і шкалою потужностей вони повністю взаємозамінні з двигунами серій 4А й 4АМ. Структури умовних позначень двигунів серій АИ та 4А і 4АМ збігаються. Умови роботи двигунів серії АИ такі ж, як і для двигунів серії 4АМ відповідних модифікацій та виконань за захищеністю від впливу навколишнього середовища. У таблиці 1.1 приведені основні каталожні дані АД серій АИ та 4А [5].

Таблиця 1.1.

Характеристики електродвигунів серій 4А та АИ

Серія	Параметр			
	Кратність мінімального моменту $M_{\min}^* = \frac{M_{\min}}{M_{\text{ном}}}$	Кратність пускового моменту $M_n^* = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}}$	Кратність максимального моменту $M_{\max}^* = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$	Кратність пускового струму $I_n^* = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$
4А	1,0...1,6	1,3...2,1	1,7...2,8	3,5...7,5
АИ	0,9...1,8	1,1...2,1	1,7...3,0	3,5...7,5

1.3. Завдання та питання для самоконтролю

1. На основі формул (1.1) та (1.2) знайдіть співвідношення між кутовою швидкістю АД (рад/с) та кількістю його обертів за хвилину.
2. Вкажіть у скільки разів зменшиться момент АД при зменшенні напруги живлення на 15%.
3. Використовуючи формулу (1.24) знайдіть вираз для кутової швидкості при якій на валу АД виникає максимальний момент.
4. На основі аналізу виразу (1.12) встановіть відповідність між умовами: 1) $M > M_c$, 2) $M < M_c$, 3) $M = M_c$ та режимами руху двигуна (пуск, гальмування та усталений рух).
5. Розшифруйте марки двигунів 4АМ90L2, 4АМ250М2, АИР80В6.
6. Який струм споживає АД при швидкості ідеального холостого ходу?
7. Вкажіть співвідношення між частотою струмів у статорній та роторній обмотках АД.
8. Як називається режим роботи двигуна при швидкості більшій ніж швидкість ідеального холостого ходу.
9. Вкажіть з яких основних елементів складається АДКЗ.
10. Як називається рівняння, яке описує МХ АД?
11. Вкажіть кратність пускового струму для АД. На основі аналізу формули (1.8) запропонуйте способи зменшення пускового струму.

2. РЕГУЛЮВАННЯ КООРДИНАТ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

2.1. Загальні положення

Координатами електропривода називають параметри, які регулюють за наперед визначеним законом або стабілізують на певному рівні. До них відносять кутову швидкість, струм, потужність, момент, кутове та лінійне прискорення, положення та ін. Регулювання координат електропривода потрібно здійснювати при керуванні як в усталеному, так і неусталеному режимах роботи виконавчих органів робочих машин.

В електроприводах сільськогосподарських машин найчастіше регулюють кутову швидкість. Прикладами таких машин є вентилятори, насоси, дозатори, металообробні верстати, випробувальні стенди тощо.

Регулювання швидкості - це примусова зміна величини швидкості шляхом використання спеціальних заходів, незалежно від величини і характеру діючого навантаження.

У залежності від задач керування електроприводом та виробничим механізмом регулювання координат може здійснюватись з метою: підтримки заданого рівня параметрів (наприклад підтримка заданої величини продуктивності вентилятора у системі вентилявання приміщення); зміни параметрів за потрібним законом (переміщення різака у верстаті з числовим програмним керуванням); обмеження параметрів допустимими значеннями (обмеження вологості у приміщенні з регулюванням вологості за допомогою вентилявання); відпрацювання довільних законів руху, що задаються на вході системи, з потрібною точністю, або так званий слідкуючий електропривод (наприклад повторювання механізмом рухів людини).

Існує дві групи способів регулювання координат електропривода:

- параметричні способи, які використовуються у розімкнених системах керування;
- способи автоматичного регулювання координат за допомогою зворотних зв'язків.

Необхідність регулювання координат електропривода визначається технологічними вимогами, при цьому вибір раціонального способу регулювання з декількох можливих є важливою задачею, що вирішується при проектуванні привода.

Щоб здійснити такий вибір, слід знати основні узагальнені показники регулювання [6]:

- діапазон регулювання;
- плавність регулювання;
- стабільність;
- напрямок регулювання;
- допустиме навантаження у діапазоні регулювання;
- швидкодія, коливальність, перерегулювання, динамічна зміна величини, час відновлення величини (динамічні показники);
- економічність регулювання;
- точність регулювання.

Розглянемо ці показники на прикладі регулювання швидкості. Насамперед необхідно відзначити, що для регулювання швидкості робочого органу існує два способи: зміна швидкості електродвигуна; зміна параметрів кінематичного ланцюга механічної частини електроприводу (наприклад зміна діаметрів шківів у свердлильному верстаті). Перший спосіб реалізується впливом на електродвигун, а другий – на механічну частину електроприводу.

В існуючих електроприводах використовуються обидва способи, особливо для глибокорегульованих приводів. Чим досконалішим є електропривод, тим більшою буде питома вага першого способу. В історичному розвитку електроприводу другий спосіб був початковим кроком при переході від нерегульованого електроприводу до регульованого. Сьогодні механічна частина є досить складною, громіздкою, не досить надійною конструкцією (коробки швидкості, редуктори, варіатори тощо). Крім того, другий спосіб не дає змогу одержати плавне регулювання швидкості. За цих умов широке поширення отримав саме перший спосіб регулювання швидкості.

2.2. Основні показники регулювання кутової швидкості електропривода

2.2.1 Діапазон регулювання

Це основний показник регульованого електроприводу, який характеризується відношенням можливої максимальної швидкості обертання до можливої мінімальної при заданому способі регулювання:

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}, \quad (2.1)$$

де $\omega_{\max}$ - верхня можлива межа швидкості; $\omega_{\min}$ - нижня можлива межа швидкості.

Верхня межа швидкості $\omega_{\max}$ обмежується максимально допустимим, або максимально можливим значенням швидкості, яка для двигунів постійного струму визначається механічною міцністю колектора та бандажу, погіршенням комутації у колекторі тощо.

Нижня межа швидкості $\omega_{\min}$ обмежується необхідністю точної підтримки заданої швидкості при коливанні моменту опору на низьких швидкостях, небезпекою перегрівання двигуна на малих швидкостях – для двигунів у яких крильчатка вентилятора приводиться у рух від самого двигуна.

Діапазон регулювання позначається літерою “ D ” й записується у вигляді ділення на одиницю, наприклад: $\omega_{\min} = 12 \cdot \text{рад/с}$, $\omega_{\max} = 1200 \cdot \text{рад/с}$, тоді $D = 100:1$. Такий діапазон регулювання швидкості можуть мати металорізальні верстати. Сучасні системи регулювання дозволяють реалізувати й значно більший діапазон. Наприклад, ПЧ дозволяють отримувати частоту живлення двигуна від 0,5 Гц до 600 Гц. Оскільки кутова швидкість АДКЗ приблизно пропорційна частоті

напруги живлення, то: $D_{f=\text{var}} = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} \approx \frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \frac{600}{0,5} = 1200:1$.

2.2.2. Плавність регулювання

Плавність регулювання швидкості характеризує стрибок швидкості при переході від даної швидкості до найближчої можливої. Плавність тим вища, чим менше цей стрибок.

Число швидкостей, одержаних у даному діапазоні, визначається плавністю регулювання. Її можна оцінювати коефіцієнтом плавності регулювання, який визначається як відношення двох стійких сусідніх значень кутових швидкостей при регулюванні:

$$K_{nl} = \frac{\omega_{i+1}}{\omega_i} \quad (2.2)$$

де ω_i , ω_{i+1} – кутові швидкості на i -тому та на $(i+1)$ -му ступені регулювання відповідно.

Висока плавність регулювання має місце при $K_{nl} \rightarrow 1$, тобто коли сусідні значення кутових стійких швидкостей обертання дуже близькі $\omega_i \rightarrow \omega_{i-1}$.

Частотно-керований електропривод може реалізовувати достатньо близькі значення сусідніх кутових швидкостей. Дискретність регулювання частоти Δf у ПЧ сягає сотих долей Герц. Отже:

$$K_{nl} = \frac{\omega_{i+1}}{\omega_i} \approx \frac{f_{i+1}}{f_i} = \frac{f_i + \Delta f}{f_i} = \frac{50 + 0,01}{50} = 1,00002$$
 (за умовою, що регулювання відбувається ввєрх від номінальної швидкості).

2.2.3. Стабільність регулювання

Технологічний процес відбувається, як правило, з певними коливаннями моменту навантаження. Як наслідок має місце коливання швидкості робочих органів машин (наприклад при сепаруванні молока швидкість обертання двигуна значно впливає на якість продукту після цього процесу [7]). Звичайно зміна швидкості пов'язана з жорсткістю МХ двигуна.

Стабільність – це зміна кутової швидкості при заданому відхиленні моменту навантаження, яка залежить від жорсткості механічної характеристики. Стабільність тим вища, чим більш жорстка МХ.

Якщо під час регулювання швидкості жорсткість МХ змінюється, то й відхилення швидкості від заданої теж буде змінюватись (рис. 2.1).

На рис. 2.1 показані дві МХ двигуна постійного струму незалежного збудження з різною жорсткістю: характеристика 1 більш жорстка ніж характеристика 2. Регулювання швидкості тут здійснюється уведенням у коло якоря додаткового опору. Якщо момент опору навантаження M_c залишається незмінним для обох характеристик, то двигун, працюючи з кутовою швидкістю ω_1 , після уведення додаткового резистора перейде на швидкість ω_2 . Але при зміні моменту опору M_c у деяких межах $\pm \Delta M_c$ коливання швидкості $\Delta \omega_1$ буде значно меншим на характеристиці 1, ніж коливання швидкості $\Delta \omega_2$ на характеристиці 2. Такі відхилення швидкості від її середнього значення у багатьох випадках обмежують діапазон регулювання швидкості.

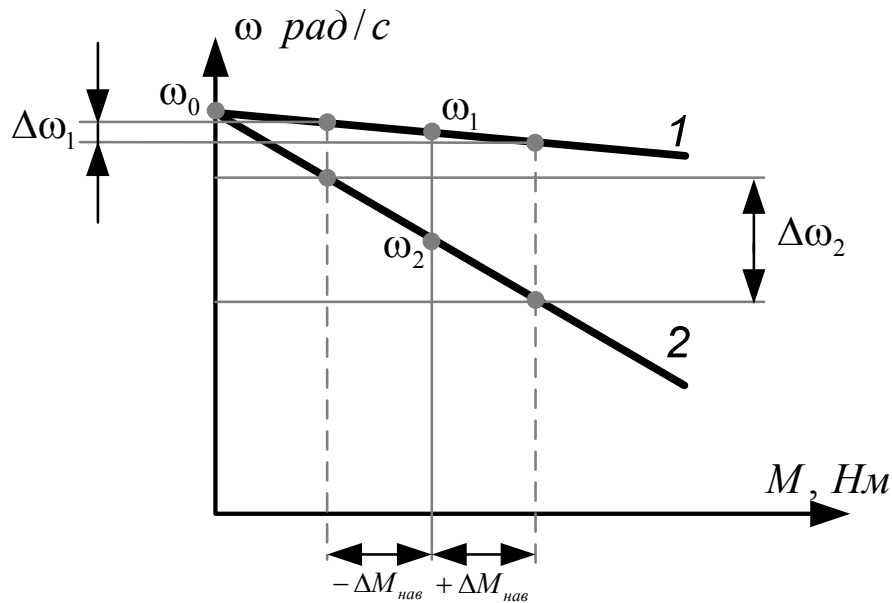


Рис. 2.1. Зміна швидкості двигуна при зміні моменту навантаження та зміні жорсткості M_X

Що стосується АДКЗ, то цей двигун має жорстку M_X на робочій ділянці. Тому частотне регулювання характеризується значною стабільністю роботи. Як показано на рис. 2.2. при зменшенні частоти живлення двигуна M_X опускається паралельно сама собі (характеристика 1 переходить у характеристику 2). При цьому її жорсткість залишається незмінною і $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$. (на рис. 2.2. характеристики побудовані при законі зміни напруги $\frac{U}{U_{ном}} = \frac{f}{f_{ном}}$).

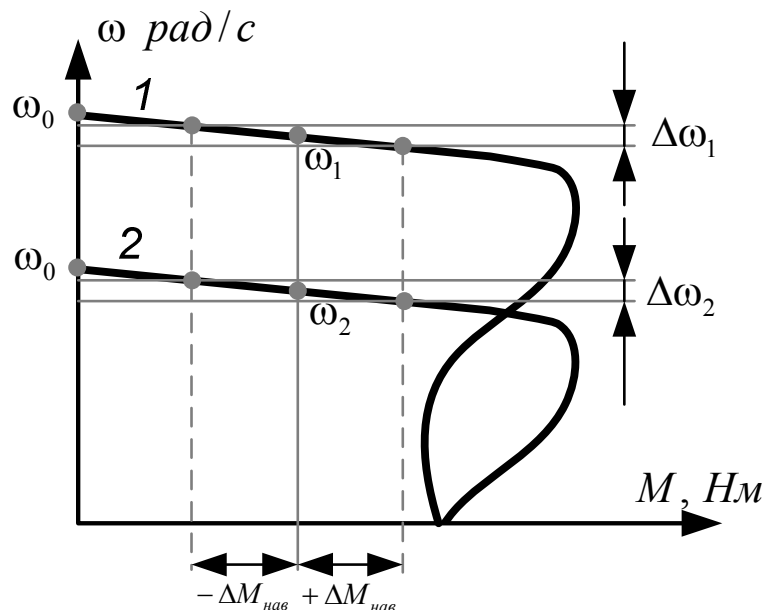


Рис. 2.2. Зміна швидкості обертання АДКЗ при зміні моменту навантаження за різних частот живлення двигуна

2.2.4. Напрямок регулювання

У регульованих електроприводах за базисну величину приймають номінальну швидкість обертання двигуна. Регулювання швидкості обертання може здійснюватись лише вниз від базисної швидкості, лише вверх від базисної швидкості (однотонне регулювання) або і вниз і вверх від базисної (двотонне регулювання). Частотне регулювання при використанні сучасних частотних перетворювачів з проміжною ланкою постійного струму є двотонним регулюванням, а без ланки постійного струму – однотонним з регулюванням швидкості вниз від номінальної.

2.2.5. Допустиме навантаження у діапазоні регулювання

Допустиме навантаження двигуна, тобто найбільше значення моменту, що двигун здатний розвивати тривало при роботі на регульовальних характеристиках, визначається нагріванням двигуна й для різних способів регулювання буде різним.

Зміна моменту навантаження залежно від швидкості в різних виробничих механізмах відбувається по-різному. Наприклад, багато механізмів вимагають регулювання при постійному моменті. До них відносяться: піднімальні крани, лебідки, деякі прокатні стани тощо. З іншого боку, існують механізми, у яких регулювання швидкості виконується з постійною потужністю, наприклад, токарний верстат, у якого в процесі обробки деталі бажано підтримувати сталість лінійної швидкості (або швидкості різання) і зусилля різання. При цих умовах добуток швидкості різання на зусилля дасть сталість потужності. Підтримка сталості швидкості різання досягається плавним регулюванням кутової швидкості електропривода.

Шляхом вибору відповідної потужності двигуна можна задовольнити будь-яку зміну моменту навантаження або потужності при регулюванні швидкості. Однак у такому випадку регулювання кутової швидкості двигуна може виявитися неекономічним, тому що двигун на різних кутових швидкостях буде використаний неоднаково й при роботі на деяких з них буде недовантажений.

Недовантаження двигуна веде до погіршення експлуатаційних показників привода, тому що при цьому зменшується ККД двигуна, а при змінному струмі, крім того, зменшується й коефіцієнт потужності. Тому бажано застосовувати такий спосіб регулювання, при якому

двигун був би по можливості повністю завантажений на всіх кутових швидкостях.

Допустиме навантаження двигуна обмежується ступенем його нагрівання. Ступінь нагрівання у свою чергу залежить від втрат енергії у двигуні, а останні визначаються головним чином струмом, споживаним двигуном.

Таким чином, умовою повного використання двигуна при роботі на різних регулювальних характеристиках є сталість споживаного струму. Якщо при роботі на всіх регулювальних характеристиках струм буде дорівнювати номінальному струму двигуна, то це й буде означати, що двигун завантажений повністю при всіх кутових швидкостях. При цьому передбачається, що умови охолодження двигуна залишаються незмінними як при великих, так і при малих кутових швидкостях. З врахуванням цього важливого припущення допустимим навантаженням двигуна можна вважати такий, при якому струм двигуна в його силових колах дорівнює номінальному. Однак, необхідно мати на увазі, що для самовентильованих двигунів (які мають власний вентилятор для охолодження) зниженню кутової швидкості повинне відповідати зменшення допустимих втрат у двигуні. На малих кутових швидкостях ці двигуни повинні працювати при струмах, менших від номінального. Отже допустимий момент зменшується при зменшенні кутової швидкості. У випадку зовнішнього вентильовання двигуна це обмеження відпадає і допустимий момент може не змінюватись.

У приводах з вентиляторним моментом навантаження двигун не може бути повністю завантажений при низьких кутових швидкостях. Особливістю регулювання таких приводів є збільшення моменту із зростанням кутової швидкості. Тому тут доводиться вибирати потужність двигуна по навантаженню при найбільшій кутовій швидкості. При всіх інших менших кутових швидкостях двигун буде недовантажений.

2.2.6. Динамічні показники регулювання

При автоматичному регулюванні координат електропривода важливе значення мають динамічні показники якості регулювання: швидкодія; коливальність; перерегулювання, які оцінюються характером протікання перехідного процесу при регулюванні.

Швидкодія може характеризуватися часом регулювання t_p , за який змінна швидкість перший раз досягне заданого значення $\omega_{зад}$, часом першого максимуму t_{max} , коли відхилення швидкості досягне першого максимуму, або загальним часом перехідного процесу $t_{n.n.}$ (рис. 2.3). На швидкодію, й взагалі на тривалість перехідного процесу $t_{n.n.}$, впливає також час рушання t_z (час запізнення початку руху). Бажано, щоб швидкодія регулювання була якнайменшою (тобто $t_p \rightarrow 0$), що у сучасних частотно-керованих приводах досягається за рахунок використання швидкодіючих цифрових систем керування.

Коливальність характеризується часом затухання коливань швидкості (це різниця $t_{n.n.} - t_p$). Цей показник повинен бути якнайменшим.

Перерегулювання характеризується максимальним відхиленням, протилежним початковому, віднесеному до заданого (усталеного) значення ω_z регульованого параметра (швидкості). Цей параметр регулювання виражається у відносних одиницях:

$$\Delta\omega_{1max}^* = \frac{\Delta\omega_{1max}}{\omega_z}, \quad (2.3)$$

де $\Delta\omega_{1max}$ - максимальне відхилення швидкості від швидкості задання; ω_z - швидкість задання. Показник перерегулювання повинен бути якнайменшим $\Delta\omega_{1max}^* \rightarrow 0$.

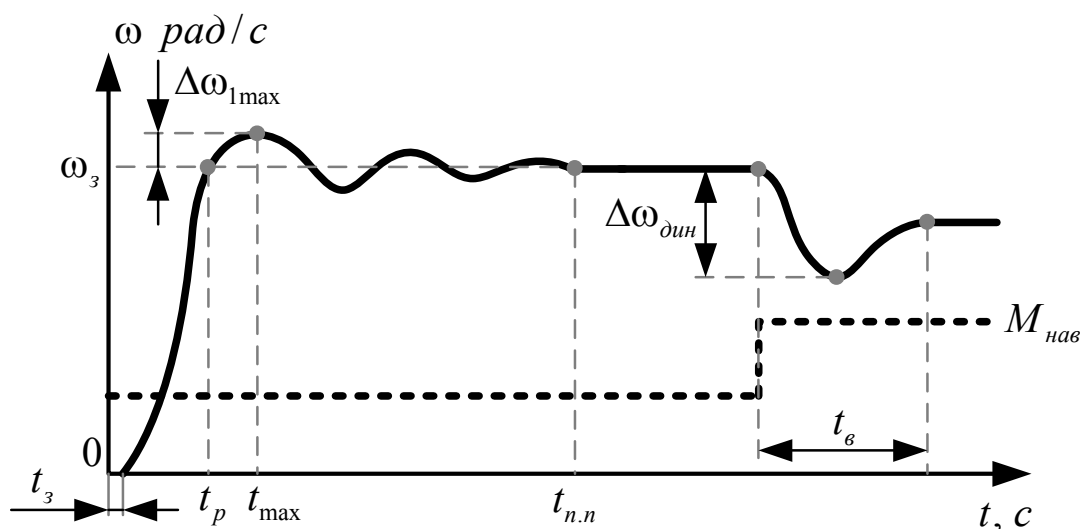


Рис. 2.3. Зміна швидкості приводу при зміні величини швидкості задання та від зміни моменту навантаження

Динамічна зміна швидкості $\Delta\omega_{дин}$ визначається максимальним відхиленням швидкості від початкової швидкості задання ω_z при зміні моменту навантаження $M_{нав}$ (на рис. 2.3 графік моменту навантаження показано штриховою лінією). Необхідно, щоб $\Delta\omega_{дин} \rightarrow \min$.

Час відновлення швидкості t_e характеризує тривалість процесу зміни швидкості при зміні моменту навантаження $M_{нав}$. Бажано, щоб $t_e \rightarrow 0$.

Динамічні показники регулювання залежать від характеру зміни зовнішнього впливу (як змінюється швидкість та за яким законом відбувається ця зміна), а також від властивостей самої системи „привод – робоча машина”.

2.2.7. Економічність регулювання швидкості

Важливим показником регулювання швидкості є економічність. Застосування регульованого електропривода пов’язана з певними додатковими витратами, які повинні окупатися підвищенням продуктивності, надійності, якості продукції тощо. Економічність системи регулювання швидкості визначається двома факторами: початковими витратами, які необхідні для установки необхідного обладнання та експлуатаційними витратами.

Найбільш економічно вигідним буде той електропривод, який забезпечить найбільшу продуктивність механізму при необхідній якості технологічного процесу та малих термінах окупності. При цьому не слід забувати про надійність електропривода, дефіцитність та вартість матеріалів і обладнання. Як правило приймається той варіант регульованого електроприводу, який забезпечує технологічні вимоги, має невисокі вартісні показники і мінімальне питоме споживання електроенергії.

При виборі системи регулювання швидкості слід пам’ятати, що у багатьох випадках існує така закономірність у вартості способу регулювання: чим менша первинна вартість способу (капітальні витрати пов’язані з придбанням, монтажем та налаштуванням регульованого електроприводу), тим більші експлуатаційні витрати і навпаки.

2.2.8. Точність регулювання

Точність регулювання визначається можливим відхиленням швидкості від її заданого значення під дією різноманітних факторів, таких як, зміна навантаження під час регулювання швидкості, коливання напруги при регулюванні, зміна частоти у мережі живлення, наявність вищих гармонік напруги живлення тощо.

Оцінкою точності регулювання швидкості є максимальна відносна зміна швидкості:

$$\Delta\omega_{\max}^* = \frac{\Delta\omega_{\max}}{\omega_{\text{сер}}}, \quad (2.4)$$

де $\Delta\omega_{\max}$ – абсолютна похибка регулювання швидкості; $\omega_{\text{сер}}$ – середнє значення швидкості (рис. 2.4).

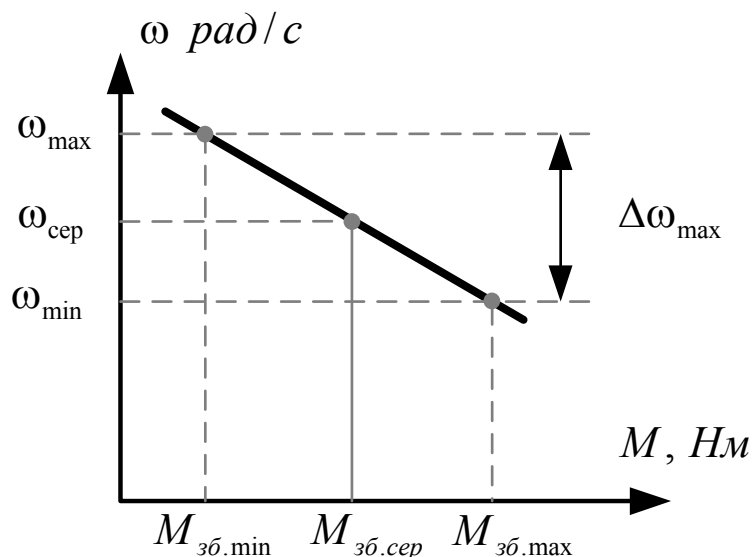


Рис. 2.4. Оцінка точності регулювання швидкості

Таким чином, кількісна оцінка точності регулювання швидкості залежить від середнього значення швидкості, що регулюється, й визначається конкретними межами зміни збурюючої дії (від $M_{\text{зб.min}}$ до $M_{\text{зб.max}}$) та жорсткістю МХ двигуна. У замкнених системах регулювання показник $\Delta\omega_{\max}^*$ менший, ніж у розімкнених.

2.3. Завдання та питання для самоконтролю

1. Розрахуйте показник плавності регулювання швидкості двигуна 4AM160S8/4Y2 при перемиканні обмоток зі зміною кількості пар полюсів.
2. Знайдіть зміну швидкості АД $\Delta\omega$ при зміні навантаження від $M_{\text{ном}}=0,5M_{\text{мах}}$ до $0,8M_{\text{мах}}$ за умови, що робоча ділянка механічної характеристики описується виразом $M = M_{\text{мах}} s / s_{\text{кр}}$. Примітка: для визначення $\Delta\omega$ розрахунки потрібно проводити у такій послідовності: 1) з формули $M = M_{\text{мах}} s / s_{\text{кр}}$ виразити значення ковзання; 2) шляхом підстановки номінального моменту у отриману залежність знайти номінальне ковзання АД; 3) знайти ковзання АД при навантаженні $M=0,8M_{\text{мах}}$; 4) для обох значень ковзання знайти кутові швидкості АД; 5) знайти різницю $\Delta\omega$ отриманих швидкостей.
3. Розрахуйте діапазон регулювання приводу при зміні частоти живлення АД у межах від 10 до 200 Гц і при зміні передаточного пасової передачі, яка входить у привод, від 2 до 3,5.
4. Дайте визначення потягттю „регулювання кутової швидкості електроприводу”.
5. Як називається показник регулювання, який характеризується відношенням можливої максимальної швидкості обертання до можливої мінімальної при заданому способі регулювання?
6. Вкажіть, яким показником оцінюється плавність переходу приводу з однієї швидкості до найближчої можливої?
7. Як залежить стабільність регулювання швидкості від жорсткості механічної характеристики двигуна?
8. Що означає термін „двоступеневе” регулювання швидкості?
9. Вкажіть показники, якими визначається допустиме навантаження на привод у заданому діапазоні регулювання?
10. Перелічіть основні динамічні показники регулювання та розкрийте їх сутність.

3. РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

3.1. Загальні положення

Для забезпечення технологічних вимог сільськогосподарського виробництва а також для зменшення непродуктивних витрат енергії необхідний регульований електропривод.

З енергетичної точки зору регулювання швидкості або моменту електродвигуна означає зміну механічної потужності:

$$P = M\omega. \quad (3.1)$$

Механічна потужність P дорівнює різниці електромагнітної потужності $P_{ел.маг.}$ і потужності втрат у роторі:

$$P = P_{ел.маг.} - \Delta P_{втр} = M\omega_0 - \Delta P_{втр}, \quad (3.2)$$

$P_{ел.маг.}$ - електромагнітна потужність двигуна (потужність у повітряному зазорі АД); $\Delta P_{втр}$ - потужність електричних втрат.

Цей вираз показує можливі способи регулювання швидкості електродвигунів. При незмінних параметрах джерела живлення електродвигуна ($\omega_0 = \text{const}$) регулювання швидкості при $M = \text{const}$ можна здійснити за рахунок зміни втрат потужності $\Delta P_{втр}$ у силовому колі. Якщо джерело живлення кероване, то з його допомогою можна регулювати підведення електромагнітної потужності $P_{ел.маг.}$ до електродвигуна і реалізувати регулювання швидкості ($\omega_0 = \text{var}$) при незмінних втратах у силовому колі АД ($\Delta P_{втр} = \text{const}$). У зв'язку із цим всі способи регулювання швидкості електроприводів постійного і змінного струму принципово можна розділити на дві групи.

Перша група включає способи регулювання швидкості, при яких швидкість ідеального холостого ходу ω_0 електродвигуна залишається постійною. Ця група способів отримала назву „параметричного” регулювання. При постійному моменті втрати потужності у силовій частині електроприводу пропорційні ковзанню:

$$\Delta P_{втр} = M\omega_0 s = M(\omega_0 - \omega), \quad (3.3)$$

тому швидкість регулюється за рахунок зміни ковзання:

$$\omega = \omega_0(1 - s). \quad (3.4)$$

Реалізація таких способів регулювання для АД полягає у зміні активних чи реактивних опорів включених у кола статора чи ротора, а також зміні напруги живлення АД.

Друга група охоплює способи, де швидкість ідеального холостого ходу ω_0 електродвигуна змінюється за допомогою керуючого впливу. У способах регулювання швидкості другої групи втрати потужності в силовому колі при даному моменті пропорційні відхиленню швидкості ротора з від швидкості ідеального холостого ходу АД. Тому ці способи ще називають „енергетичними” (ця група способів є енергетично ефективною). Для АД такі способи регулювання швидкості полягають у зміні частоти напруги живлення а також зміні кількості пар полюсів АД.

Отже, швидкість обертання АД можна регулювати зміною параметрів: частотою струму, числом пар полюсів, опірор роторного і статорного кола та величиною напруги на статорі [3].

3.2. Регулювання швидкості асинхронного двигуна зміною опору у роторному колі

Цей спосіб використовується для АД з фазним ротором, бо цей двигун має контактні кільця на роторі для підключення зовнішнього опору (рис. 3.1). Це один з розповсюджених способів регулювання швидкості, оскільки має просту реалізацію (дуже часто такий спосіб використовується у регулюванні швидкості підйомно-транспортних механізмів).

Регулювання здійснюється вниз від основної (однозонне). Краще використання двигуна буде при регулювання швидкості з незмінним моментом навантаження, що дорівнює номінальному. Плавність регулювання визначається будовою реостата (плавна або ступінчаста зміна опору). Діапазон регулювання залежить від навантаження (зменшується при зниженні навантаження), а через суттєве зниження жорсткості при зростанні R_{20} цей діапазон незначний і складає $D = (2 - 3):1$. Штучні МХ, які відповідають цьому способу регулювання швидкості наведені на рис. 3.2.

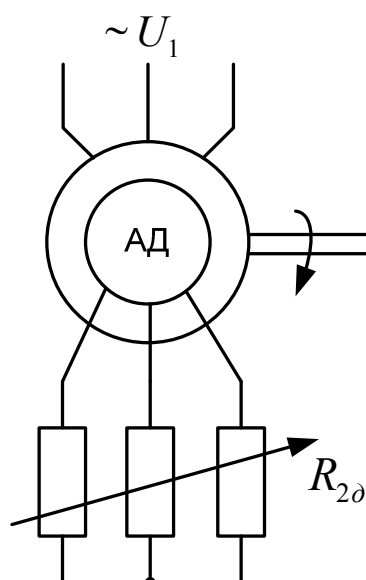


Рис. 3.1. Схема підключення реостату до роторного кола АД

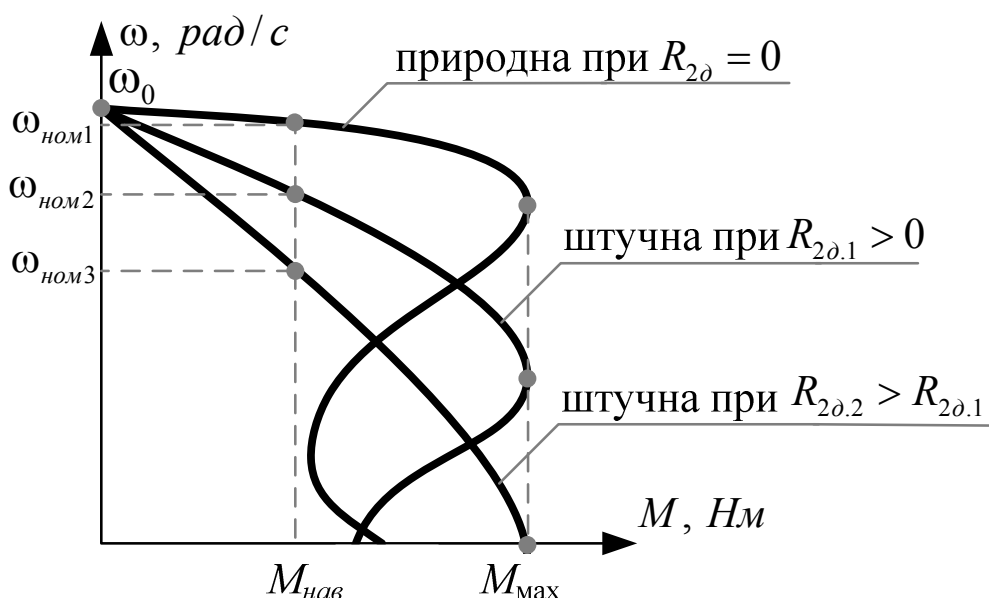


Рис. 3.2. Механічні характеристики АД при реостатному регулюванні

При регулюванні швидкості цим способом виникають значні втрати енергії, оскільки опір реостату, підключеного у коло струму ротора, має велике значення. Тому доцільно використовувати його при незначному діапазоні регулювання швидкості й невеликій тривалості роботи на низьких швидкостях. Найбільш доцільне при цьому регулювання (з погляду втрат енергії) при вентиляторній МХ робочої машини (тут при зменшенні швидкості потужність, що підводиться, знижується).

Особливості штучних МХ: швидкість ідеального неробочого ходу ω_0 не змінюється при зміні величини R_{20} ; максимальний момент двигуна $M_{\max}$ при регулюванні також практично не змінюється; критична швидкість зменшується (ковзання зростає) при збільшенні R_{20} . Цей спосіб також використовується для регулювання координат двигуна: пускового струму і пускового моменту.

У випадках коли відбувається важкий пуск двигуна (робоча машина на початку створює значний момент опору) рекомендується використовувати цей спосіб оскільки за його допомогою можна отримати значний пусковий момент.

3.3. Регулювання швидкості асинхронного двигуна зміною числа пар полюсів

Як видно з формули (3.3), швидкість можна регулювати зміною числа пар полюсів і це регулювання може бути лише ступінчастим, оскільки кількість пар полюсів $p=1, 2, 3\ldots$ - ціле число. Одержати можна тільки обмежену кількість фіксованих швидкостей, тому що збільшення їх призвело б до ускладнення конструкції перемикача швидкостей або до погіршення використання активних матеріалів двигуна.

Для реалізації цього способу регулювання існують різні конструкції двигунів: 1) на статорі розташовується декілька обмоток на різне число p , які по черзі вмикаються на необхідну швидкість. Із міркувань використання активних матеріалів кількість обмоток, розташованих на статорі, недоцільно вибирати більше двох; 2) на статорі розташована одна обмотка, обладнана перемикачем, який забезпечує перемикання обмотки на різне число p . Із міркувань простоти конструкції перемикача число фіксованих швидкостей не доцільно вибирати більше двох.

З огляду на це створюються такі багатошвидкісні АД:

- двошвидкісний АД, на статорі має одну полюсоперемикальну обмотку;
- тришвидкісний АД, на статорі має одну полюсоперемикальну обмотку й одну обмотку на фіксоване число пар полюсів;
- чотиришвидкісний АД, на статорі має дві полюсоперемикальні обмотки.

Переважає більшість багатошвидкісних АД - це двошвидкісні.

У полюсоперемикальних обмотках перехід від схеми з більшим p до схеми з меншим p можливий, як при паралельному, так і при послідовному вмиканні двох однакових частин обмоток кожної фази.

Найбільш поширені трифазні схеми обмотки статора при перемиканні на різне p такі: зірка – зірка (Y/Y), трикутник – подвійна зірка (Δ/YY), зірка – подвійна зірка (Y/Y $\bar{Y}$).

МХ двошвидкісного АД за умов регулювання швидкості з постійною потужністю: $P_{\text{дон}(p=1)} = P_{\text{дон}(p=2)}$, $M_{\text{max}(p=1)} = 0,5M_{\text{max}(p=2)}$ наведені на рис. 3.3.

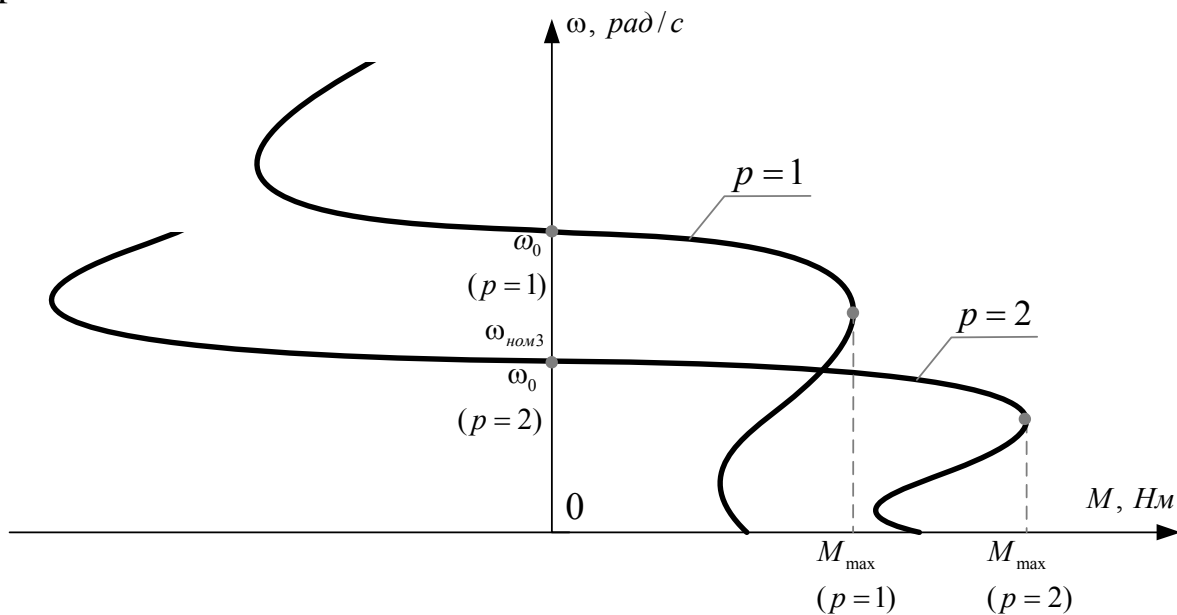


Рис. 3.3. МХ двошвидкісного АД для схем з $p=1$ та $p=2$

Найбільший діапазон регулювання може бути $D=8:1$. Наприклад, для чотиришвидкісних АД співвідношення синхронних частот обертання може бути: 3000/1500/750/375 [об/хв] (діапазон $D=8:1$) або 3000/1500/1000/500 [об/хв] (діапазон $D=6:1$).

3.4. Регулювання швидкості асинхронного двигуна зміною напруги живлення статора

Для реалізації цього способу між мережею живлення й АД підключається регулятор напруги (РН), наприклад тиристорний регулятор напруги, для зміни величини напруги у відповідності до сигналу керування U_{κ} (рис. 3.4).

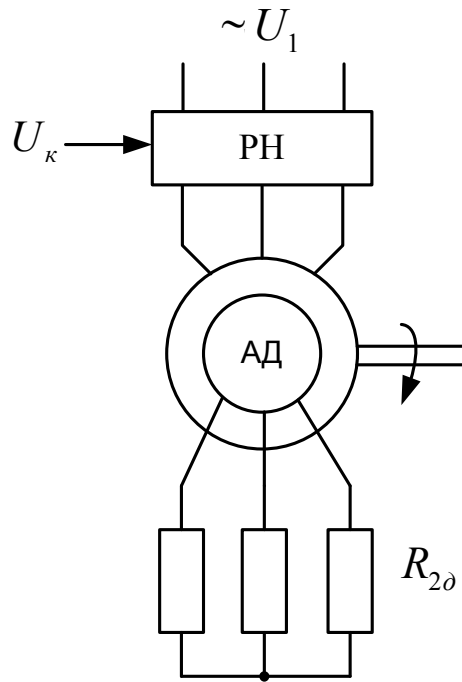


Рис. 3.4. Схема живлення АД з регулятором напруги

При такому регулюванні синхронна кутова швидкість та критичне ковзання залишаються незмінними при зменшенні напруги, а жорсткість МХ падає. Це не кращий спосіб регулювання швидкості, бо зі зменшенням напруги діапазон регулювання змінюється мало, проте суттєво зменшуються максимальний та поточний моменти двигуна (з огляду на те, що $M \equiv U^2$), а отже і його перевантажувальна здатність (рис. 3.5). Натомість цей спосіб більш доцільний при регулюванні інших координат АД, наприклад, моменту і струму.

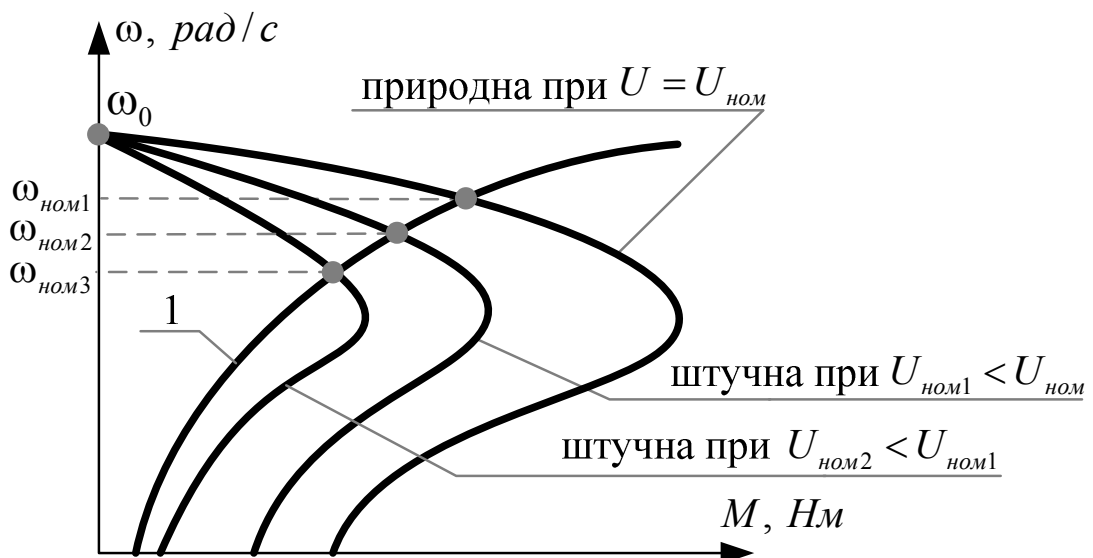


Рис. 3.5. МХ АД при зменшенні напруги живлення (для вентиляторного характеру навантаження – крива 1)

3.5. Частотне регулювання асинхронного двигуна

3.5.1. Скалярне регулювання

Частотне керування АД має найкращі показники регулювання швидкості порівняно з іншими способами. Єдиним стримуючим фактором тут є висока, поки що, вартість ПЧ. Цей спосіб забезпечує плавне регулювання швидкості у широкому діапазоні (це двозонне регулювання), а одержані статичні МХ мають високу жорсткість. Частотний спосіб має важливу властивість - сталість ковзання при регулюванні швидкості (цього немає при реостатному регулювання). За цієї обставини втрати потужності ($\Delta P_2 = P_1 \cdot s$) незначні, тобто цей спосіб економічний.

Для кращого використання АД, одержання високих енергетичних характеристик ($\cos \varphi$, ККД та перевантажувальної здатності), одночасно зі зміною частоти живлення f_1 слід змінювати й величину напруги живлення U_1 . Закон зміни напруги при цьому залежить від характеру моменту навантаження, тобто від функції $M_c = f(\omega)$.

При виборі співвідношення між f_1 та U_1 можна виходити з міркувань підтримки постійності перевантажувальної здатності АД, тобто дотримуватись постійності відношення:

$$M_{\max} / M_c = \lambda = \text{const}, \quad (3.7)$$

де λ - кратність максимального моменту двигуна по відношенню до моменту опору робочої машини. Максимальний момент двигуна визначається рівнянням (1.25), яке можна подати у дещо іншому вигляді:

$$M_{\max} = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 X_k} = \frac{AU_1^2}{f_1^2}, \quad (3.8)$$

де X_k - індуктивний опір двигуна при короткому замиканні ($X_k = X_1 + X_2'$); A - коефіцієнт, який включає параметри, незалежні від частоти струму. Оскільки у формулі (3.8) X_k та ω_0 залежать від частоти напруги живлення, то максимальний момент обернено пропорційний квадрату частоти f_1 .

Формула, яка описує перевантажувальну здатність двигуна з урахуванням (3.8) може бути тепер представлена у такому вигляді:

$$\frac{AU_1^2}{f^2 M_c} = \lambda = \text{const.} \quad (3.9)$$

Якщо зробити припущення, що момент зрушення робочої машини рівний нулю, то момент опору на валу робочої машини має вигляд:

$$M_c = \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^x = \left(\frac{f}{f_{ном}} \right)^x. \quad (3.9)$$

У урахуванням виразу (3.9) формула (3.8) запишеться у такому вигляді:

$$\frac{AU_1^2}{f^2 \left(\frac{f}{f_{ном}} \right)^x} = \lambda \quad (3.10)$$

або

$$U_1 = Bf^{1+\frac{x}{2}}, \quad (3.10a)$$

де B - коефіцієнт, $B = \sqrt{\frac{\lambda}{Af_{ном}^x}}$.

Рівнянням (3.10a) описується закон, за яким необхідно змінювати напругу живлення двигуна при зміні частоти.

Для робочої машини з показником степеня $x = 0$ (підйомники, лебідки, конвеєри тощо) маємо:

$$U_1 = Bf. \quad (3.11)$$

При вентиляторному типі навантаження $x = 2$:

$$U_1 = Bf^2. \quad (3.12)$$

При $x = -1$, що характерно для металообробних верстатів маємо:

$$U_1 = B\sqrt{f}. \quad (3.13)$$

МХ АД при частотному регулюванні швидкості обертання робочих машин з різними МХ (при різних показниках степеня x у виразі МХ робочої машини) показані на рис. 3.6 - 3.8. Нагадаємо вираз, який описує МХ робочих машин:

$$M_c = M_{c.o.} + (M_{c.ном.} - M_{c.o.}) \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^x, \quad (3.14)$$

$M_{c.o.}$ - момент навантаження створюваний робочою машиною на початку руху (при $\omega = 0$); $M_{c.ном.}$ - номінальний момент опору при швидкості руху $\omega_{ном}$; ω - поточне значення кутової швидкості.

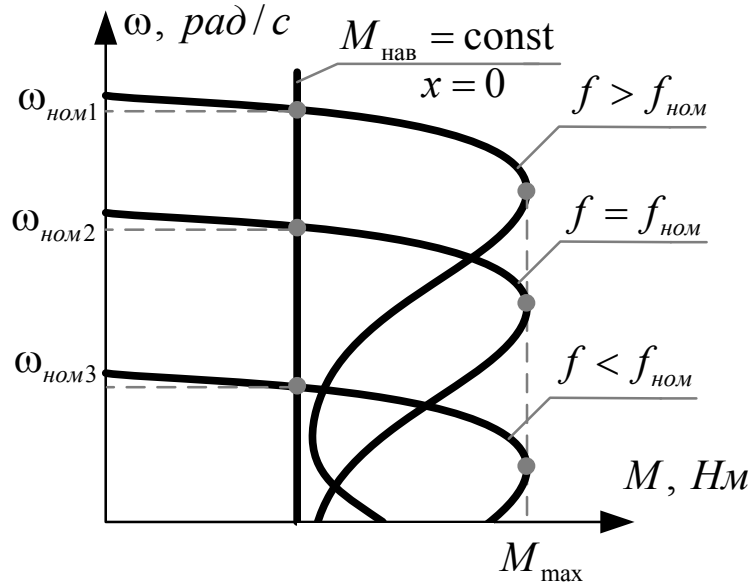


Рис. 3.6. Механічні характеристики АД при частотному керуванні для робочої машини з $x = 0$

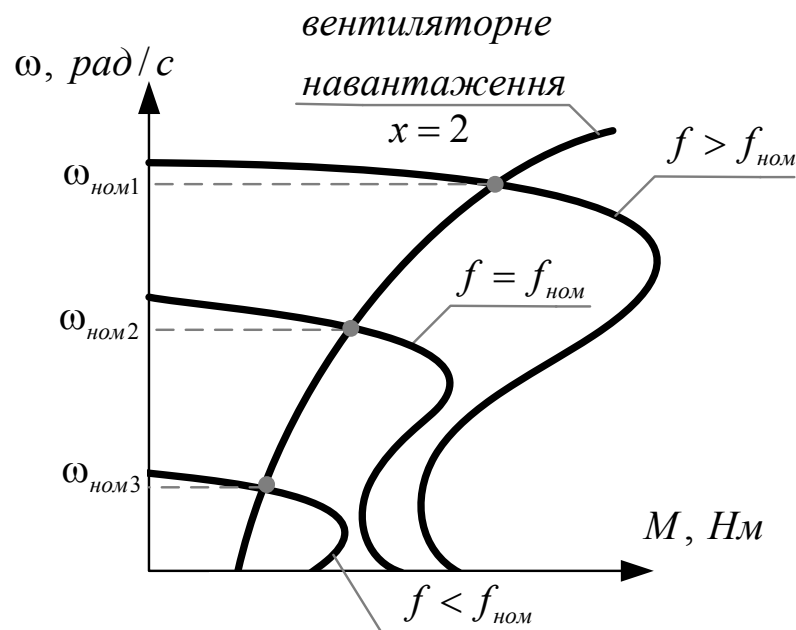


Рис. 3.7. Механічні характеристики АД при частотному керуванні для робочої машини з $x = 2$

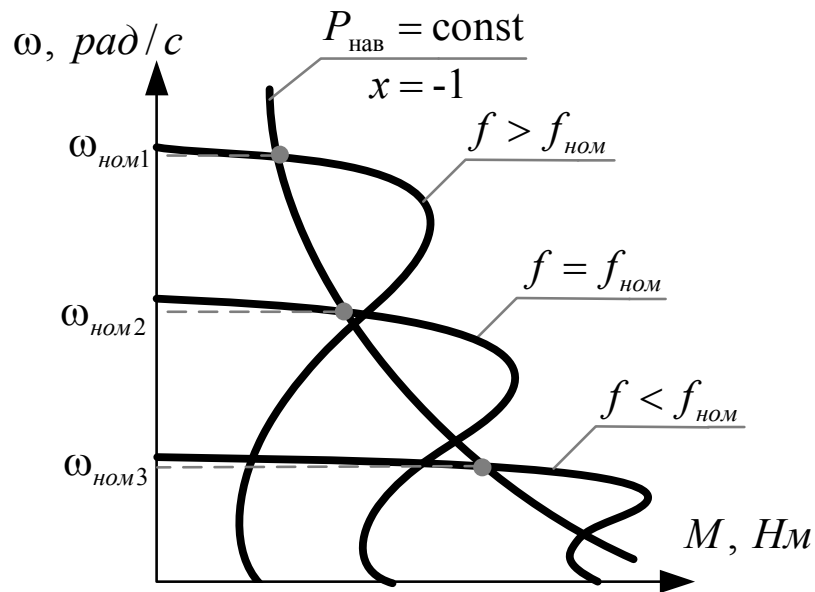


Рис. 3.8. Механічні характеристики АД при частотному керуванні для робочої машини з $x = -1$

Вперше залежність (3.10а) отримана академіком М.П. Костенко [8].

Припущення щодо рівності нулю активного опору статорної обмотки ($R_1 \approx 0$), яке використовувалось при виведенні формули (3.10а) не вносить помітних похибок в основний закон зміни напруги при зміні частоти для двигунів великої потужності або при роботі двигунів з незначним зниженням частоти струму. Двигуни великої потужності мають індуктивний опір на порядок більший ніж активний опір. Для двигунів середньої та малої потужності при номінальній частоті живлення на статорній обмотці активний і індуктивний опори приблизно одного порядку. При зниженні частоти струму індуктивний опір пропорційно знижується, а активний залишається сталим. Отже спад напруги на активному опорі статора буде збільшуватись і, як наслідок, перевантажувальна здатність двигуна знизиться.

На рис. 3.9. показані графіки зміни кратності максимального моменту АД при зменшенні відносної частоти напруги живлення $f_1 / f_{1ном}$ для різних номінальних потужностей АД (регулювання швидкості АД вниз від номінальної). Нехай перевантажувальна здатність АД при зниженні частоти знизиться до 0,8 від значення природної характеристики. Графічно це показано горизонтальною лінією сірого кольору. Тоді для різних номінальних потужностей АД отримаємо граничні значення відносних частот ($f_1 / f_{1ном}$) 0,2; 0,4 та 0,53 для потужностей АД 55 кВт, 5,5 кВт та 0,55 кВт відповідно. За умовою

збереження перевантажувальної здатності (3.7) на рівні 0,8 це відповідає діапазону регулювання $D=5:1$; $2,5:1$ та $1,9:1$ для двигунів потужністю 55 кВт, 5,5 кВт та 0,55 кВт відповідно.

Загалом характер залежностей (рис. 3.9.) однаковий, але зі зменшенням потужності АД крутизна їх у області низьких частот зменшується, при цьому зменшується діапазон регулювання. Це пов'язано з тим, що зі зменшенням потужності АД збільшується відносна величина активного опору статора R_1 і його вплив на електромеханічні процеси.

Діапазон регулювання визначається не тільки задачею збереження перевантажувальної здатності АД (3.7), але й умовою забезпечення заданої жорсткості МХ АД. Для двигунів потужністю більше 1...2 кВт зниження жорсткості МХ у діапазоні регулювання $D=10:1$ складає 7-10%, що у більшості випадків задовольняє заданим вимогам значного числа приводів. Якщо ж потрібна більша жорсткість МХ або більший діапазон регулювання, то використовують замкнені системи частотного регулювання, які дозволяють компенсувати спад напруги на активному опорі у значному діапазоні регулювання та отримати потрібну жорсткість МХ (частотне регулювання при сталості магнітних потоків статора $\psi_1 = const$, ротора $\psi_2 = const$, основного магнітного потоку $\psi_\mu = const$).

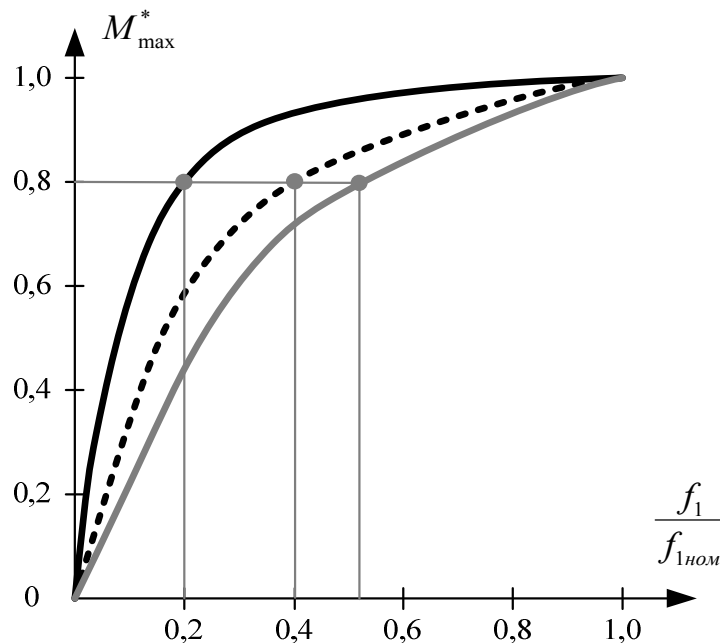


Рис. 3.9. Графіки кратності максимального моменту АД в залежності від частоти напруги живлення $M_{\max}^* = M_{\max}^* (f_1 / f_{1ном})$ для різних потужностей: суцільна лінія для $P_{ном}=55$ кВт; штрихова для $P_{ном}=5,5$ кВт; крива сірого кольору для $P_{ном}=0,55$ кВт

3.5.2. Векторне регулювання

Сучасні системи векторного регулювання дозволяють просто й ефективно керувати такими складними об'єктами як АДКЗ. Це дозволяє істотно розширити область застосування асинхронного приводу і витіснити з автоматизованих керованих приводів двигуни постійного струму. Можливість використання векторних алгоритмів регулювання АД пов'язано в першу чергу з розвитком силової електроніки, яка дозволяє створювати надійні й відносно дешеві перетворювачі, а також з розвитком швидкодіючої мікроелектроніки.

Першим етапом процесу розвитку векторного керування АД була розробка універсальної векторно-матричної математичної моделі, що одержала назву узагальненої електричної машини. Цей процес почався у кінці 20-х років і завершилася наприкінці 40-х років ХХ століття. Модель узагальненої електричної машини дозволяє описувати електромагнітні процеси в ідеалізованому електродвигуні за допомогою апарату лінійної алгебри. Практичне використання моделі було відкладено на кілька десятиліть, оскільки при „ручних” розрахунках вона не давала яких-небудь переваг, але вимагала істотних обчислювальних робіт, теоретично ж її успішно використовували для аналізу перехідних процесів в електричних машинах.

Як відомо, повна керованість електропривода досягається тоді, коли забезпечується керування електромагнітним моментом двигуна. У електричних двигунах крутний момент утворюється в результаті взаємодії магнітних полів статора й ротора. Обидві величини повинні бути незалежні одна від іншої. Тоді одну з них можна підтримувати постійною, а за допомогою іншої здійснювати регулювання. У двигунах постійного струму існують окремі електричні кола для керування магнітним потоком і моментом. Нагадаємо що електромагнітний момент машини постійного струму визначається так:

$$M = K\Phi I_a, \quad (3.15)$$

де K - конструктивний параметр машини ($K = \frac{pN}{2\pi a}$), де p – число пар полюсів; N - число провідників якоря; a - число паралельних гілок обмотки якоря; Φ - магнітний потік двигуна; I_a – струм якоря.

У АДКЗ є тільки один канал, у якому об'єднані обидві складові струму. Отже у завдання системи регулювання входить функція їхнього

поділу. Це завдання вирішується при використанні рівнянь узагальненої електричної машини у векторній формі. У результаті вибору пари векторів величин, які утворюють електромагнітний момент, і системи координат, у якій вони представлені, можна одержати рівняння моменту у вигляді функції незалежних проекцій цих величин на координатні осі. Тоді керування моментом зводиться до керування проекціями векторів. Звідси й назва способу.

В 1971 році Ф. Блашке (*F. Blaschke*) сформулював принцип керування, запатентований фірмою *Siemens* і названий трансвекторним керуванням (*TRANSVEKTOR®-Regelung*) [9]. Математичною основою його є рівняння електромагнітних процесів в АД у векторній формі, представлені в системі координат орієнтованої по напрямку магнітного поля. В англomовній літературі цей принцип називається *field-oriented control (FOC)*, тобто „керування з орієнтацією по полю”. Він успішно використовується у наш час і повністю асоціюється з поняттям векторного керування, хоча в останній час із розвитком пристроїв обробки інформації з'явився інший спосіб, у якому також використовується векторне подання величин, але алгоритм керування відрізняється від трансвекторного. Цей спосіб називається прямим керуванням моментом (*DTC direct torque control*).

Для побудови систем векторного керування АД можуть бути використані будь-які пари векторів, за допомогою яких можна представити електромагнітний момент АД. Однак від вибору векторів значною мірою залежить ступінь складності системи. Бажано, щоб величини, які представлені векторами в рівнянні моменту, можна було безпосередньо виміряти й впливати на них при керуванні моментом. У АДКЗ є тільки дві такі величини – це напруга й струм статора, і тільки одна з них, а саме струм статора, може входити в рівняння моменту.

Тоді іншою величиною може бути тільки струм ротора або яке-небудь потокозчеплення. Струм ротора принципово неможливо виміряти, а пристрої його ідентифікації по іншим вимірюваним параметрам складні й ненадійні. Тому для вибору залишаються три потокозчеплення: статора, ротора й основне, тобто магнітний потік у зазорі АД. Потокозчеплення статора й робочий потік АД можна безпосередньо виміряти й використати цей сигнал у системі керування, що часто й робиться при створенні приводів високої якості. У масових виробках розробники намагаються використати сигнали, доступні без установки датчиків, тобто струм і напруга статора, за миттєвим значенням яких можна обчислити, наприклад, потокозчеплення статора.

Однак при виборі потокозчеплення статора або основного потокозчеплення передаточні функції системи керування виходять досить складними й мало підходящими для практичного використання.

Простіший вигляд мають рівняння електромагнітних процесів в АД у випадку подання їх через вектор потокозчеплення ротора ψ_2 . У системі координат орієнованій по потокозчепленню ротора (ця система координат названа dq -системою. Вона обертається у просторі зі швидкістю ротора) рівняння моменту буде мати вигляд:

$$M = C\psi_2 I_{1q}, \quad (3.16)$$

де C – деякий коефіцієнт; ψ_2 - потокозчеплення ротора; I_{1q} - проекція вектора струму статора на вісь q , яка перпендикулярна потокозчепленню ротора ψ_2 (рис. 3.10).

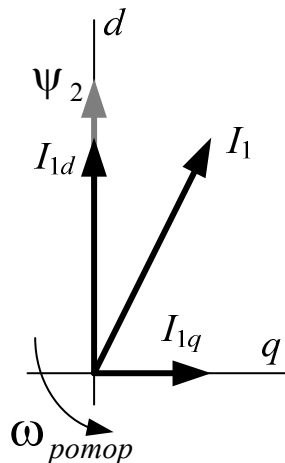


Рис. 3.10. Вектори, які визначають електромагнітний момент АД у системі координат dq

Рівняння (3.16) аналогічне рівнянню (3.15): ψ_2 виконує роль основного магнітного потоку, а I_{1q} - струму якоря двигуна постійного струму.

Таким чином, принцип векторного керування полягає у роздільному керуванні магнітним потоком і моментом АД за допомогою незалежних складових струму статора, які відповідають проекціям вектора струму на осі системи координат dq , орієнтованої по напрямку вектора магнітного потоку ротора.

Отже, якщо задати значення поздовжньої складової струму, що відповідає необхідному магнітному потоку, а поперечної – необхідному моменту на валу, то тим самим буде визначено вектор струму статора в

системі координат dq . Після цього здійснюється перетворення системи координат dq у нерухому і розкладання вектора струму на фазні проекції, у результаті чого утворюються синусоїдальні сигнали, що відповідають фазним струмам які потрібно сформувати в обмотках статора, щоб одержати заданий електромагнітний момент [10].

Перетворення систем координат (з нерухомої у рухому dq) неможливо без інформації про просторове положення опорного вектора ψ_2 у кожен момент часу. Цю інформацію можна одержати безпосереднім виміром магнітного потоку статора або робочого потоку за допомогою датчиків, а потім обчислити ψ_2 . Однак при цьому необхідно включати у конструкцію приводу ненадійні датчики Хола. Уникнути небажаних (і не завжди можливих) змін конструкції АД можна використовуючи виміри інших параметрів: 1) струмів статора АД; 2) напруг на затискачах статора АД; 3) кутової швидкості ротора АД; 4) кутового положення ротора АД. Для векторного керування АД необхідно вимірювати принаймні дві з перелічених величин.

Більш простим і дешевими є електропривод, розімкнутий по швидкості, який не містить датчик кутової швидкості (інтернаціональний термін „безсенсорне керування”). Тут виміру підлягає лише струми й напруги статора АД. Швидкість ротора обчислюється в ПЧ по математичній моделі АД, що враховує усереднені типові або реально виміряні параметри АД. Модель АД представляє собою систему диференціальних рівнянь, які розв’язуються у реальному часі. Невідомими функціями часу в цій системі можуть бути вектори струмів або потокозчеплень ротора, статора і швидкість ротора. При вимірі параметрів і розв’язуванні диференціальних рівнянь у системі керування ПЧ накопичуються похибки, що приводить до неточного визначення орієнтації поля. Для стійкої роботи застосовується безперервна корекція розв’язків системи на основі різниць виміряних і обчислених значень струмів статора.

Через складність точного відображення параметрів АД (наприклад, внаслідок зміни температурних умов роботи АД) регульовальні властивості таких векторних безсенсорних електроприводів у зоні нульових швидкостей різко погіршуються, тобто має місце обмеження діапазону регулювання. Для роботи в необмеженому діапазоні швидкостей використовуються замкнуті по швидкості електроприводи, які мають електромеханічний або цифровий датчик швидкості (енкодер), встановлений на валу АД. У цьому випадку модель АД значно спрощується й служить тільки для

визначення орієнтації потокозчеплення ротора. Ця інформація використовується для перетворень координат.

Векторне керування АД, особливо без датчика швидкості, вимагає більшого обсягу й високої швидкості обчислень і може бути реалізоване потужним мікропроцесорним контролером, наприклад цифровим сигнальним DSP контролером [11].

Раціональні області застосування асинхронних електроприводів з векторним керуванням:

- спеціальні верстати, промислові роботи в тому числі із задачами позиціонування робочого органу;
- привод з частими пусками, зупинками, реверсами, наприклад, у сфері підйомно-транспортного обладнання (транспортні механізми, ліфти тощо);
- електричний транспорт;
- центрифуги тощо.

3.6. Завдання та питання для самоконтролю

1. Розрахуйте у скільки разів збільшаться втрати у АД при параметричному способі регулювання кутової швидкості за умови що зміна швидкості відбувається з $\omega_1 = 0,95\omega_0$ до $\omega_2 = 0,7\omega_0$.
2. Знайдіть у скільки разів зміниться напруга живлення двигуна при частотному скалярному регулюванні швидкості за умовою, що частота напруги $f = 1,5f_{ном}$. Розрахунки провести для таких робочим машин: 1) підйомний механізм; 2) насос; 3) металообробний верстат.
3. Розкрийте сутність понять „параметричне” та „енергетичне” регулювання швидкості.
4. Які параметри АД впливають на його кутову швидкість?
5. Вкажіть недоліки і переваги реостатного регулювання швидкості АД.
6. Який найбільший діапазон регулювання може бути досягнутий за допомогою перемикання числа пар полюсів АД?
7. Який основний недолік регулювання швидкості АД зміною напруги живлення?
8. З яких міркувань виходять змінюючи напругу живлення двигуна при зміні частоти?
9. Розкрийте сутність векторного методу керування АД та вкажіть раціональні області його використання.

4. БУДОВА ТА ПРИНЦИП ДІЇ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ

4.1. Історія розвитку конструкцій перетворювачів частоти

В історії розвитку перетворювальної техніки для електроприводів змінного струму можна виділити три етапи [12].

Перший етап (початок 80-х років) характеризується освоєнням серійного виробництва й промисловим використанням найбільш простих ПЧ, виконаних за схемою „керований тиристорний випрямляч - LC фільтр - автономний тиристорний інвертор напруги із примусовою комутацією”. Перші моделі ПЧ не дозволяли рекуперувати енергію в мережу при гальмівних режимах двигуна. Інвертор напруги виконувався по трифазній мостовій схемі [13]. Функція регулювання частоти вихідної напруги перетворювача покладалась на автономний інвертор, а амплітуди вихідної напруги - на керований випрямляч. Системою керування забезпечувався закон зв'язку амплітуди й частоти вихідної напруги перетворювача, близький до пропорційного з можливістю корекції в області малих частот. У системі передбачалися зворотні зв'язки, які забезпечували ослаблення негативного впливу силового фільтра на динаміку електропривода. Паралельно з перетворювачами на базі інверторів напруги розвивалися ПЧ з інверторами струму. Істотною перевагою останніх є можливість рекуперації енергії в мережу.

ПЧ першого покоління зіграли важливу роль у створенні й розширенні області застосування економних регульованих електроприводів змінного струму. Основні недоліки ПЧ першого покоління: несинусоїдальність вихідного струму; нерівномірність обертання двигуна при малих частотах; обмеження швидкодії, пов'язане з наявністю силового фільтра в каналі амплітудного регулювання величини вихідної напруги; низький коефіцієнт потужності.

Другий етап (кінець 80-х років) характеризується розробкою нових дволанкових напівпровідникових перетворювачів, виконаних за схемою „некерований випрямляч - LC фільтр - тиристорний або транзисторний автономний інвертор із широтно-імпульсною модуляцією вихідної напруги”. Для ПЧ цього покоління характерним є: 1) істотне наближення до синусоїди форми вихідного струму й відповідно покращення рівномірності обертання двигунів;

2) розширення діапазону регулювання швидкості; 3) значне підвищення швидкодії електропривода, оскільки силовий фільтр (LC фільтр) на виході нерегульованого випрямляча виявився фактично виключеним з каналів регулювання параметрів вихідної напруги перетворювача; 4) значне збільшення коефіцієнту потужності ПЧ як споживача електроенергії.

На основі ПЧ другого покоління виявилось можливим створення вдосконалених регульованих електроприводів як масового застосування, так і спеціалізованих, які задовольняли досить високі вимоги (наприклад, транзисторні частотно-регульовані асинхронні електроприводи подачі у металорізальних верстатах з діапазоном регулювання швидкості порядку $D=1000:1$). Швидко зростала кількість фірм-виробників ПЧ для електропривода змінного струму, розширювалася номенклатура виробів, поліпшувалася їхня якість та збільшувалась кількість функцій ПЧ.

Інтенсивному розвитку ПЧ на цьому етапі сприяли значні успіхи, досягнуті в області вдосконалення й створення нових силових напівпровідникових приладів і інтегральних схем, розвитку цифрових інформаційних технологій і різноманітних засобів мікропроцесорного керування [14]. Проте, на другому етапі розвитку ПЧ виявилися недостатньо повно вирішені деякі питання енергозбереження, якості електроспоживання й електромагнітної сумісності перетворювачів.

Третій етап розвитку ПЧ (з початку 90-х років) характеризується більш повним вирішенням вказаних питань на базі використання в ланці постійного струму випрямлячів із примусовою комутацією, що одержали назву активних випрямлячів [15]. Провідні закордонні електротехнічні фірми випускають ПЧ третього покоління, що охоплюють діапазон потужностей від 0,1 кВт до 8 МВт.

4.2. Елементна база перетворювачів частоти

Досягнення в області розробки і випуску третього покоління ПЧ пов'язані, в першу чергу, зі створенням сучасних, повністю керованих, елементів силових електроніки і мікропроцесорних засобів керування. ПЧ третього покоління виробляються з використанням силових модулів і силових гібридних інтегральних модулів на основі польових і біполярних транзисторів з ізольованим затвором типу IGBT (*Isolated Gate Bipolar Transistor*), із зворотними діодами. Модулі відносяться до класу повністю керованих ключів з високим рівнем комутування

напруги і сили струму при малих втратах, невеликих значеннях потужності керування і часу перемикавання. Межа комутуючих напруг досягає 3,5 кВ, а сила струму до 4 кА. Розширення області застосування IGBT транзисторів обумовлено: високою частотою (20 кГц) перемикавання цих пристроїв, що дозволяє зменшити вплив вищих гармонік на виході з перетворювача; можливістю модульного виконання, при цьому можна вибирати цільні блоки ПЧ, наприклад, напівміст, трифазний міст випрямляча. Це підвищує надійність роботи перетворювача. У порівнянні з тиристорами (GTO) силові транзисторні модулі типу IGBT мають кращі статичні і динамічні характеристики при однакових максимальних параметрах.

Силовий модуль містить у пластиковому корпусі на електрично ізольованій теплопровідній підложці кілька ключів, які поєднуються в конфігурацію моста (або секції моста) (рис. 4.1).

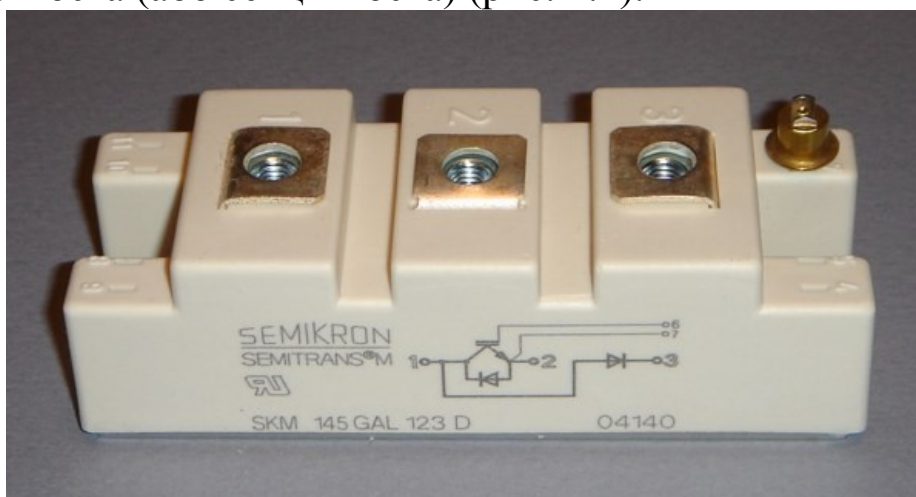


Рис. 4.1. Зовнішній вигляд силового IGBT-модуля фірми Semikron [16]

Інтелектуальний модуль об'єднує не тільки силові ключі із зворотними діодами, але й компоненти для захисту транзисторів, вимірювання струму та керування транзисторами.

ПЧ третього покоління обладнують, як правило, 16-розрядними мікропроцесорними контролерами, з декількома типами пам'яті, які, окрім головної функції керування силовими модулями, мають широкі функціональні та сервісні можливості, включаючи настройку параметрів, захист двигуна і ПЧ, діагностику. Мікропроцесорні системи керування адаптовані до задач керування в реальному часі і мають інтегровані в кристал периферійні пристрої: мультиплексори, АЦП, широтно-імпульсні модулятори, швидкодіючі дискретні та імпульсні пристрої введення/виведення як паралельного, так і послідовного типу

тощо. Таким чином, реалізація раціональних технічних рішень на базі сучасної елементної бази силових електроніки та мікроелектроніки дозволила значно поліпшити масогабаритні показники і споживчі характеристики ПЧ третього покоління.

4.3. Класифікація перетворювачів частоти

Загальною ознакою для класифікації ПЧ є їх мобільність. За цією ознакою ПЧ поділяються на: статичні, які знайшли найбільше розповсюдження; електромашинні, які історично були першими ПЧ, але через властиві їм недоліки (великі маса та габарити, висока вартість, низький ККД) зараз майже не використовуються.

Розрізняють ПЧ: із проміжною ланкою постійного струму; з безпосереднім зв'язком живильної мережі і навантаження [17]. На рис. 4.2 представлена схема класифікації ПЧ.

Для керування швидкістю АДКЗ широке поширення одержали ПЧ із проміжною ланкою постійного струму. Змінна напруга живильної мережі випрямляється за допомогою керованого випрямляча, фільтрується й подається на інвертор.

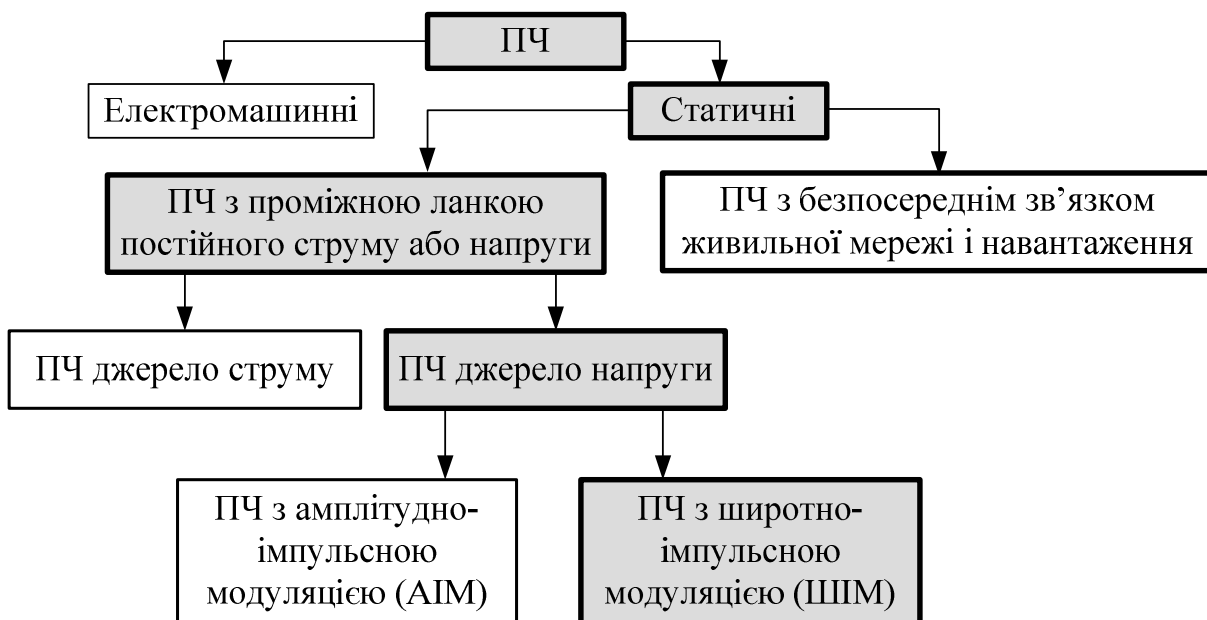


Рис. 4.2. Класифікація ПЧ

Функції регулювання частоти вихідної напруги здійснює інвертор, а напруги - випрямляч. Частіше обидві функції здійснює інвертор, а випрямляч виконується некерованим. Головними перевагами ПЧ із проміжною ланкою постійного струму є:

- можливість одержання на виході ПЧ широкого діапазону частот, не залежного від частоти живильної мережі. Такий діапазон повністю покриває потреби електроприводів різного призначення, у тому числі високошвидкісних, середньошвидкісних і тихохідних, прецизійних електроприводів з широким і надшироким діапазоном регулювання швидкості;
- можливість використання простих силових схем і систем керування ПЧ для електроприводів з невисокими вимогами щодо діапазону регулювання, швидкодії й інших показників;
- можливість нарощування складності силової частини й системи керування ПЧ відповідно до рівня підвищення вимог до електропривода, не допускаючи надмірної складності системи;
- можливість реалізації в порівняно малоелементній структурі перетворювача різноманітних алгоритмів керування, що задовольняють вимогам до електроприводів різного призначення;
- легкість трансформації перетворювача для роботи в установках з живленням електрообладнання від автономних джерел або локальної мережі постійного струму.

Основні недоліки ПЧ із проміжною ланкою постійного струму:

- дворазове перетворення енергії, що збільшує втрати енергії й погіршує массогабаритні показники перетворювача;
- наявність у ланці постійного струму силового фільтра як невід'ємного елемента ПЧ, що містить батарею конденсаторів значної ємності (у схемах ПЧ із автономними інверторами напруги) або реактора зі значною індуктивністю (у системах ПЧ із автономним інвертором струму). Елементи силового фільтра збільшують масу й габарити перетворювача, причому електролітичні конденсатори фільтра не завжди задовольняють вимогам високої надійності.

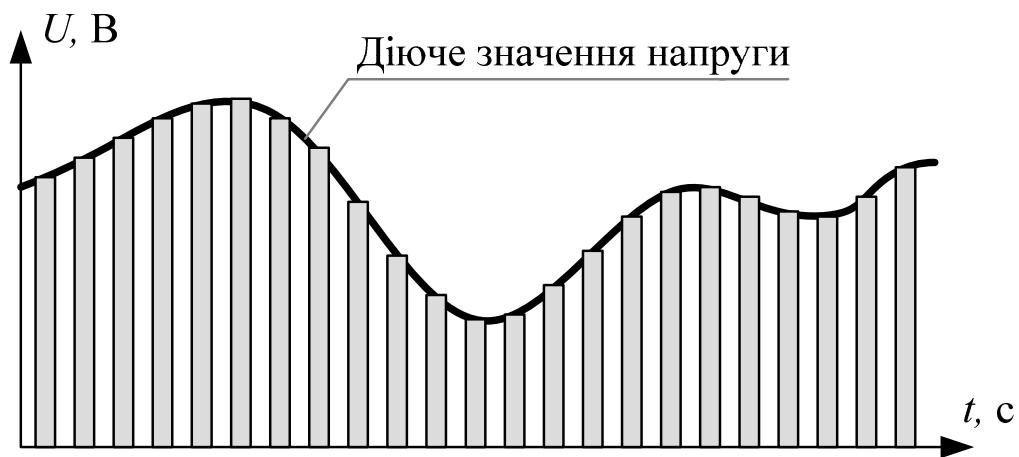
Перетворювач частоти (джерело струму) - має проміжну ланку постійного струму. На виході автономного інвертора струму формуються імпульси струму, змінної частоти, які подаються на обмотки двигуна. Цей перетворювач є джерелом струму для двигуна, тобто на виході інвертора імпульси струму не залежні від навантаження. Залежним параметром тут є напруга.

Перетворювач частоти (джерело напруги) - має проміжну ланку постійної напруги. На виході такого перетворювача формується пульсуюча напруга (послідовність імпульсів напруги), які не залежать

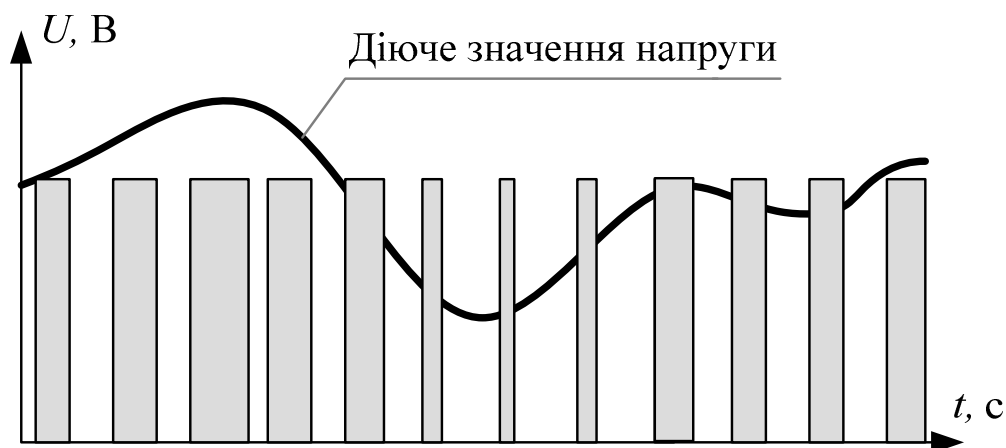
від навантаження на виході інвертора. Залежним параметром є струм у обмотках двигуна.

ПЧ (джерело напруги) у свою чергу підрозділяється на два типи. Перший тип - ПЧ з амплітудною імпульсною модуляцією (АІМ) і другий тип - ПЧ з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ).

АІМ - це метод керування, при якому зміна амплітуди імпульсу напруги (висоти імпульсу) на вході випрямляча проходить синхронно зі зміною частоти на виході з інвертора. Частота подачі імпульсів напруги у статорні обмотки двигуна регулюється. Регулювання напруги здійснюється шляхом зміни величини імпульсу (рис. 4.3, а). Вихідна форма напруги – прямокутна, отже діюче значення напруги має велику кількість гармонік низьких ступенів, включаючи 5-ю й 7-ю гармоніки, що приводить до пульсації моменту двигуна.



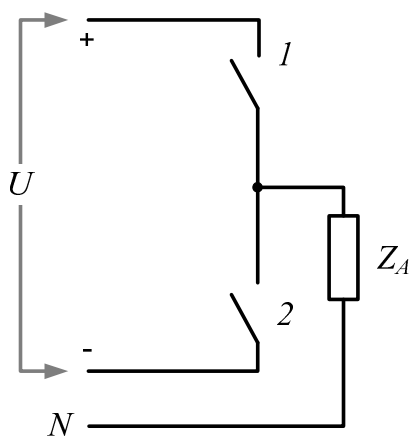
а)



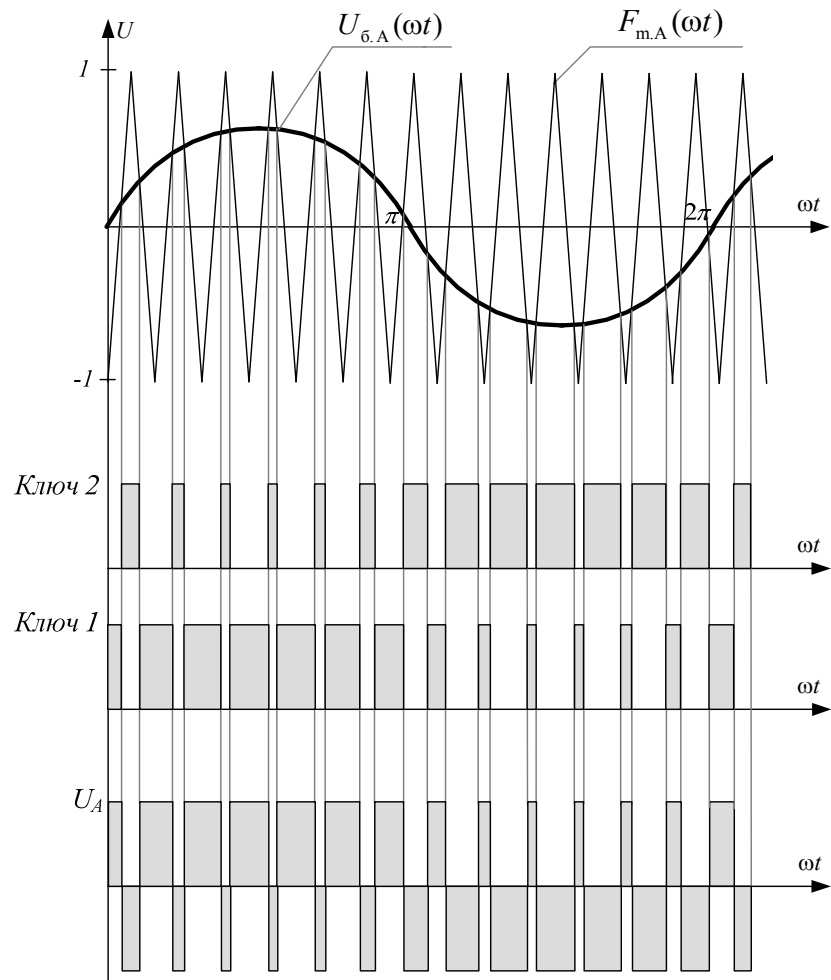
б)

Рис. 4.3. Амплітудно- (а) та широтно- (б) імпульсна модуляція напруги на виході інвертора

ШІМ - це метод керування, при якому амплітуда напруги (висота імпульсу) залишається постійною на виході випрямляча, а на виході інвертора ширина імпульсів напруги і їхня кількість за напівперіод регулюється (рис. 4.3, б). За рахунок збільшення чи зменшення ширини імпульсу діюче значення напруги змінюється. Зміна кількості імпульсів та їх ширини за період дозволяє регулювати частоту та напругу на виході інвертора. Розглянемо більш детально процес формування напруги на виході інвертора при ШІМ-модуляції. На рис. 4.4, а показана спрощена схема вмикання фази А, яка дозволяє встановити характер зміни напруги у цій фазі за рахунок комутації ключів 1 і 2. На рис. 4.4, б зображені графіки бажаної напруги фази А (позначимо її так $U_{6.A}(\omega t)$) і двополярної двосторонньої модуляційної функції $F_{m.A}(\omega t)$, що змінюється по лінійному закону від -1 до 1 і в зворотному напрямі від 1 до -1 на інтервалі $0 \leq \omega t \leq 2\pi$.



а) спрощена схема перемикачів інвертора фази А



б) графік напруги фази А при ШІМ-модуляції (сірим кольором показані ділянки коли ключі 1 і 2 відкриті)

Рис. 4.4. ШІМ-алгоритм формування напруги у фазі А

Сигнал пилоподібної напруги $F_{m.A}(\omega t)$ виробляє генератор високої частоти. В момент рівності миттєвих значень $U_{6.A}(\omega t)$ і $F_{m.A}(\omega t)$ на спадаючих ділянках $F_{m.A}(\omega t)$ (ділянка коли функція $F_{m.A}(\omega t)$ зменшується) відкривається ключ 1 , а в момент рівності $U_{6.A}(\omega t)$ і функції $F_{m.A}(\omega t)$ на зростаючих ділянках ключ 1 закривається. Відкривання і закривання ключа 2 здійснюється протилежно до ключа 1 : коли ключ 1 відкритий то 2 закритий і навпаки (рис. 4.4, б). Таким чином, у фазі А формується послідовність П-подібних імпульсів напруги [18]. Таку функцію напруги фази А можна розкласти у ряд Фур'є. При цьому основна гармоніка напруги фази А повторює функцію бажаної напруги $U_{6.A}(\omega t)$. Збільшення частоти пилоподібного генератора призведе до зменшення дії вищих гармонік. Аналогічні побудови можна зробити для фаз В і С, з умовою, що функції бажаних напруг будуть відставати від $U_{6.A}(\omega t)$ на кути $2\pi/3$ та $4\pi/3$ радіан.

Найбільш масове практичне застосування в системах регульованих електроприводів змінного струму одержали ПЧ із проміжною ланкою постійного струму, а з них - перетворювачі з автономними інверторами напруги з ШІМ-модуляцією.

4.4. Будова сучасних перетворювачів частоти

Силова частина ПЧ складається з вхідного випрямляча, ланки постійного струму, інвертора та системи керування [3]. Вхідний випрямляч виконаний за схемою Ларіонова. Випрямляч приєднаний до ланки постійного струму, яка складається з термісторів R_1 і R_2 та електролітичних конденсаторів великої ємності $C1$ і $C2$. Термістори, з від'ємним температурним коефіцієнтом, призначені для обмеження зарядного струму при вмиканні перетворювача. В холодному стані термістори мають великий опір. Після вмикання перетворювача в мережу струм, що протікає через термістори, розігріває їх, внаслідок чого вони різко зменшують свій опір. Таким чином, термістори обмежують зарядний струм конденсаторів, а в процесі роботи практично не впливають на величину напруги конденсаторів.

Конденсатори $C1$ і $C2$ згладжують напругу ланки постійного струму, фільтрують споживаний з мережі струм, забезпечують повернення реактивної енергії двигуна при вимиканні інвертора та при перехідних процесах і забезпечують повернення енергії при частотному гальмуванні двигуна M . Резистори $R2$ і $R3$, увімкнені паралельно

кожному конденсатору, зрівнюють їх заряд. До виходу ланки постійного струму приєднано трифазний інвертор напруги, який складається з трьох півмостів на транзисторах $VT2 - VT7$, зворотних діодів $VD2 - VD7$ та гальмівного ключа на транзисторі $VT1$ зі зворотним діодом $VD1$. До гальмівного ключа при необхідності приєднують гальмівний резистор, який буде розсіювати енергію в режимі частотного гальмування двигуна.

Зворотні діоди $VD2 - VD7$ служать для передачі енергії від двигуна до джерела живлення (у ланку постійного струму). Основною особливістю інвертора представленого на рис. 4.5 є те, що напруга на навантаженні не залежить від нього і визначається лише черговістю комутації транзисторів інвертора. Досягається це введенням шунтуючих діодів $VD2 - VD7$ для проведення індуктивного струму навантаження. В результаті цього інвертор має жорстку зовнішню характеристику, тобто при зміні навантаження напруга інвертора практично не змінюється, тому такий інвертор називається інвертором напруги. Інвертори можуть комутуватись від електромережі змінного струму і автономно за допомогою спеціальних блоків, що мають конденсатори й котушки індуктивності. В частотно-регульованих приводах, як правило, використовуються автономні інвертори. Через велику частоту комутацій ключів інвертора (близько 16 кГц) між додатною та від'ємною шинами ланки постійного струму виникають великі перенапруги з частотою вільних коливань в кілька мегагерц. Для захисту силового модулю від пробою до його затискачів приєднано так званий снабберний конденсатор малої ємності $C3$. Ємність цього конденсатора в десятки разів менша ємності електролітичних конденсаторів, що дозволяє ефективно боротися з перенапругами.

Керування інвертором здійснюється від мікропроцесора шляхом широтно-імпульсної модуляції напруги. Транзистори інвертора працюють у ключовому режимі. Якщо коефіцієнт заповнення імпульсу в періоді змінювати за синусоїдним законом, то так же буде змінюватися і середнє значення напруги фази в періоді.

На входи мікропроцесора подаються аналогові або цифрові сигнали від задавачів (потенціометр, мікроконтролер) та інших зовнішніх керуючих пристроїв, датчиків напруги ДН і струму ДС, сигнали аварійного стану інверторів та від інших пристроїв.

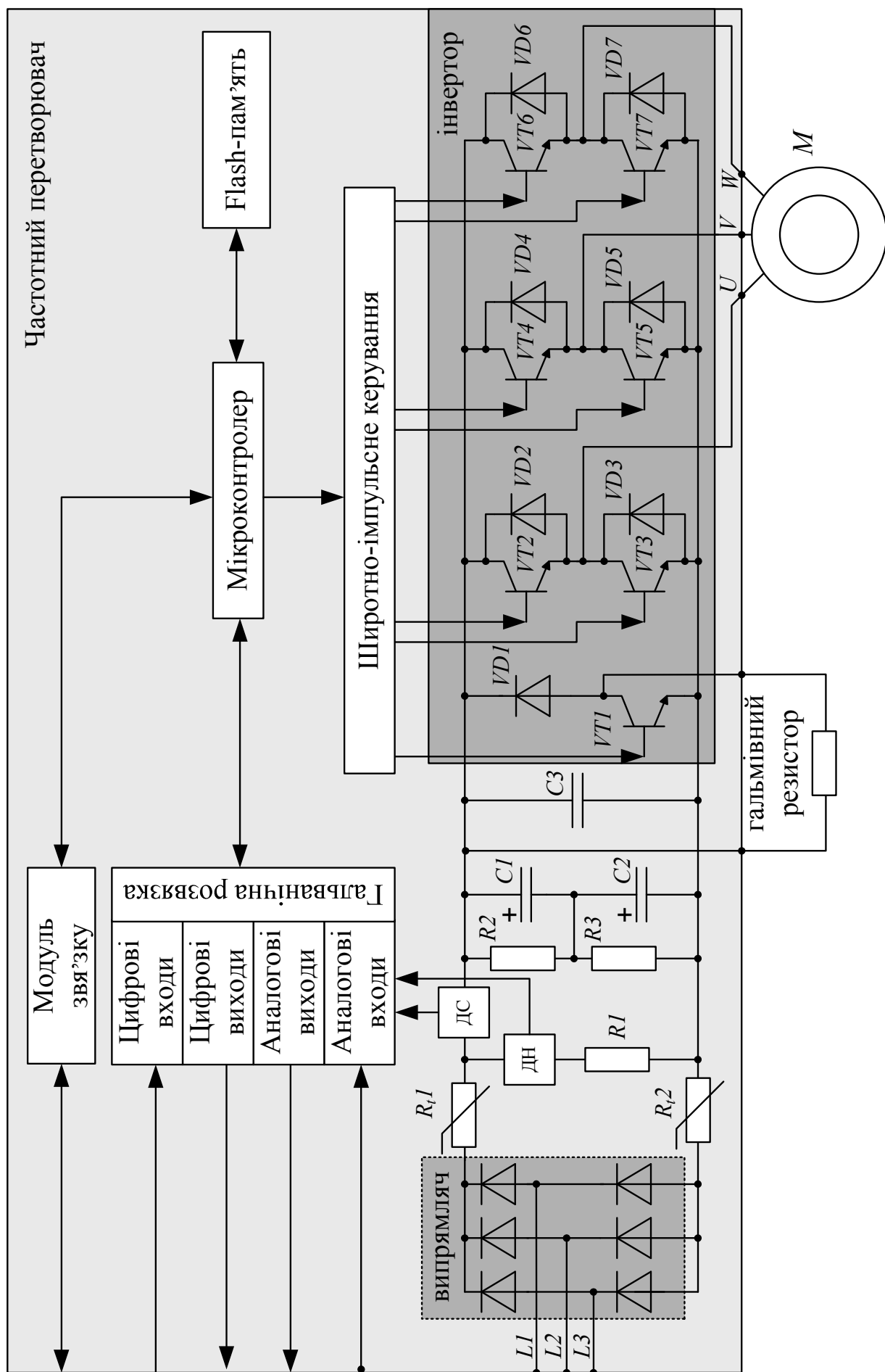


Рис. 4.5. Схема частотного перетворювача

4.5. Комутаційні процеси у трифазних автономних інверторах напруги (АІН) при формуванні вихідної напруги по методу ШІМ

Одні з найбільш поширених пристроїв сучасної силової електроніки - АІН. У складі ПЧ вони перетворюють постійну напругу у змінну регульованої частоти і амплітуди. Вони також є основними блоками пристроїв безперебійного живлення. Оскільки вихідна напруга АІН складається з прямокутних імпульсів, то формування необхідної частоти і величини напруги здійснюється за рахунок модуляції вихідних імпульсів. В даний час найбільше поширення отримала широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), що виражається у впливі на тривалість імпульсів і моменти їх появи.

Опис процесів, що відбуваються за період вихідної напруги при багаторазовій комутації швидкодіючих силових ключів, послідовність роботи таких ключів при формуванні напруги на виході ПЧ, прикладеної до статора АД буде дано у цьому пункті.

Розглянемо процеси, що відбуваються при роботі трифазного АІН, зібраного по мостовій схемі і підключеного до симетричного активно-індуктивного $R-L$ навантаження, яким моделюється АД (рис. 4.6).

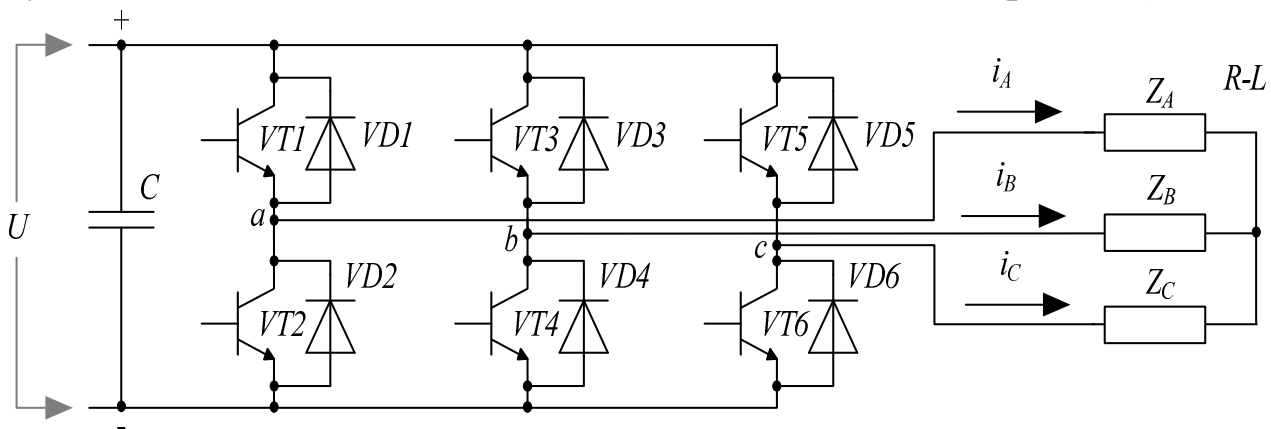


Рис.4.6. Схема трифазного АІН з активно-індуктивним навантаженням

У кожному плечі моста інвертора зустрічно-паралельно включені біполярний транзистор з ізолюваним затвором IGBT ($VT1-VT6$) та швидкодіючий зворотний діод ($VD1-VD6$). Додатні напрямки фазних струмів i_A , i_B та i_C в $R-L$ навантаженні вказані стрілками. До шини з додатною полярністю напруги U (U - напруга на конденсаторі C ланки постійного струму) приєднані колектори трьох транзисторів і катоди трьох зворотних діодів; ці вентиля зазвичай називають верхніми, на рис. 4.5 їм присвоєні непарні (1, 3 і 5) номери. До шини з від'ємною

полярністю напруги під'єднані емітери (аноди) трьох нижніх, позначених парними (2, 4 і 6) номерами транзисторів (зворотних діодів).

Припустимо, що вентиля інвертора є ідеальними ключами, тобто володіють нульовим часом перемикання і, завдяки цьому, дозволяють здійснити багаторазову комутацію за період вихідної напруги інвертора, що формується за методом ШІМ. Крім того, для полегшення аналізу роботи АІН припускають, що ключі мають нульовий опір у замкненому стані і нескінченний опір – у розімкненому. Таким чином, схему представлену на рис. 4.6 можна подати у іншому (більш простому) вигляді (рис. 4.7).

На рис. 4.7. транзисторно-діодний модуль включений у одне плече моста інвертора позначено як звичайний ключ, який має двосторонню провідність. Усі ключі позначені цифрами: верхні – непарними, нижні – парними.

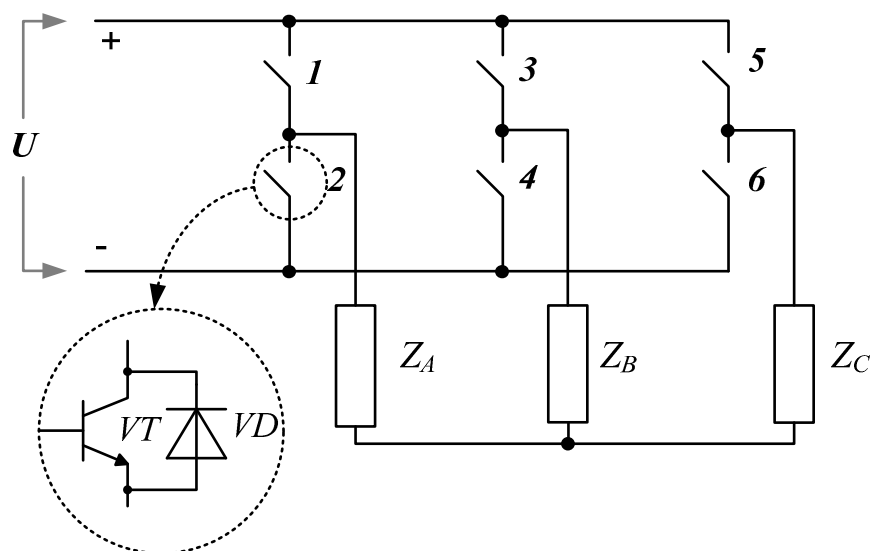


Рис.4.7. Спрощена схема трифазного АІН з активно-індуктивним навантаженням

У реальних схемах АІН пряма провідність кожного із силових керованих ключів (у напрямку від позитивного до негативного полюса джерела живлення інвертора) забезпечується керованим напівпровідниковим приладом (тиристором або транзистором), а зворотна провідність - зворотним, як правило, некерованим вентиляем. Таким чином, якщо керований елемент силового ключа перебуває у включеному стані, то відповідне плече моста має двосторонню провідність струму. Якщо ж керований елемент (ключ) перебуває у виключеному стані, то відповідне плече моста має лише зворотну

провідність (струм може протікати лише від АД до ланки постійної напруги).

Інвертування, тобто перетворення постійної напруги джерела живлення в трифазну змінну напругу необхідної частоти на вихідних затискачах А, В, С інвертора здійснюється комутацією ключів у плечах моста з певною частотою й у певній послідовності. Форма вихідної напруги інвертора визначається насамперед обраним законом перемикання ключів - законом комутації.

Розглянемо основні особливості робочих процесів у трифазному інверторі напруги при роботі його на АД у сталих режимах. На рис 4.8 представлена діаграма станів трифазного мостового інвертора, яка показує порядок перемикання його ключів відповідно до закону комутації. Інтервали часу, протягом яких існує симетрична двостороння провідність (тобто провідність від АД до ланки постійної напруги та у зворотному напрямку, причому провідності ключа у обох напрямках однакові) відповідних плечей моста, виділені на діаграмі станів жирними горизонтальними лініями. Індекс горизонталі відповідає позначенню силового керованого ключа. Відповідно до показаної на діаграмі послідовності перемикання кожний із ключів перебуває у включеному стані протягом напівперіоду вихідної частоти (π). Під термінами „тривалість включеного стану” і „інтервал провідності ключа” мається на увазі саме інтервал часу, протягом якого існує симетрична двостороння провідність ключа й відповідного плеча моста. З діаграми рис. 4.8 видно, що протягом періоду робочої частоти ($0 \dots 2\pi$) інвертор перебуває в шести станах (I - VI), які послідовно змінюють один одного. Кожен з таких станів характеризується певною комбінацією включених і виключених ключів, отже для кожного стану характерна „своя” комбінація підключення навантаження до ланки постійної напруги АІН.

У кожному зі станів інвертора будь-яка пара ліній живлення навантаження (наприклад, А і В) підключена або до різнополярних шин джерела живлення (до „+” та „-”), або до однієї із шин джерела й замкнута накоротко через ключі інвертора. У першому випадку лінійна напруга на виході ідеалізованого інвертора дорівнює напрузі джерела живлення U (це напруга у ланці постійного струму), а в другому - нулю.

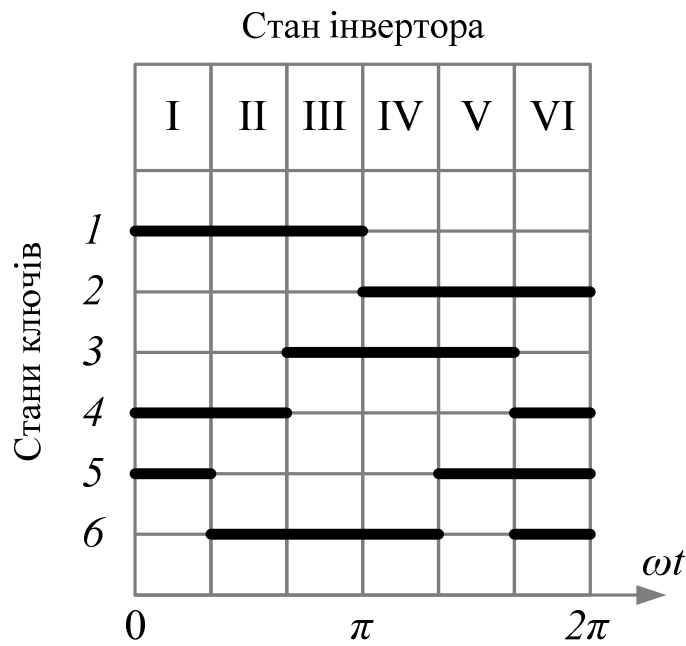


Рис. 4.8. Діаграма станів і графіки лінійних напруг трифазного АІН

Відповідні графіки лінійних напруг на виході інвертора показані на мал. 4.9. Якщо обмотки АД з'єднані за схемою „трикутник”, то лінійні напруги одночасно є фазними. Графіки лінійних напруг ідеалізованого інвертора при такому законі комутації ключів являють собою знакозмінні імпульсні функції, амплітуда яких дорівнює величині напруги джерела живлення, а частота дорівнює частоті комутації ключів.

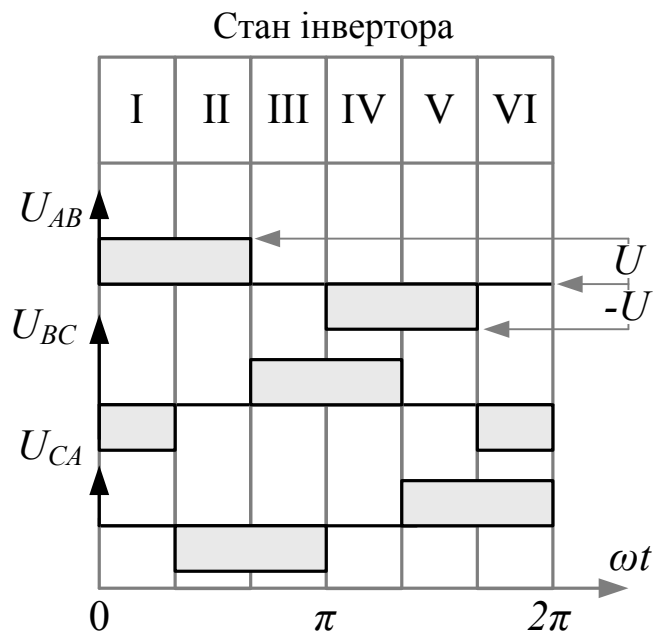


Рис. 4.9. Графіки лінійних (фазних) напруг на виході ПЧ при з'єднанні обмоток АД за схемою „трикутник”

Як видно з рис. 4.9, графік лінійної напруги автономного інвертора є несинусоїдальним. Він може бути представлений у вигляді суми окремих складових (гармонік), причому такий розклад функції напруги у ряд Фур'є не буде містити гармонік кратних двом та трьом. Амплітуда лінійної напруги основної гармоніки буде трохи більша ніж напруга U (у ланці постійної напруги):

$$U_{л.осн. max} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} U \approx 1,1U, \quad (4.1)$$

де $U_{л.осн. max}$ - амплітуда основної гармоніки лінійної напруги на виході ПЧ; U - напруга ланки постійного струму ПЧ. Діюче значення лінійної напруги основної гармоніки:

$$U_{л.осн} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} U \approx 0,78U. \quad (4.2)$$

Амплітуди вищих гармонік напруги зворотно пропорційні їх номерам, тобто чим вища гармоніка, тим меншу амплітуду вона має. Діюче значення вихідної лінійної напруги ПЧ:

$$U_{л} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U \approx 0,81U. \quad (4.3)$$

Доля основної гармоніки у діючому значенні вихідної напруги ПЧ:

$$\frac{U_{л}}{U_{л.осн.}} = \frac{3}{\pi} \approx 0,955. \quad (4.4)$$

У випадку з'єднання обмотки АД в „зірку” графіки фазних напруг можуть бути знайдені з аналізу схем живлення фаз навантаження, наведених для кожного зі станів інвертора на рис. 4.10. Тут показані тільки ті ключі, які перебувають у провідному стані. Напруга ланки постійного струму розподіляється між фазами навантаження (у випадку їхньої симетрії) у такий спосіб: одна третина величини напруги спадає на паралельному з'єднанні фаз навантаження (АД) і дві третини - на послідовно включену фазу. Пояснимо такий розподіл напруг на фазах АД. Електрично АД представляє собою трифазне симетричне навантаження – його обмотки мають однакові повні опори ($Z_A = Z_B = Z_C = Z$). Еквівалентний опір з'єднання обмоток, наприклад, для стану інвертора І такий:

$$Z_{екв} = \frac{Z_A Z_B}{Z_A + Z_B} + Z_C = \frac{ZZ}{Z + Z} + Z = \frac{Z^2}{2Z} + Z = \frac{Z}{2} + Z = \frac{3Z}{2}. \quad (4.5)$$

Струм, який протікає по такому еквівалентному опорі визначається так:

$$i = \frac{2U}{3Z}. \quad (4.6)$$

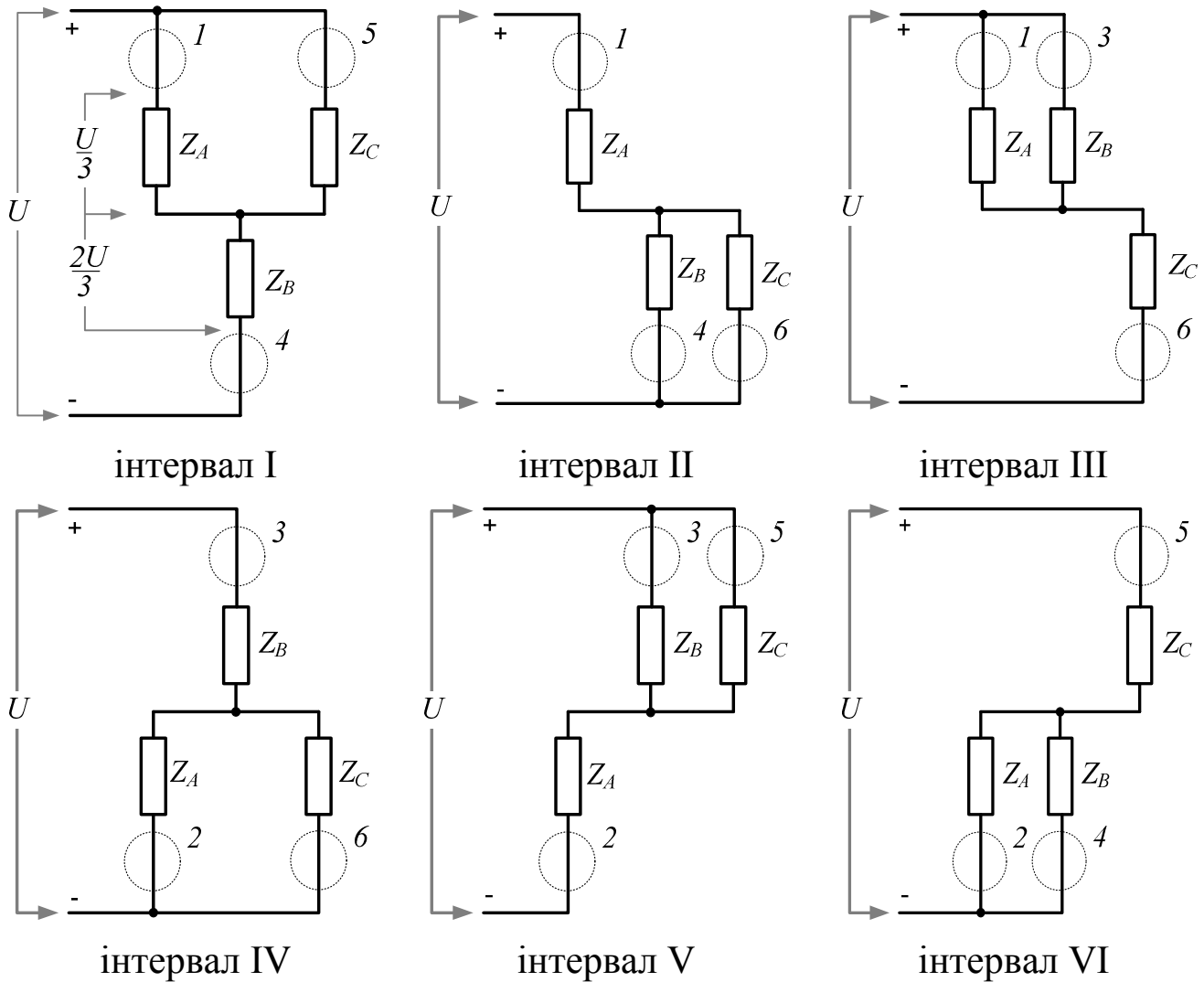


Рис. 4.10. Схеми живлення обмоток АД при їх з'єднанні за схемою „зірка”

Тепер визначимо спад напруги на опорі Z_B , який включений послідовно:

$$U_B = iZ_B = \frac{2U}{3Z} Z = \frac{2U}{3}. \quad (4.7)$$

Отже дві третини напруги спадає на послідовно включений фазі АД (на фазі В), решта напруги (одна третина) – на паралельному з'єднанні фаз А і С двигуна, тобто до кожної паралельно включеної фази прикладається одна третина напруги ланки постійного струму ПЧ.

На рис. 4.11 представлені графіки фазних напруг на виході ПЧ, які відповідають прийнятому закону комутації ключів 1-6.

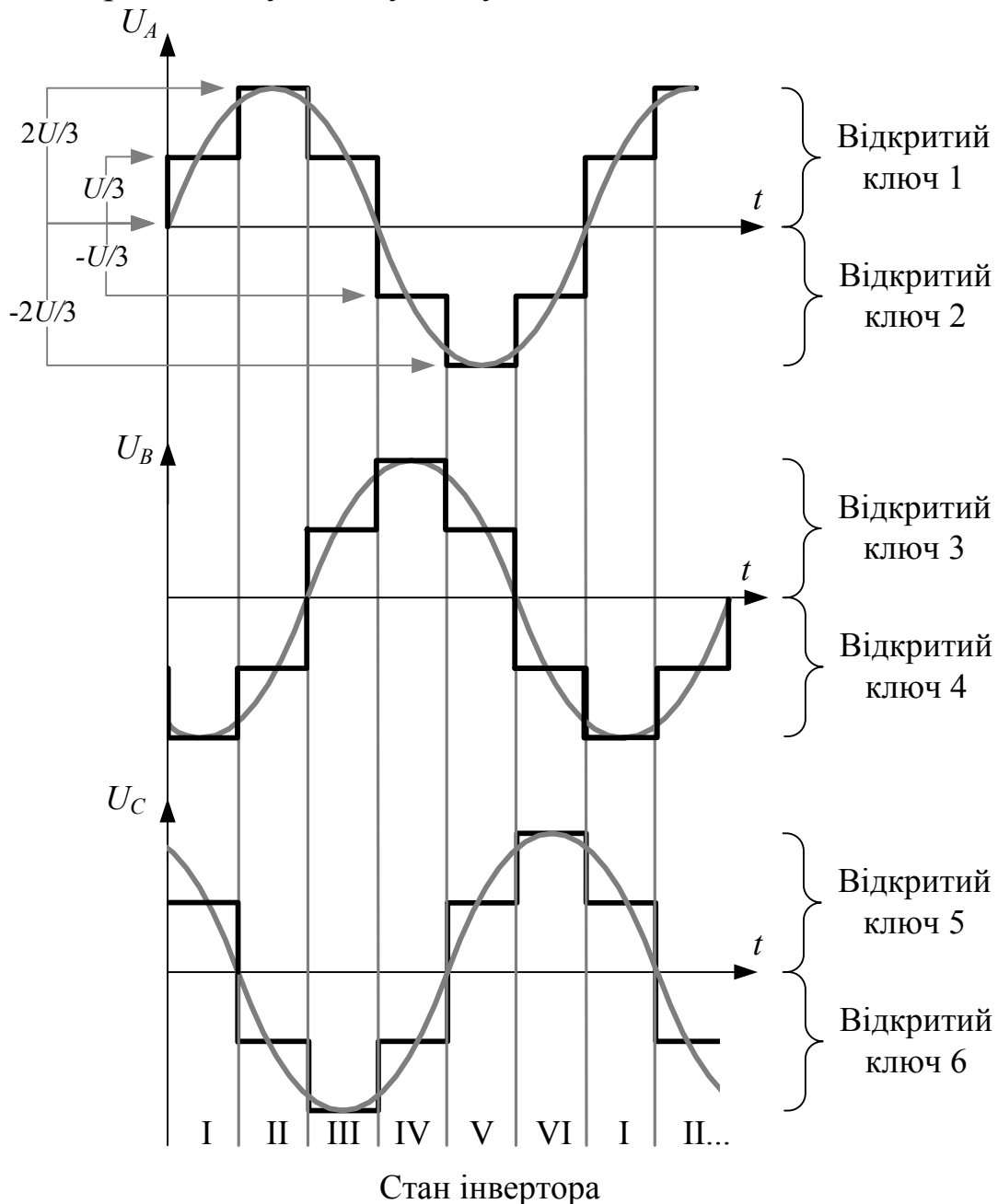


Рис. 4.11. Графіки фазних напруг на виході ПЧ при з'єднанні обмоток АД за схемою „зірка”

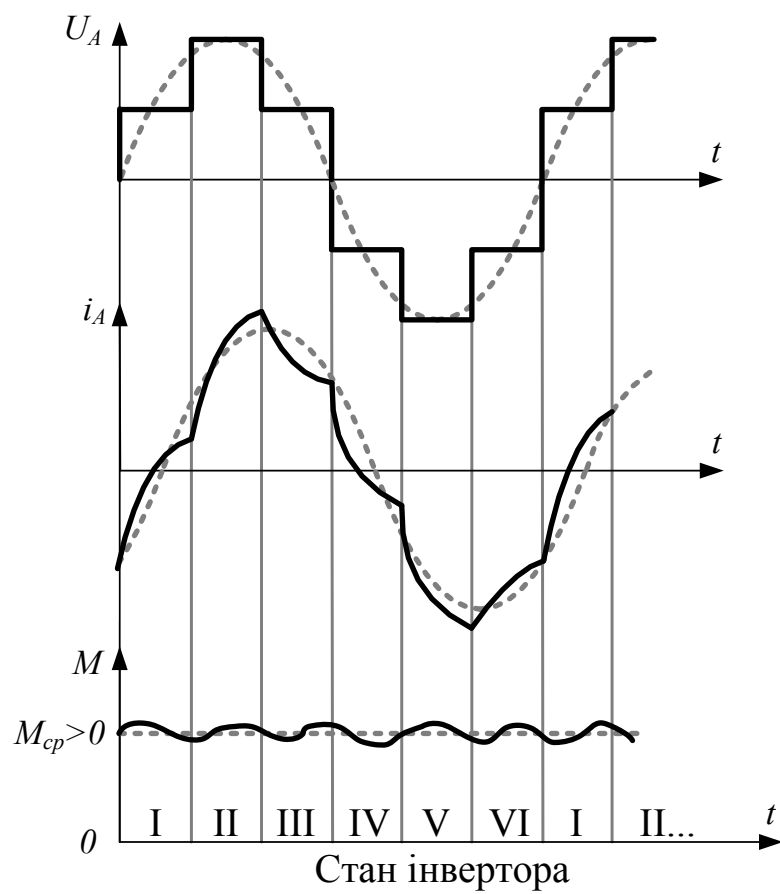
Несинусоїдальні графіки фазних напруг можуть бути представлені у вигляді суми окремих гармонічних складових за виключенням гармонік кратних двом та трьом. На рис. 4.11 лінією сірого кольору

показана основна гармоніка фазної напруги. Визначити амплітудне та діюче значення основної гармоніки можна використавши відомі формули (4.1-4.2). Для цього їх необхідно поділити на $\sqrt{3}$. Амплітудні та діючі значення вищих гармонік також необхідно поділити на $\sqrt{3}$. Отже доля основної гармоніки у діючому значенні напруги на виході ПЧ при перемиканні обмоток з „трикутника” на „зірку” не зміниться, тобто вираз (4.4) справедливий для будь-якої схеми з'єднання обмоток АД [12].

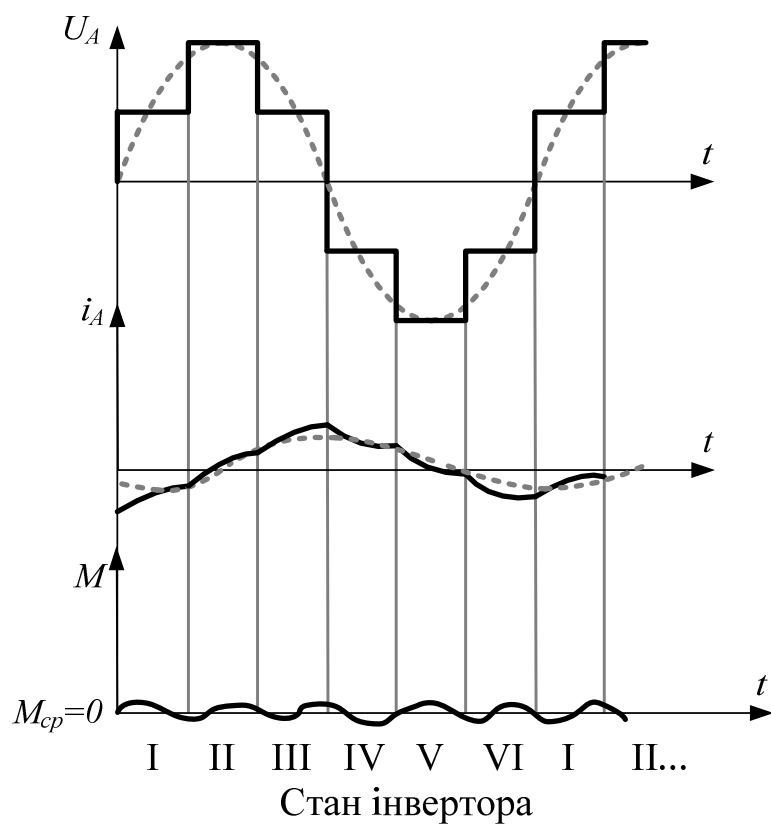
4.6. Аналіз функцій струму та електромагнітного моменту асинхронного двигуна

Струм живлення двигуна є несинусоїдальним внаслідок несинусоїдальності вихідної напруги інвертора. На мал. 4.12 наведені графіки напруги на затискачах фази А і типові графіки струмів статора АД в трьох різних режимах його роботи: а) приводний з номінальним ковзанням ($s=s_{\text{ном}}$) (рис. 4.12, а); б) режим холостого ходу ($s=0$) (рис. 4.12, б); в) генераторний режим ($s<0$) (рис. 4.12, в). Для кожного з режимів наведені графіки струмів в елементах схеми інвертора (основна гармоніка струму та напруги фази А показана сірою штриховою лінією) й графік електромагнітного моменту двигуна (середнє значення електромагнітного моменту показано сірою штриховою лінією).

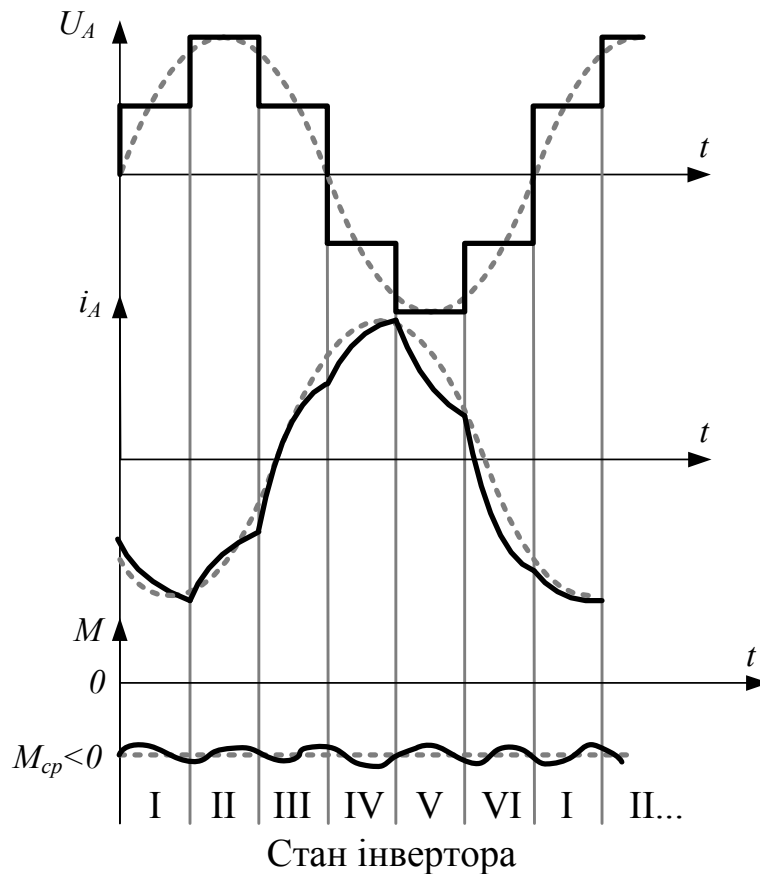
Кожна трифазна гармонійна складова напруги створює у двигуні обертове магнітне поле, період обертання якого залежить від періоду, а напрямок обертання - від порядку чергування фаз напруг гармоніки. Отже у двигуні збуджується безліч магнітних полів, що обертаються з різними швидкостями в різних напрямках. Однак у порівнянні з основною вищою гармонікою напруги інвертора мають менші амплітуди й більші частоти. Тому споживані двигуном струми вищих гармонік виявляються порівняно малими, а моменти - дуже малими в порівнянні зі струмами й моментами від основної гармоніки.



а) приводний режим ($s = s_{\text{НОМ}}$)



б) режим холостого ходу ($s = 0$)



в) генераторний режим ($s < 0$)

Рис. 4.12. Графіки фазної напруги, струму і електромагнітного моменту для різних режимів роботи двигуна

Однак, як видно з наведених графіків (рис. 4.12), при зміні ковзання ротора, викликаного, наприклад, зміною навантаження, струм першої гармоніки двигуна змінюється в широких межах (цей струм може змінюватись від струму холостого ходу до пускового струму АД), а струми вищих гармонік змінюються незначно.

Вищі гармоніки напруги інвертора породжують не стільки додаткові постійні складові моменту, скільки змінні складові, обумовлену взаємодією вищих гармонік з першою гармонікою і між собою. Найбільш значимими в механізмі утворення пульсацій електромагнітного моменту є результати взаємодії п'ятої й сьомої гармонік струму з основною гармонікою магнітного поля двигуна.

Відповідно до законів механіки пульсації моменту породжують нерівномірність обертання ротора, додаткові вібрації, шуми й умови для виникнення небажаних резонансних явищ у механічній системі. При номінальній частоті напруги (50 Гц) внаслідок підвищеної частоти пульсацій моменту (300 Гц) і інерції механічної системи пульсації швидкості виявляються порівняно невеликими і прийнятними для

багатьох виробничих механізмів. Однак при зниженні частоти інвертора і відповідно частоти пульсацій електромагнітного моменту нерівномірність обертання ротора зростає, тому що ротор встигає „відпрацьовувати” пульсації моменту. При малих частотах виникає так званий кроковий режим роботи двигуна з періодичними зупинками ротора (ротор двигуна рухається ривками, начебто „крокує”). Ці фактори обмежують допустимий діапазон регулювання швидкості електропривода при використанні даного закону комутації ключів інвертора.

Іншим негативним фактором впливу несинусоїдальності живлячої напруги є наявність додаткових втрат від вищих гармонік, що приводить до зниження допустимого навантаження на валу двигуна за умовами його нагрівання.

Для усунення відзначених вище небажаних явищ і розширення діапазону регулювання швидкості використовують удосконалені закони комутації ключів інвертора, які є досить складними. На рис. 4.13. показано напругу на виході інвертора (фаза А) при „удосконаленому” комутаційному законі, який у значній мірі зменшує вказані недоліки „базового” закону комутації ключів інвертора [12].

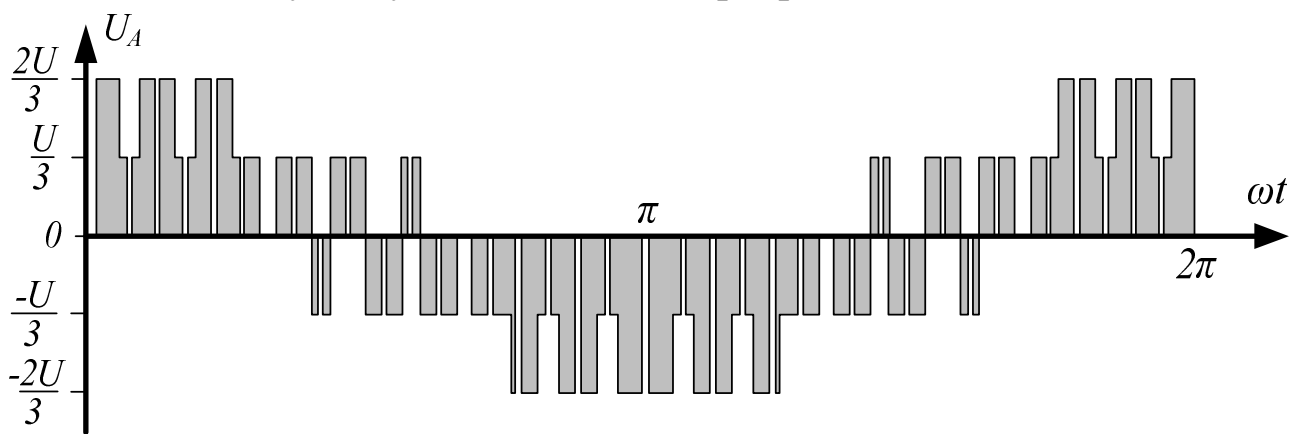


Рис. 4.13. „Удосконалений” ШІМ-алгоритм формування напруги на виході інвертора

4.7. Завдання та питання для самоконтролю

1. На основі яких напівпровідникових приладів будується інвертор ПЧ?
2. Вкажіть ознаки, за якими класифікують ПЧ.
3. Які переваги та недоліки властиві ПЧ з проміжною ланкою постійної напруги?
4. Розкрийте сутність АІМ- та ШІМ-алгоритмів формування напруги на виході ПЧ.
5. З яких основних елементів складається сучасний ПЧ з проміжною ланкою постійної напруги?
6. Яку кількість станів має інвертор ПЧ за період вихідної напруги при базовому законі комутації його ключів?
7. Вкажіть співвідношення між напругою ланки постійної напруги ПЧ та діючою лінійною напругою на виході ПЧ.
8. Яка доля основної гармоніки у діючому значенні вихідної напруги ПЧ?
9. Яка величина напруги спадає у фазі двигуна, яка підключена паралельно до іншої фази при модуляції напруги по методу ШІМ?
10. Вкажіть режим роботи АД при якому питома дія від вищих гармонік струму у обмотках двигуна буде найбільша.
11. Як називається ефект короточасних зупинок ротора АД при зниженій частоті напруги живлення? Розкрийте причини виникнення цього ефекту.

5. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИБОРУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ

5.1. Загальні положення

При проектуванні частотно-керованого електроприводу дуже важливо зробити правильний вибір ПЧ. Від цього залежатиме ефективність роботи ПЧ і усього електроприводу в цілому. Якщо потужність перетворювача буде занадто завищена, він не зможе в належній мірі забезпечити захист двигуна, а сам перетворювач буде недовантажений, не говорячи вже про те, що капітальні витрати на придбання перетворювача будуть великі. З іншого боку, якщо потужність перетворювача мала, він не зможе забезпечити високодинамічний режим роботи АД і через перевантаження може вийти з ладу.

Правильна експлуатація також впливає на термін служби ПЧ. При виборі ПЧ потрібно керуватися не лише потужністю двигуна, що підключається, а також діапазоном робочих швидкостей, діапазоном робочих моментів обертання, характером навантаження і циклограмою роботи. У таблиці 5.1. перераховані фактори, які потрібно розглянути при виборі перетворювача [19].

Таблиця 5.1.

Фактори, які впливають на вибір ПЧ

Класифікація		Характеристики			
		Швидкість і момент	Параметри часу	Перевантажувальна здатність	Пусковий момент
1		2	3	4	5
Тип навант-ня	фрикційне, в'язке, високоінерційне, навантаження з передачею і накопиченням енергії	•			•

1		2	3	4	5
Хар-ки швидкості і моменту	постійні момент і швидкість; момент і швидкість, що зменшуються	•	•		
Характер навант-ня	постійне, ударне, періодично-змінне; великий або малий початковий момент	•	•	•	•
Тривалий режим на номінальній швидкості; тривалий режим на низькій/середній швидкості; повторно-короткочасний режим			•	•	
Максимальний вихідний струм (миттєвий); постійний вихідний струм (тривалий)		•		•	
Максимальна та номінальна частота		•			
Потужність джерела живлення; стрибки напруги або перекося фаз; число фаз; частота напруги живлення				•	•
Механічне тертя, втрати в провідниках				•	•
Зміна робочого циклу			•		

Розглянемо детальніше методику вибору ПЧ.

5.2. Вибір перетворювачів частоти по електричній сумісності з двигуном, як електричним навантаженням

5.2.1. Вибір перетворювача частоти, який живить один двигун

При виборі ПЧ для АДКЗ необхідно, щоб виконувались такі необхідні умови:

1. Паспортна потужність ПЧ (кВт) повинна бути більшою або рівною паспортній потужності двигуна (кВт). Згідно з стандартами для електродвигунів приймається, що потужність в кВт відноситься до механічної потужності двигуна на валу, а не до споживаної від джерела живлення активної потужності, як це прийнято для інших споживачів електричної енергії. Багато виробників нормують номінальні струми і потужності ПЧ при роботі на змінний і постійний момент. Деякі виробники виділяють спеціальну серію для роботи тільки на навантаження зі змінним моментом. Для роботи у складі підйомного механізму може знадобитися ПЧ, що має номінальну потужність, на два рівня вищу за паспортну потужність двигуна.

Для розрахунку потужності ПЧ необхідно визначити повну пускову потужність АД:

$$S_{\text{пуск АД}} = \frac{k n}{9550 \eta \cos \varphi} (M_{\text{ном}} + M_{\text{дин}}), \quad (5.1)$$

де $S_{\text{пуск АД}}$ - повна пускова потужність АД, кВА; k - коефіцієнт спотворення струму, пов'язаний з алгоритмом формування синусоїди струму за допомогою ШІМ (цей коефіцієнт може набувати значень від 0,95 до 1,05 і не має розмірності. У першому наближенні можна прийняти його рівним 1); n - частота обертання валу двигуна до якої необхідно розігнати двигун, об/хв; 9550 - коефіцієнт приведення позасистемних (по відношенню до прийнятих в системі СІ) одиниць; η - ККД двигуна (найчастіше це паспортний ККД); $\cos \varphi$ - коефіцієнт потужності із специфікації на двигун, приблизно 0,8...0,85; $M_{\text{ном}}$ - номінальний момент на валу двигуна, Нм:

$$M_{\text{ном}} = \frac{9550 P_{\text{ном}}}{n}, \quad (5.2)$$

де $P_{ном}$ - номінальна потужність двигуна, кВт; $M_{дин}$ - динамічний момент на валу двигуна при пуску, Нм:

$$M_{дин} = \frac{Jn}{9,55t_{пуск}}, \quad (5.3)$$

де J - зведений до вала двигуна момент інерції системи „привод – робочий механізм” (якщо двигун розганяється без навантаження, то зведений момент інерції дорівнює моменту інерції ротора двигуна, який можна знайти в [5]), кгм^2 ; $t_{пуск}$ - тривалість пуску двигуна до швидкості n , с.

При виборі потужності ПЧ необхідне виконання наступної умови:

$$S_{ном ПЧ} \geq \frac{S_{пуск АД}}{1,5}. \quad (5.4)$$

де $S_{ПЧ}$ - повна номінальна потужність ПЧ, кВА.

2. Номінальний (тривалий) струм ПЧ повинен бути не меншим за фактичний тривалий струм, який споживається двигуном, тобто необхідно, щоб виконувалась умова:

$$I_{ном. ПЧ} \geq \frac{k n M_{ном}}{9,55 \sqrt{3} \eta \cos \varphi U_{ном}}, \quad (5.5)$$

де $U_{ном}$ - номінальна напруга живлення АД.

Пусковий струм двигуна обмежується перетворювачем по рівню (120-200% від номінального струму ПЧ) і за часом дії (зазвичай до 60 с). Ці обмеження впливають з надзвичайної чутливості силових IGBT транзисторів ПЧ до перевантажень. Тому умови пуску двигуна при живленні безпосередньо від мережі і при живленні від ПЧ відрізняються.

При подачі номінальної напруги на двигун безпосередньо (наприклад, рубильником, пускачем) від мережі, пусковий струм може досягати семикратного значення від номінального струму двигуна. При пуску двигуна від ПЧ (це плавний пуск, з плавним наростанням частоти) пусковий струм може бути понижений до номінального або фактично споживаного двигуном в усталеному режимі за допомогою відповідних налаштувань ПЧ (головним чином налаштуванням часу розгону). У разі, якщо вимагається швидко розігнати інерційне навантаження може знадобитися ПЧ більшої номінальної потужності, аніж номінальна потужність

двигуна. Перевірка умови неперевищення максимального струму ПЧ при лінійній характеристиці розгону двигуна приведена нижче:

$$I_{\max \text{ ПЧ}} \geq \frac{k n}{9,55\sqrt{3} \eta \cos \varphi U_{\text{ном}}} (M_{\text{ном}} + M_{\text{дин}}), \quad (5.6)$$

де $I_{\max \text{ ПЧ}}$ - максимальний струм ПЧ, А; Якщо умова (5.6) не виконується необхідно збільшувати тривалість розгону $t_{\text{розг}}$. При цьому динамічний момент $M_{\text{дин}}$ зменшиться і умова виконається. Якщо ж тривалість розгону жорстко задана, то необхідно вибирати ПЧ більшої потужності із більшим максимальним струмом.

5.2.2. Вибір перетворювача частоти, який живить декілька двигунів однієї потужності

Для того, щоб здійснити вибір ПЧ для живлення декількох двигунів необхідно визначити повну пускову потужність двигунів:

$$S_{\text{пуск. АД } N} = \frac{k P_{\text{ном}}}{\eta \cos \varphi} \left[1 + \frac{N}{N_s} (I_{\text{пуск}}^* - 1) \right], \quad (5.7)$$

де N - кількість двигунів, паралельно приєднаних до одного ПЧ, шт; N_s - кількість двигунів, що одночасно запускаються від ПЧ, шт; $I_{\text{пуск}}^*$ - коефіцієнт кратності пускового струму одного АД (паспортна величина). Крім того, потрібно виконати розрахунок потрібного пускового струму АД:

$$I_{\text{пуск. АД } N} = N I_{\text{ном}} \left[1 + \frac{N}{N_s} (I_{\text{пуск}}^* - 1) \right], \quad (5.8)$$

де $I_{\text{ном}}$ - номінальний паспортний струм двигуна, А.

Вибір ПЧ виконується на підставі умов, приведених в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2.

Умови, які необхідно враховувати при виборі ПЧ для живлення декількох АД

Перевірка ПЧ	Умова	
	тривалість пуску менше 60 сек	тривалість пуску більше 60 сек
Перевірка за потужністю	$S_{ном ПЧ} \geq \frac{S_{пуск. АД N}}{1,5}$	$S_{ном ПЧ} \geq S_{пуск. АД N}$
Перевірка за струмом	$I_{ном ПЧ} \geq \frac{I_{ном ПЧ}}{1,5}$	$I_{ном ПЧ} \geq I_{пуск. АД N}$

5.3. Загальні зауваження по вибору і експлуатації перетворювачів частоти

1. Характеристики пуску і розгону/гальмування двигуна обмежуються номінальним струмом і перевантажувальною здатністю ПЧ. Якщо потрібно високий пусковий струм (наприклад, для центрифуг, підйомників тощо) необхідно вибрати ПЧ із запасом по потужності або використовувати ПЧ і двигун більшої потужності.
2. При спрацюванні захисту двигуна, який має ПЧ (перевантаження, зниження напруги живлення тощо) напруга з виходу інвертора буде знята, а двигун гальмуватиметься на вільному вибігу. При необхідності швидкої зупинки двигуна при аварійному відключенні напруги необхідно використовувати зовнішнє механічне гальмо.
3. Кількість повторних пусків ПЧ командами ПУСК/СТОП необмежена, якщо інвертор не перевантажується, інакше кожен подальший пуск двигуна від ПЧ повинен здійснюватися не раніше, ніж через 5 - 10 хвилин (час необхідний для охолодження IGBT модуля) за наступних умов: вихідний струм при пуску двигуна $I_{вих} > 1,5 I_{ном}$ впродовж 60 сек, далі ПЧ повинен працювати при номінальному струмі; температура повітря, що охолоджує ПЧ не більше 40°C. Це гранична циклограма повторно-короткочасної роботи ПЧ, яка забезпечує граничнодопустимий нагрів кристалів IGBT. При необхідності здійснення пуску двигуна частіше, ніж один раз за 5 - 10 хв, треба вибрати ПЧ більшої номінальної потужності або працювати при менш важкому режимі (менший

пусковий струм при меншій тривалості пуску, робота зі вихідним струмом меншим за номінальний, низька температура навколишнього повітря).

4. Різні серії ПЧ можуть давати вихідну частоту до 600 Гц при заданні її з цифрової панелі. Помилкове задання високої частоти може привести до руйнування механізму. Для запобігання таким ситуаціям рекомендується встановлювати в параметрах жорстке обмеження вихідної частоти.
5. Фактичний час розгону двигуна визначається номінальним моментом двигуна, моментом опору робочої машини і моментом інерції навантаження.
6. Якщо активізована функція обмеження перенапруг в ланці постійної напруги ПЧ, то час гальмування може автоматично збільшуватися. При необхідності швидкого гальмування високоінерційних навантажень потрібно використовувати гальмівний резистор або вибрати ПЧ більшої потужності.
7. Оптимальний варіант ступеню захищеності для більшості типів ПЧ IP54 дозволяє відмовитися від установки обладнання в шафу й встановлювати ПЧ у безпосередній близькості від виконавчого механізму. Залежно від стандартного типу виконання визначається сфера застосування ПЧ і вирішується питання з установкою. Захищене виконання ПЧ актуально для насосів, кранів, конвеєрів, компресорів, вентиляційних установок та іншого обладнання, що функціонує в несприятливих умовах.

5.4. Загальні зауваження по вибору і експлуатації асинхронних двигунів при живленні від перетворювача частоти

5.4.1. Стандартні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором

1. При роботі стандартного АД на швидкості нижче за номінальну (особливо з моментом близьким до номінального) можливе перегрівання двигуна через зменшення охолодження за рахунок зниження швидкості обдування власним вентилятором. Можливе рішення цієї проблеми - застосування зовнішнього незалежного вентилятора.
2. Стандартний АД може забезпечити тривалий максимальний (з умов теплового режиму) момент тільки на номінальній частоті

обертання, тому, при зниженні швидкості обертання необхідно зменшувати навантаження на валу двигуна.

3. Для забезпечення тривалих номінальних моментів при низьких швидкостях обертання слід використовувати спеціальні двигуни (можливе успішне застосування стандартних двигунів з номінальними частотами 750, 1000, 1500 об/хв) або двигунів підвищеної потужності.
4. При експлуатації стандартного двигуна на великих частотах живлення слід враховувати обмеження пов'язані з ресурсом підшипників, а також обмеження через виникнення підвищеної вібрації в результаті залишкового дисбалансу ротора і виконавчого механізму.
5. Вентилятор двигуна сильніше шумітиме на швидкостях вищих за номінальну.

5.4.2. Спеціальні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором та механічні частини приводу

1. У заглибного електродвигуна номінальний струм більший, ніж у стандартного двигуна такої ж потужності. Це необхідно враховувати при виборі потужності ПЧ. При живленні двигуна по довгому кабелю на ньому спадає значна напруга, що у свою чергу призводить до зниження моменту, який розвивається двигуном. В цьому випадку потрібно використовувати кабель живлення з великим перерізом.
2. У випадку використання вибухобезпечного двигуна він повинен бути встановлений і змонтований у відповідність з вимогами по вибухобезпечності. Деякі ПЧ не відповідають спеціальним вимогам по вибухобезпечності.
3. Використання мотор-редукторів пов'язано зі змащуванням зубчастих зачеплень в редукторах. Вимоги до швидкісного режиму редукторів різних виробників можуть бути різними. При роботі тривалий час на низьких або високих швидкостях потрібно врахувати зниження ефективності здійснення змащування.
4. У механізмах перетворення механічної енергії (пасові, ланцюгові, зубчасті передачі, муфти тощо) при роботі на високих швидкостях, які відповідають підвищеним частотам живлення АДКЗ (вище 50 Гц) можуть збільшуватись вібрація і зношування механічних частин.

5.5. Функціональні можливості сучасних частотних перетворювачів

Питання про необхідність тих або інших функцій ПЧ сьогодні вкрай актуальне оскільки щороку на ринку з'являються нові вироби з більшими можливостями. Складно зрозуміти, який набір функцій зможе задовольнити потреби того або іншого технологічного процесу. Розглянемо основні функції ПЧ, пропоновані виробниками даної техніки, з урахуванням типів навантажень (для насосів, вентиляторів, димососів, конвеєрів тощо). Існують певні відмінності між вбудованими й додатковими функціями ПЧ. Відомо, що частина функцій, як правило, входить у стандартне виконання ПЧ. Вартість цих функцій закладена в ціну виробу. У даному пункті розглянемо базові функції ПЧ. Зазначимо, що додаткові опції і пристрої ПЧ, наявність яких визначається з врахування конкретних технологічних процесів, дуже широкі. Питання вибору додаткових функцій ПЧ вирішується з постачальниками обладнання в індивідуальному порядку.

До базових функцій ПЧ відносяться [20]:

- реалізація різних методів керування електродвигуном. Існують перетворювачі зі скалярним і векторним керуванням, які втілюють у собі два основні завдання, розв'язувані ПЧ. Для позначення скалярного керування досить часто використовують терміни „вид кривої U/f ” або „залежність U/f ”. Скалярне керування найпоширеніше й максимально задовольняє вимогам таких механізмів, як насоси, вентилятори, компресори, а також таких, для яких важливо підтримувати швидкість обертання або який-небудь технологічний параметр. Метод досить простий, але має невеликий діапазон регулювання швидкості й вимагає установки додаткових датчиків для реалізації керування по швидкості й моменту. Розмаїття векторних варіантів керування вражає. Приміром, метод DTC (із прямим керуванням моментом, без установки додаткових датчиків) ефективно використовується при відносно невисоких вимогах до точності підтримки швидкості з діапазоном регулювання швидкості $D=700:1$, тобто для таких механізмів, як поршневі компресори, насоси, піднімальні механізми, конвеєри, дробарки, пилки, міксери тощо.
- ПД-регулятор. Вбудований регулятор використовується для керування зовнішнім процесом за допомогою сигналу зворотного зв'язку. Сигнал задання може надходити через аналоговий вхід, з

панелі керування за допомогою задання або через послідовний інтерфейс. При цьому вимірюється відхилення величини, яка потребує стабілізації (наприклад, тиск, швидкість, температура тощо), від заданого значення і генерується керуючий сигнал. Наявність даного регулятора всередині ПЧ дозволяє спростити систему керування й відмовитися від використання зовнішніх регуляторів (контролерів). Наявність ПІД-регулятора необхідно для таких механізмів, як насоси, верстати, транспортери тощо, тобто там, де потрібна точна підтримка контрольованої величини.

- аналогові та цифрові входи і виходи. Аналогові виходи дозволяють більш наочно представити значення якого-небудь параметра. Наприклад, їх часто використовують для відображення на стрілочному вольтметрі частоти обертання двигуна. Однак використання цих сигналів у системах автоматизації малоімовірно, тому що вони, як правило, мають малу потужність і незадовільну якість. Аналогові входи дозволяють подавати сигнали від датчиків прямо в ПЧ, без використання яких-небудь додаткових пристроїв. Як правило, використовуються уніфіковані типи сигналів (0-5 В, 0-10 В, 4-20 мА). Крім того, є можливість використання живлення від перетворювача для підключення потенціометра, наприклад, для задання частоти обертання. Дискретні входи дозволяють керувати ПЧ із кнопок, установлених на лицьовій панелі шафи, або з поста керування. Як правило, входи використовуються для подачі команд типу „ПУСК”, „СТОП”, „РЕВЕРС” або для ступінчастого перемикання швидкостей двигуна (рис. 5.1).

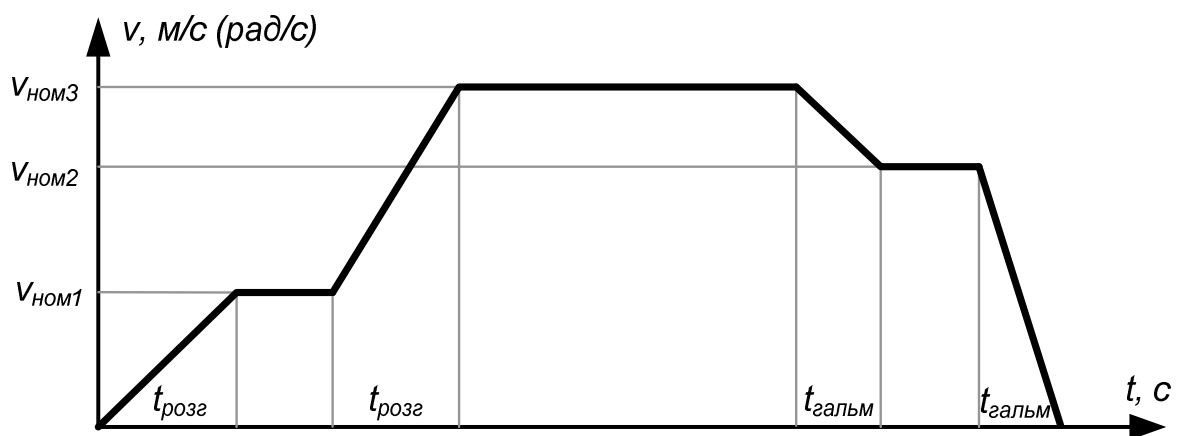


Рис. 5.1. Керування швидкістю двигуна за допомогою дискретних входів

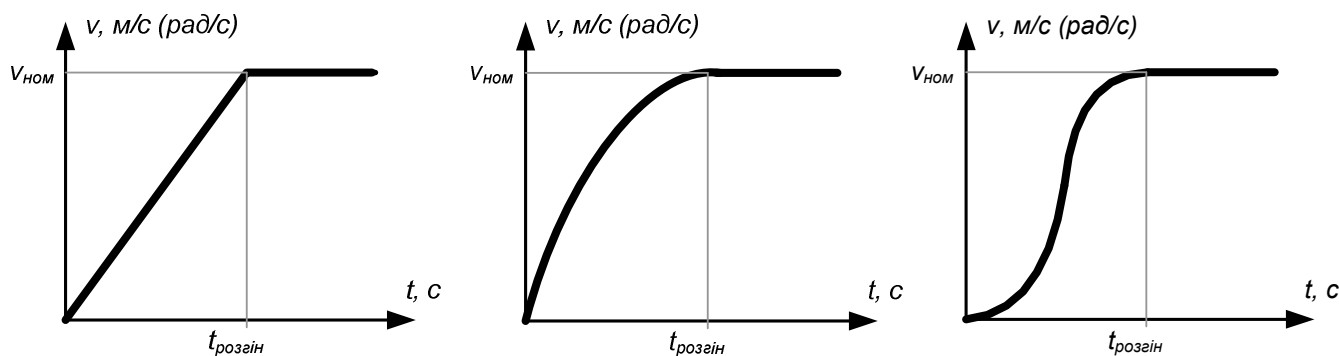
Натискаючи кнопки „ПУСК”, „НОМІНАЛЬНА ШВИДКІСТЬ 1”, „НОМІНАЛЬНА ШВИДКІСТЬ 2”, „НОМІНАЛЬНА ШВИДКІСТЬ 3”, „СТОП” оператор технологічного процесу може змінювати швидкість обертання АД та зупиняти двигун дистанційно. До дискретних виходів також можна під’єднувати контакти кінцевих вимикачів, перемикачів, реле тощо. Дискретні виходи використовуються також для сигналізації режимів роботи ПЧ а також для керування зовнішніми реле та логічними схемами. Дискретні виходи можна розділити на дві категорії: силові (релейні) виходи для керування зовнішніми електромагнітними реле і виходи типу „відкритий колектор” для роботи з зовнішніми логічними схемами. До дискретних виходів також можна підключати індикаторні лампочки „Аварія”, „Обертання вперед”, „Обертання назад” тощо.

- інтерфейси зв’язку. У більшості сучасних ПЧ передбачена можливість підключення в мережу автоматичного керування. Звичайно використовуються протоколи RS-485 (RS-232), Modbus, Profibus, Interbus, CANOpen, DeviceNet. З’єднання перетворювачів у мережу дозволяє побудувати більш складну систему автоматичного керування технологічними процесами з використанням контролерів і промислових комп’ютерів.
- керування вхідним випрямлячем (використання керованого, напівкерованого або некерованого випрямляча) - видача імпульсів керування на силові ключі відповідно до заданого кута відкриття тиристорів у схемі вхідного випрямляча. При цьому необхідна синхронізація з живильною мережею, тобто визначення моменту проходження фаз вхідної напруги через нуль і корекція моментів відкриття ключів випрямляча. Використання напівкерованого або керованого випрямляча дозволяє плавно подавати напругу у ланку постійної напруги і економить електроенергію, однак при цьому ускладнюється схема ПЧ і збільшується його вартість. Більшість ПЧ мають некерований випрямляч.
- моніторинг навантаження (захист двигуна від механічного перевантаження/недовантаження) дозволяє використовувати ПЧ як пристрій для контролю навантаження і захисту двигуна від механічних перевантажень і недовантажень, наприклад, від заклинювання полотна конвеєра, шнекового транспортера, обриву ремня вентилятора, „сухої” роботи насоса тощо. З появою неномінального навантаження двигуна ПЧ може зупинити двигун

і здійснити затримку перед повторним включенням або подати аварійний сигнал. Використання цієї функції дозволяє уникнути дорогої установки додаткових датчиків (оскільки для останніх потрібна установка безпосередньо в технологічний процес). Наприклад, можна контролювати в'язкість середовища (для таких механізмів, як міксери, відпадає необхідність в установці датчика в'язкості). Ця функція особливо необхідна для насосів, кранів, мішалок, гвинтових конвеєрів, стрічкових транспортерів, міксерів, дробарок тощо.

- взаємодія із системою автоматизації верхнього рівня. Здійснюється за принципом „ведучий - ведений” (Master - Slave), причому ПЧ виступає в ролі веденого пристрою. Програмне забезпечення реалізує необхідний протокол обміну, забезпечує прийом і виконання команд керування, а також видачу необхідної інформації про поточний режим роботи, стан датчиків і параметрів ПЧ. У випадку двохпроцесорної системи забезпечується можливість спільної роботи основного контролера ПЧ і контролера пульта керування.
- діагностика апаратури і самодіагностика. Діагностика полягає у визначенні працездатності різних модулів, що входять до складу ПЧ (як силових, так і керуючих) і підключеного електродвигуна. Крім того, проводиться контроль цілісності програми й даних, збережених в енергонезалежній пам'яті.
- реалізація захисних функцій. Сучасні ПЧ реалізують максимальний струмовий захист, захист від перегріву двигуна і перетворювача, від перевантаження, надмірних відхилень напруги живлення, обриву фази, міжфазного короткого замикання, замикання фази на землю й помилок зв'язку. Коректний вихід зі стану аварії можливий, тільки якщо ліквідовані причини її виникнення. Для окремих видів аварій (наприклад, провалу напруги в мережі, аварії зв'язку) система в стані самостійно відстежити можливість продовження роботи. Відновлення працездатності системи після інших аварій вимагає втручання обслуговуючого персоналу.
- збереження інформації про режими, тривалість роботи, періодичності включення ПЧ, ведення журналу збоїв і аварій, що відбулися. Це дозволяє проаналізувати ефективність використання ПЧ й полегшує пошук причин збоїв у роботі устаткування.

- вибір несучої частоти ШІМ. Оптимальний вибір цього параметра являє собою складне завдання. З одного боку збільшення частоти ШІМ дає ряд позитивних ефектів: підвищується динамічна точність відтворення вхідних впливів (завдань), розширюється діапазон робочих частот системи ПЧ-АД; зменшуються амплітуди пульсацій струмів і електромагнітного моменту двигуна, а також залежні від них складові втрат у АД і колі живлення; зменшується додатковий шум двигуна, що дозволяє в деяких випадках відмовитися від установки вихідних фільтрів; створюються умови для підвищення швидкодії й поліпшення інших показників якості замкнутих систем автоматичного регулювання АД. З іншого боку збільшення частоти ШІМ призводить до ряду негативних ефектів, а саме: підвищення частоти комутації транзисторів IGBT викликає пропорційне збільшення комутаційних втрат, внаслідок цього знижується корисна потужність інвертора; збільшуються діючі значення ємнісних струмів у кабелях живлення й елементах конструкції двигуна, що збільшує втрати від цих струмів у системі ПЧ-АД; ускладнюється проблема обмеження перенапруг. Оптимальне значення частоти модуляції вибирається в кожному випадку з урахуванням конкретних умов застосування ПЧ і домінуючих вимог. Діапазон частот модуляції сучасних транзисторних ПЧ із ШІМ для електропривода лежить у межах від одиниць до десятків кілогерц.
- плавний пуск і зупинка двигуна з вибором форми кривої зміни швидкості (звичайно використовують лінійну, S- і U-подібну характеристики зміни швидкості) і роздільним налаштуванням часу розгону і гальмування (у межах від 0,1 с до 9999 с з дискретністю 0,1 с) з автоматичною корекцією прискорення у випадку перевищення допустимого моменту (ця опція дозволяє задавати мінімальну тривалість розгону та гальмування без необхідності перевірки умови перевищення максимального струму ПЧ. У випадку якщо таке перевищення має місце ПЧ самостійно збільшує тривалість розгону/гальмування АД) На рис. 5.2 показані різні варіанти графіків функції зміни швидкості двигуна.



а) лінійна

б) U-подібна

в) S-подібна

Рис. 5.2. Діаграми зміни швидкості двигуна при різних типах характеристик розгону

- режим „підхоплення” електродвигуна, використовуваний при включенні ПЧ на обертовий двигун (наприклад, після короткочасного провалу напруги мережі). Ця функція дозволяє зменшити стрибки струму і напруги при пуску двигуна у момент „підхоплення”. Зменшується також початковий (пусковий) момент АД. Реалізація цієї функції полягає у тому, що у момент запуску ПЧ „підбирає” частоту з якою обертається АД. Пошук здійснюється з максимальної частоти і йде у напрямку до дійсної частоти, поки не буде знайдено відповідне значення. Після цього вихідна частота ПЧ змінюється до заданого значення у відповідності до параметрів розгону/гальмування.
- режим гальмування (на вибігу, частотне гальмування, гальмування постійним струмом). Найпростіший тип гальмування двигуна – на вибігу – відбувається від дії моментів опору у приводі та робочій машині. При цьому ПЧ не керує двигуном. Частотне гальмування АД полягає у поступовому зменшенні частоти напруги живлення АД (рекуперативне гальмування). Гальмування постійним струмом (динамічне гальмування) часто використовується для „догальмовування” двигуна на низькій швидкості.
- пропуск частот, при яких робота електропривода небажана, наприклад, через ризик виникнення механічних резонансів. Це особливо важливо для приводів відцентрових насосів і вентиляторів, в яких явище резонансу виникає особливо часто. Графік зміни частоти ПЧ представлений на рис. 5.3 ілюструє пропускання „вікон” при розгоні двигуна. Таких „вікон” може бути декілька, їх ширина, як правило становить 5 Гц.

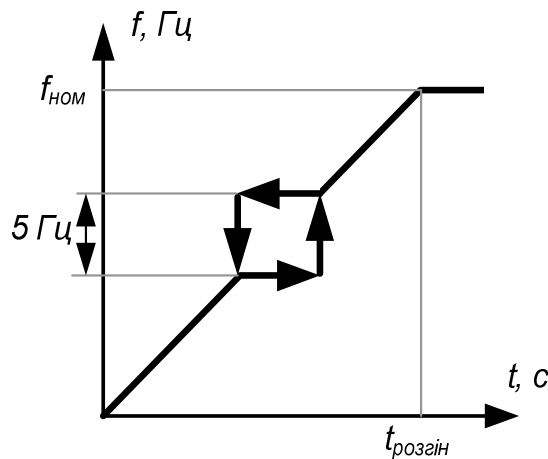


Рис. 5.3. Зміна частоти на виході ПЧ з пропуском „вікна” шириною 5 Гц

- фіксовані набори параметрів. Велика кількість параметрів дає користувачеві можливість більш гнучко налаштувати ПЧ під необхідні завдання. Цю функцію зручно використовувати, коли потрібно поміняти режим роботи двигуна. Це здійснюється шляхом вибору в меню набору параметрів, які відповідають потрібному режиму роботи. Тобто один ПЧ може працювати з декількома електродвигунами різної потужності, що функціонують на різних робочих машинах.
- підтримка високого пускового моменту на низьких частотах за рахунок додаткового збільшення напруги.
- стабілізація швидкості обертання шляхом впливу на частоту у функції навантаження (функція компенсація ковзання).
- налаштування реакції на стрибок швидкості або моменту навантаження з урахуванням інерційних властивостей механізму.
- автоматичне визначення параметрів підключеного електродвигуна (індуктивність, опір обмоток тощо).
- регулятор швидкості обертання внутрішнього вентилятора, дозволяє зменшити загальне енергоспоживання ПЧ.
- наявність інтуїтивно-зрозумілого меню, мова меню. Багато виробників найчастіше пропонують уніфіковане англійське меню. Така додаткова доробка, як введення інших мов у меню (української, російської), дає користувачам можливість швидше розібратися з усіма налаштуваннями й параметрами, а також краще сприймати показання поточних параметрів на дисплеї.

Окрім основних (базових) функцій ПЧ мають інші функціональні можливості: керування декількома електродвигунами; здійснення роботи ПЧ за розкладом; програмування залежності U/f тощо.

Насамкінець зазначимо, що більшість функцій ПЧ „скриті” від користувача, оскільки це функції „тонкого” налаштування ПЧ. Для їх активізації необхідно задіяти певну функцію ПЧ, яка дозволяє їх змінювати.

5.6. Додаткові пристрої для частотно-керованих приводів

Додаткові пристрої застосовуються для забезпечення експлуатації частотно-керованого привода відповідно до особливостей технологічного режиму механізму, розширення функцій ПЧ, а також для зменшення негативних впливів мережі живлення на ПЧ та двигун і, відповідно, впливу ПЧ на мережу. Додаткове обладнання включає такі пристрої: дистанційний пульт керування; фільтри; гальмівний резистор; рекуперативний модуль.

5.6.1. Дистанційний пульт керування

Дистанційний пульт керування дозволяє на відстані від 1 м і більше керувати виконанням всіх функцій ПЧ, а також копіювати і вводити дані одного ПЧ в іншій, що набагато прискорює процес налагодження будь-якого технологічного процесу.

Пульт керування складається із пристрою введення даних і пристрою виводу, що відображає інформацію про поточний стан пристрою. Пристрій введення являє собою, як правило, набір кнопок, хоча в деяких перетворювачах також використовуються джойстики, енкодери і потенціометри. У якості пристрою виводу, звичайно, використовується семисегментний індикатор, який не можна назвати досить інформативним. Тому для налаштування ПЧ необхідно тримати під рукою інструкцію з експлуатації. Останнім часом деякі виробники почали випускати ПЧ з рідкокристалічними дисплеями, що відображають не тільки номер і значення параметра, але й невелике текстове пояснення.

5.6.2. Електромагнітні фільтри (дроселі)

Фільтри призначені для забезпечення норм якості електричної енергії в мережах, де використовуються ПЧ. Зовнішній вигляд електромагнітного фільтра зображено на рис. 5.4.



Рис. 5.4. Зовнішній вигляд електромагнітного фільтра

Фільтр вхідної напруги

Фільтр вхідної напруги - це дросель змінного струму. Використовується при дисбалансі напруги у фазах 3% і більше, а також коли потужність живильної мережі 500 кВА або більше і відбуваються швидкі зміни її потужності. Дросель змінного струму фільтрує також високочастотні перешкоди, що приходять із мережі в ПЧ і ті, які генеруються ПЧ в мережу. Крім того, він поліпшує форму кривої струму, що подається на ПЧ.

Дросель вхідної напруги виконує захисну функцію як відносно самого перетворювача, так і відносно мережі електропостачання. Він є двостороннім буфером між нестабільною мережею електропостачання і ПЧ - джерелом вищих гармонік (5-ої, 7-ої, 11-ої, 13-ої тощо). Вищі гармоніки спотворюють синусоїду напруги живильної мережі, викликаючи збільшення втрат потужності електричних машин і приладів, що живляться від мережі, а також можуть привести до некоректної роботи електронних пристроїв, які отримують живлення від цієї мережі. Мережний дросель, як елемент електричного кола, для вищих гармонік має великий опір і зменшує їхній вплив на мережу електропостачання. З іншого боку, він захищає ПЧ від коротких замикань на його виході, обмежуючи швидкість наростання струму короткого замикання і сталий струм короткого замикання, сприяючи успішному спрацьовуванню струмового захисту ПЧ.

Крім того, швидке збільшення напруги на вході ПЧ приводить до короткочасного збільшення струмів через діоди некерованого випрямляча ПЧ. При стрибкоподібному збільшенні напруги на вході

ПЧ напруга на конденсаторі ланки постійної напруги ПЧ збільшується плавно за експонентним законом, а швидкість наростання струму через діоди обмежується тільки власною індуктивністю живильної мережі (практично не обмежується). При певних рівнях перенапруги збільшення струмів стає вище, ніж критична величина для діода і він виходить з ладу. Для унеможливлення виходу з ладу діодів випрямляча використовується мережний (вхідний) дросель, який обмежує швидкість наростання струмів, які протікають через діоди.

Фільтр вихідної напруги

Вихідна напруга інверторів - це послідовність прямокутних імпульсів регульованої ширини й частоти їх появи. Швидкість наростання імпульсів напруги дуже велика (до 12 кВ/мс), що становить небезпеку для ізоляції електродвигунів, які живляться від ПЧ. Величина пульсацій напруги залежить від несучої частоти ПЧ, довжини й типу кабелю. Обмеження швидкості наростання напруги, і в результаті зниження ризику ушкодження ізоляції двигуна, досягається шляхом установки між двигуном і інвертором вихідного дроселя. Вихідні дроселі використовуються також для обмеження струму короткого замикання до моменту спрацьовування захисту. Найчастіше підбір відповідної індуктивності вихідного дроселя є єдиною можливістю захисту вихідних силових транзисторів ПЧ. Підбір індуктивності вихідного дроселя залежить від максимальної величини струму короткого замикання в колі.

Часто на практиці двигун знаходиться далеко від ПЧ. Довгий кабель має велику ємність, яка сприяє збільшенню втрат потужності в ПЧ і кабелі. Вихідний дросель, крім захисту ізоляції двигуна, компенсує ємність живильної лінії, а також обмежує гармоніки й комутаційні перенапруги в ланцюзі двигуна. У результаті двигун менше гріється.

Одним з видів вихідного фільтру є так званий синус-фільтр. Синусні фільтри являють собою комбінацію ємнісних і індуктивних елементів. Висока несуча частота ПЧ практично повністю поглинається фільтрами і на виході утворюється практично синусоїдальна напруга, що дозволяє значно збільшувати довжину кабельних ліній від ПЧ до двигуна й не використовувати екранований кабель. Синусний фільтр зменшує втрати у двигуні і знижує його акустичний шум, викликаний гармонійним складом сигналу. До недоліків застосування синусних фільтрів можна віднести їхні великі габарити, велику вагу і вартість, іноді порівнянну з вартістю ПЧ. Однак у тих випадках, коли ПЧ

знаходяться на значній відстані від АД (150 метрів і більше) такі витрати виправдані, тому що сумарні втрати корисної потужності в кабелях можуть виявитися значно дорожчими.

Дроселі ланки постійної напруги (ДС-реактори)

ДС-реактори підключаються послідовно в ланку (шину) постійної напруги ПЧ. Вони як і фільтри змінного струму знижують вплив вищих гармонік, які викликані роботою ПЧ. На відміну від мережних дроселів (фільтрів), дроселі шини постійної напруги ніяк не впливають на зниження короточасних коливань напруги у мережі. Вони не впливають на зниження напруги у шині постійної напруги ПЧ. ДС-реактори створюють великий опір вищим гармонікам струму, які присутні у ланцюзі постійної напруги, і дуже малий (практично нульовий) опір постійному струму.

5.6.3. Гальмівний резистор

Гальмівний резистор є додатковим пристроєм, що перетворює надлишкову енергію у тепло, при гальмуванні двигуна, керованого від ПЧ (наприклад при гальмуванні значних обертових мас). При гальмуванні АД напруга у ланці постійної напруги може небезпечно зрости. Для усунення цього небажаного явища у цю ланку підключається гальмівний резистор, який пропускає струм (закорочує ланку) і в результаті напруга ланки знижується. При цьому резистор інтенсивно нагрівається. Отже він повинен установлюватися в окремій шафі, щоб забезпечувалася можливість достатнього розсіювання тепла. Зовнішній вигляд гальмівного резистора показаний на рис. 5.5.



Рис. 5.5. Зовнішній вигляд зовнішнього гальмівного резистора

5.6.4. Рекуперативний модуль

Під час рекуперативного гальмування (повернення енергії в живильну мережу), двигун діє як генератор, віддаючи потужність через модуль IGBT у проміжну ланку постійної напруги. Рекуперативний модуль може бути у базовій комплектації ПЧ, однак при цьому значно підвищується вартість ПЧ. Такі ПЧ рекомендується використовувати для приводів з частими пусками і зупинками. Загалом рекуперативне гальмування бажано застосовувати в тих випадках, коли швидкість двигуна повинна тільки зменшуватися без досягнення повної зупинки.

5.7. Схема підключення перетворювача частоти

На рис. 5.6 показана схема підключення ПЧ. Усі клеми ПЧ можна поділити на силові та сигнальні.

До силових клем під'єднується живлення ПЧ, обмотки АД реактор постійного струму (для цього необхідно видалити перемичку) та гальмівний резистор.

Сигнальні клеми виконують різноманітні функції. Для забезпечення надійного захисту ПЧ використовуються релейні виходи А, В та С. До клем В і С, як правило, підключається котушка контактора. У випадку виникнення аварійного стану ПЧ релейні виходи перемикаються і коло котушки контактора знеструмлюється, в результаті чого ПЧ вимикається з мережі. До виходів В і А можна під'єднати аварійну сигналізацію (наприклад світловий індикатор), який буде сигналізувати про виникнення аварії ПЧ.

Про використання аналогових та дискретних входів було сказано вище. Зазначимо лише, що сигналом задання для аналогових входів є або напруга (можливе підключення зовнішнього резистору, оскільки ПЧ має власну опорну напругу) або струм (4-20 мА).

ПЧ можуть мати різноманітні порти для підключення зовнішніх цифрових пристроїв: контролерів, інших ПЧ, комп'ютерів тощо. Останні використовуються для налаштування ПЧ. Для цього використовується спеціалізоване програмне забезпечення. Крім того, ПЧ має порт для підключення пульта керування, який досить часто використовується для задання параметрів ПЧ. Наприклад, декілька ПЧ працюють з АД на однотипне навантаження (вентилятор, насос, дробарка тощо). У цьому випадку налаштовані параметри одного ПЧ копіюються у пульт керування і потім переносяться на інші ПЧ. Це

економить час налаштування ПЧ та виключає можливість помилки при налаштуванні.

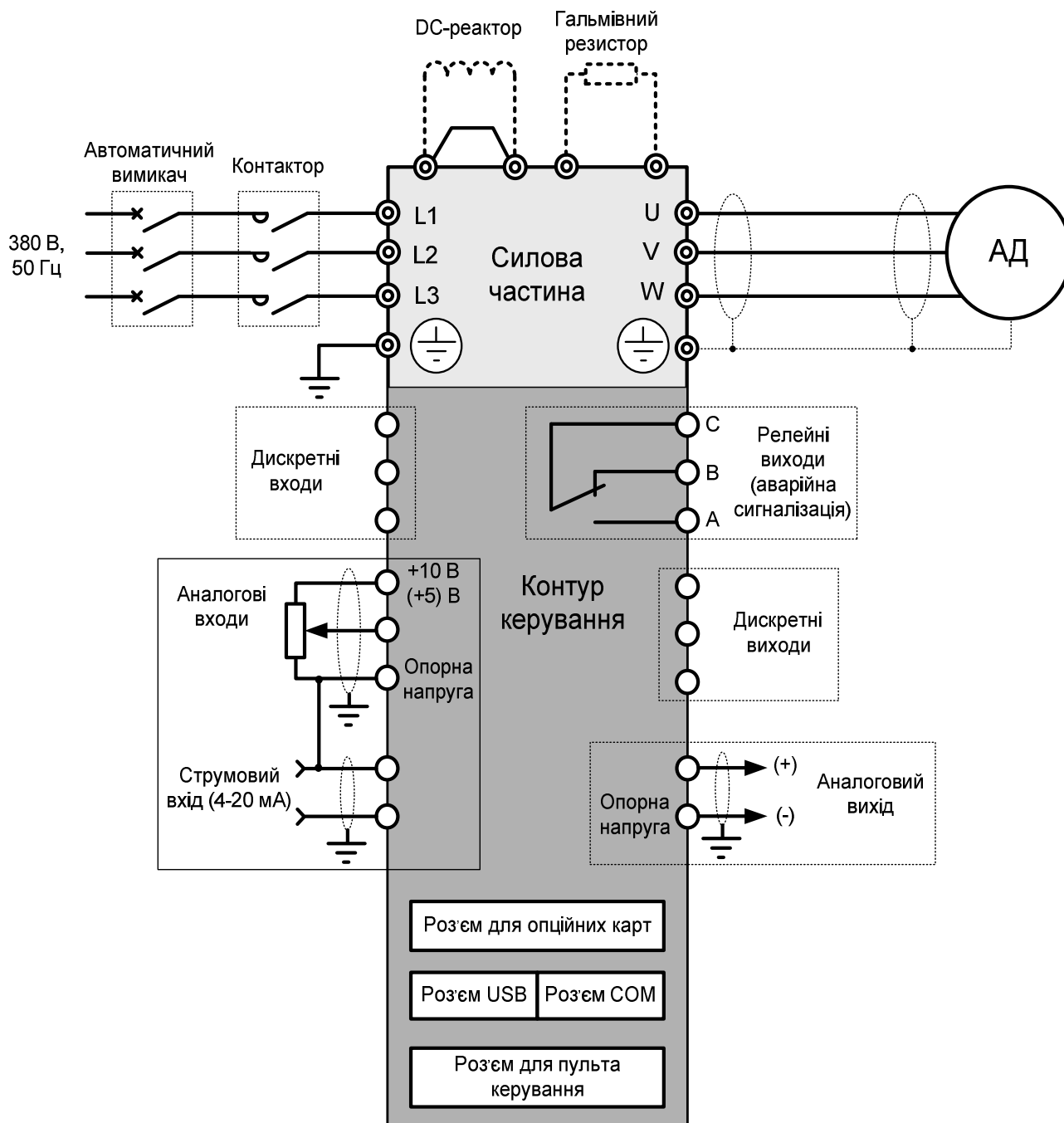


Рис. 5.6. Схема підключення ПЧ

5.8. Огляд компаній-виробників частотних перетворювачів

Сучасний ринок перетворювальної техніки для електроприводу представлений різними фірмами-виробниками ПЧ: азійськими (китайськими, японськими, корейськими), європейськими,

американськими, російськими і вітчизняними. Різноманітні асортименти продукції цих фірм дає можливість здійснити вибір ПЧ з оптимальним співвідношенням вартості й функціональності.

Найбільшою популярністю користується продукція таких виробників ПЧ: Siemens, ABB, Control Techniques, Schneider Electric, Danfoss, Lenze. До менш відомих європейських виробників ПЧ відносяться Vacon, Elettronica Santerno, Emotron.

До найбільш популярних американських виробників ПЧ відноситься General Electric. Серед азіатських компаній найбільш відома продукція таких виробників ПЧ: японські Mitsubishi Electric, Omron, Hitachi, Toshiba, Fuji Electric; корейські і тайваньські LG Hyundai Electronics, Long Shenq Electronic, Delta Electronics. ПЧ випускає також Китай, однак вони, на відміну від корейських, не відрізняються високою якістю.

Перетворювачі частоти Danfoss.

Danfoss - датська промислова компанія, що займається розробкою, виробництвом і обслуговуванням механічних і електронних компонентів для промисловості і холодильного обладнання, промислової автоматики, мотор-редукторів. Широко відомі ПЧ Danfoss. ПЧ Danfoss VLT AQUA (наприклад, FC202) призначені для використання в системах водопостачання й водовідводу, Danfoss VLT HVAC - у системах опалення, вентиляції й кондиціонування. Всі ПЧ Danfoss мають вбудований фільтр гармонік в контурі постійної напруги. За рахунок цього перетворювачі частоти Danfoss здатні обмежувати навантаження на мережу [21].

Перетворювачі частоти Control Techniques.

Control Techniques (Великобританія) - один із провідних світових виробників приводної техніки й систем керування електроприводами. Компанія Control Techniques спеціалізується на поставці готових технологічних рішень. ПЧ Control Techniques серії Commander SK з векторним керуванням у відкритому контурі призначені для керування АД без датчика зворотного зв'язку. ПЧ Control Techniques серії Unidrive SP з векторним керуванням у замкнутому контурі призначені для керування асинхронними й синхронними приводами зі зворотним зв'язком і без зворотного зв'язку. ПЧ Control Techniques серії Unidrive SP характеризуються гнучкою системою налаштування та забезпечують істотну економію енергії й високий ККД системи [21].

Перетворювачі частоти Lenze.

Німецька компанія Lenze - один з лідерів в області технології ПЧ й комплектних систем керування. Основний напрямок діяльності Lenze - виробництво універсальних систем електропривода. ПЧ Lenze має декілька серій, які „спеціалізуються” для різних задач автоматизації технологічних процесів: від керування насосами і вентиляторами (серія Lenze 8200 SMD) до задач з підвищеною динамікою та точністю регулювання (серія Lenze 9300 Vector) [22].

Перетворювачі частоти Toshiba.

Компанія Toshiba - виробник широкого спектра електронної й електротехнічної продукції, один зі світових лідерів напівпровідникового приладобудування. Високоінтелектуальні ПЧ Toshiba займають у світовому виробництві частку ринку в 19%.

ПЧ Toshiba забезпечують істотне енерго- і ресурсозбереження, а область їхнього застосування включає керування компресорами, конвеєрами, верстатами, насосами, електроустаткуванням багатьох галузей промисловості. ПЧ Toshiba охоплюють широкий спектр електродвигунів: для низьковольтних - універсальні ПЧ AS1, G9 і H9; для високовольтних - ПЧ T300MVi [21].

Перетворювачі частоти LG (LS Industrial Systems).

Південнокорейська компанія LS Industrial Systems (група компаній LG) - лідер ринку засобів промислової автоматизації в Кореї. ПЧ LG відрізняють функціональність, ефективність, зручність монтажу й експлуатації. ПЧ LG Industrial Systems представлені наступними серіями: IC-5, IG-5A, IS-5, IS-7, IP-5A, IE-5 та інші [21].

Перетворювачі частоти Delta Electronics.

Delta Electronics - тайваньська компанія, створена в 1971 році. Основні напрямки діяльності - розробка й виробництво виробів силової електроніки (джерела безперебійного живлення, пускорегулююча електронна апаратура) і компонентів електросистем, а також ПЧ для АД. В 1995 Delta Electronics почала виробляти ПЧ Delta під власною маркою VFD-A. ПЧ Delta Electronics сьогодні - це 8 серій: VFD - B, F, S, M, L, V, G, E потужністю від 40 Вт до 220 кВт [21].

Перетворювачі частоти Vacon.

Фінська компанія Vacon, створена в 1993 році, спеціалізується на розробці, виробництві й впровадженні ПЧ для керування асинхронними двигунами. Vacon пропонує ПЧ на широкий діапазон потужностей (від 250 Вт до 3 МВт) і напруг (від 220В до 690В). Спочатку діяльності компанія випускала перетворювачі серії CX, в 2000 р. з'явилися

перетворювачі частоти Vacon нового покоління - NX (NXL, NXS, NXP та інші) [21].

Перетворювачі частоти Omron.

Японська компанія Omron заснована в 1933 році як фірма по розробці, виробництву й продажу компонентів для автоматизації. Компанія випускає, у тому числі, ПЧ широкого спектра застосування. ПЧ Omron відрізняються тим, що вони не потребують налаштування при встановленні. ПЧ Omron серії SYSDRIVE це багатофункціональний пристрій для самих різних завдань: ПЧ Omron 3G3JV включає тільки самі необхідні функції і відрізняється невисокою ціною, ПЧ 3G3FV відрізняється високою динамічністю, його вартість більш висока [21].

Перетворювачі частоти АВВ.

АВВ - міжнародний електротехнічний концерн, що спеціалізується на виробництві силового обладнання для виробництва, передачі й розподілу електроенергії. Компанія випускає низьковольтні ПЧ двох серій. АС (компонентні приводи) - приводи для масового застосування у всіх областях промисловості і у комунальній сфері. ПЧ ACS (ACS550, ACS350, ACS150 і ін.) - промислові й системні приводи для застосування в сферах, що вимагають високих показників якості регулювання [21].

Перетворювачі частоти Siemens.

Німецька компанія Siemens - один із провідних світових виробників електроприводів, призначених для керування двигунами постійного і змінного струму. Найбільш відомі ПЧ Micromaster для регулювання трифазних електродвигунів, які мають діапазон потужностей 120 Вт при однофазному живленні і до 75 кВт - при трифазному. Перетворювач частоти Siemens Micromaster може застосовуватися як індивідуально, так і інтегруватися в системи автоматизації процесу. Simovert Masterdrives від Siemens - високовольтні ПЧ з ланкою постійної напруги для точних і високопродуктивних електроприводів із жорсткими вимогами до динамічних характеристик і великих автоматизованих установок [21].

Перетворювачі частоти Mitsubishi Electric.

Японський ПЧ FR компанії Mitsubishi відрізняється, у першу чергу, підвищеним енергозбереженням. Модельний ряд ПЧ Mitsubishi охоплює діапазон потужностей від 0,2 до 630 кВт і містить у собі кілька серій перетворювачів з різними функціями керування електродвигунами: FR-S 500 (FR-S 520, FR-S 540), FR-E 500 ((FR-E 520, FR-E 540), FR-F 700 (FR-F 740, FR-F 746), FR-A 700 (FR-A720, FR-A

740, FR-A760). Більшість ПЧ Mitsubishi розраховані на 200%-не перевантаження [21].

Перетворювачі частоти Fuji Electric.

Японська компанія Fuji Electric, заснована в 1923 р. Це одна з компаній, яка стояла у джерел зародження сучасного частотно-регульованого електропривода. ПЧ Fuji, що займають близько 12% світового ринку інверторів, мають відмінні технічні й експлуатаційні характеристики, широкі функціональні й комунікаційні можливості, що забезпечує перетворювачам Fuji сумісність із широким спектром обладнання.

Модельний ряд перетворювачів Fuji Electric представлений моделями від 0,1 кВт до 500 кВт і включає серії ПЧ Frenic (FRN) (FRN-G11S, Frenic Mega, Frenic Mini та інші), FVR-E11S, FVR-C11S, FVR-P11S [21].

Перетворювач частоти Altivar (Schneider Electric).

Міжнародна компанія Schneider Electric, заснована в 1836 р. Це один зі світових лідерів в області виробництва електротехнічного обладнання низької напруги й засобів автоматизації. Серед продукції компанії - ПЧ Altivar (ATV) потужністю від 0,75 до 800 кВт. Серія ПЧ містить у собі моделі Altivar (ATV) 11, Altivar (ATV) 21, Altivar (ATV) 31, Altivar (ATV) 61, Altivar (ATV) 71. Найчастіше ПЧ Altivar застосовуються в підйомно-транспортному й фасовочно-пакувальному обладнанні, спеціальних механізмах, вентиляторах і установках кондиціонування повітря, насосах і компресорах [21].

Перетворювачі частоти Веспер.

ПЧ Веспер на IGBT транзисторах для АД змінного струму сполучають надійність, функціональність, високу перевантажувальну здатність і невисоку ціну. ПЧ Веспер представлені десятьма моделями: ПЧ Веспер загальпромислового призначення серії EI-7011, насосний ПЧ Веспер серії EI-P7002, ПЧ векторного типу E3-8100 і EI-9011 та інші. Крім цього, компанія Веспер випускає малогабаритні ПЧ EI-8300 [21].

Перетворювачі частоти Комбарко.

Компанія "Комбарко" (Російська Федерація) представляє ПЧ CombiVario. ПЧ розроблені разом з компаніями „Yaskawa" (Японія) і „TESCO" (Тайвань). Інвертори CombiVario (CombiVario CV-7300EV, CombiVario CV-7200MA, CombiVario CV-7200GS) розраховані на потужність від 200 Вт до 300 кВт, мають широкий набір функцій. Всі

ПЧ CombiVario стійкі до збоїв у роботі програмного забезпечення і до роботи в „брудних” мережах [21].

Перетворювачі частоти компанії АС Привод.

АС Привод є вітчизняним виробником ПЧ для трифазних АД. Області застосування ПЧ цієї компанії: деревообробна, хімічна, текстильна, харчова промисловості, комунальне господарство, кабельне й металургійне виробництво, машинобудування, верстатобудування [23].

Перетворювачі частоти компанії „НПО Автоматика”.

Вітчизняна компанія „НПО Автоматика” спеціалізується на виробництві електронної й електротехнічної продукції. Серія ПЧ CFM 340 використовується для двигунів потужністю від 2,2 до 4,0 кВт. У якості силової частини встановлені модулі серії miniSKIP виробництва Semikron, керуючий процесор DSPic30 [24].

5.9. Завдання та питання для самоконтролю

1. Розрахуйте потужність ПЧ при живленні двигуна АИР90L6У3 за умовами: 1) двигун приводить у рух вентилятор з моментом інерції $J=0,1 \text{ кгм}^2$; 2) тривалість пуску вентилятора – не більше 5 с. Перевірте вибраний ПЧ за умовою неперевищення його номінального струму (5.5).
2. Виконайте вибір ПЧ для живлення трьох двигунів АИР112М2У3 при умовах: 1) двигуни запускаються не одночасно; 2) тривалість запуску одного двигуна становить 7 с.
3. Вкажіть основні фактори, які впливають на вибір ПЧ.
4. Які обмеження накладаються на кількість повторних запусків ПЧ?
5. Назвіть основні функціональні можливості сучасних ПЧ. Які з цих функцій необхідно приймати до уваги при проектуванні частотного приводу для: 1) вантажопідйомного крану; 2) дробарки; 3) високоточного маніпулятора із керуванням від промислового комп’ютера; 4) автоматизованого насоса.
6. Які додаткові пристрої використовуються для частотного керування АД. Вкажіть їх призначення та приведіть приклади технологічних процесів для яких їх необхідно застосовувати.
7. Як класифікують усі класи ПЧ?
8. Які пристрої можна підключати до цифрових та аналогових входів і виходів ПЧ?
9. Вкажіть найбільш відомі компанії-виробники ПЧ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Ильинский Н.Ф., Мокаленко В.В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. Учебн. пособие для студ. высш. учеб.заведений. – М.: Изд. Центр Академия, 2008. – 208 с.
2. Електронний ресурс http://www.energysavecom.ru/download/vektorn_uprav.pdf
3. Лавріненко Ю.М., Марченко О.С., Савченко П.І., Синявський О.Ю., Войтюк Д.Г. Лисенко В.П. Электропривод: підручник (за ред. Лавріненка Ю.М.). – К.: вид-во Ліп-К., 2009. – 504 с.
4. Фираго Б.И. Теория электропривода: учеб. пособие. Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Мн: ЗАО „Техноперспектива”, 2004. – 527 с.
5. Олійник В.С., Гайдук В.Н., Гончар В.Ф. Довідник сільського електрика. За ред. Олійника В.С. (3-е вид., переробл. і доповн.) – К.: Урожай., 1989. – 264 с.
6. Колб Ант., Колб А.А. Теорія електроприводу: навчальний посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2006. – 511 с.
7. Жулай Є.Л., Зайцев Б.В., Лавріненко Ю.М., Марченко О.С., Войтюк Д.Г. Электропривод сільськогосподарських машин, агрегатів та поточкових ліній (за ред. Жулая Є.Л.). – К.: Вища освіта, 2001. – 288 с.
8. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. - М.-Л.: Энергия, 1965. - Ч.2. - 704 с.
9. Пат. 3824437 Germany, Method for controlling asynchronous machines / Felix Blaschke; Siemens Aktiengesellschaft. - № 237572; заявл. 16.07.1971.
10. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. Учебное пособие по дисциплинам электромеханического цикла. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
11. Електронний ресурс <http://www.ges.ru/raznoe/triol/29.htm>
12. Штейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты.- Екатеринбург:УРО РАН, 2000. – 654 с.
13. Яцук В.Г., Талов В.В., Гром Ю.И. Принципы построения частотно-регулируемых электроприводов на базе ТПЧ со звеном постоянного тока // Промышленная энергетика. 1978. № 11. – С. 39-43.
14. Neumann K. Trends in semiconductor devices and impact on power electronics and electric drives. PEMS-94, 20-22 sept. 1994. Warsaw, Poland. – P. 1288-1299.
15. Штейнер Р.Т., Ефимов А.А., Калыгин А.И. Математическое описание и алгоритмы ШИМ активных выпрямителей тока // Электротехника. 2000. № 10. – С. 42-49.
16. Електронний ресурс http://theelectrostore.com/shopsite_sc/store/html/skm145gal123d-semikron-skm-145gal123d-skm-145gal-123-d-igbt-new.html.
17. Бедфорд Б., Хофт Р. Теория автономных инверторов. - М.: Энергия, 1969. - 280 с.

18. Bose Bimal K. Modern power electronics and AC drives. Prentice Hall PTR, 2002. – 738 p.
19. Преобразователи частоты серии VFD-EL. Руководство по эксплуатации. 222 с. Приложение С . Как правильно выбрать преобразователь частоты.- С. 212.
20. Базовые функции преобразователей частоты: за что платим? // Конструктор машиностроитель. 2009. № 1.- С 8-10. (матеріал підготовлений компанією АДЛ).
21. http://www.combarco.ru/production/converter/converters_makers.php
22. Электронный ресурс <http://www.lenze.org.ua/>
23. Электронный ресурс <http://acprivod.com.ua/>
24. Электронный ресурс <http://npoautomatic.com/>

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. ВЛАСТИВОСТІ Й ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ	7
1.1. Теоретичні основи роботи асинхронного двигуна	7
1.2. Основні технічні характеристики асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором	15
1.2.1. Асинхронні двигуни серії 4АМ	15
1.2.2. Асинхронні двигуни серії АИ	17
1.3. Завдання та питання для самоконтролю	19
2. РЕГУЛЮВАННЯ КООРДИНАТ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ	20
2.1. Загальні положення	20
2.2. Основні показники регулювання кутової швидкості електропривода	21
2.2.1. Діапазон регулювання	21
2.2.2. Плавність регулювання	22
2.2.3. Стабільність регулювання	23
2.2.4. Напрямок регулювання	25
2.2.5. Допустиме навантаження у діапазоні регулювання	25
2.2.6. Динамічні показники регулювання	26
2.2.7. Економічність регулювання швидкості	28
2.2.8. Точність регулювання	29
2.3. Завдання та питання для самоконтролю	30
3. РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА	31
3.1. Загальні положення	31
3.2. Регулювання швидкості асинхронного двигуна зміною опору у роторному колі	32
3.3. Регулювання швидкості асинхронного двигуна зміною числа пар полюсів	34
3.4. Регулювання швидкості асинхронного двигуна зміною напруги живлення статора	35
3.5. Частотне регулювання асинхронного двигуна	37
3.5.1. Скалярне регулювання	37
3.5.2. Векторне регулювання	42
3.6. Завдання та питання для самоконтролю	46
4. БУДОВА ТА ПРИНЦИП ДІЇ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ	47
4.1. Історія розвитку конструкцій перетворювачів частоти	47

4.2. Елементна база перетворювачів частоти	48
4.3. Класифікація перетворювачів частоти	50
4.4. Будова сучасних перетворювачів частоти	54
4.5. Комутаційні процеси у трифазних автономних інверторах напруги (АІН) при формуванні вихідної напруги по методу ШІМ	57
4.6. Аналіз функцій струму та електромагнітного моменту асинхронного двигуна	64
4.7. Завдання та питання для самоконтролю	68
5. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИБОРУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ	69
5.1. Загальні положення	69
5.2. Вибір перетворювачів частоти по електричній сумісності з двигуном, як електричним навантаженням	71
5.2.1. Вибір перетворювача частоти, який живить один двигун	71
5.2.2. Вибір перетворювача частоти, який живить декілька двигунів однієї потужності	73
5.3. Загальні зауваження по вибору і експлуатації перетворювачів частоти	74
5.4. Загальні зауваження по вибору і експлуатації асинхронних двигунів при живленні від перетворювача частоти	75
5.4.1. Стандартні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором	75
5.4.2. Спеціальні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором та механічні частини приводу	76
5.5. Функціональні можливості сучасних частотних перетворювачів	77
5.6. Додаткові пристрої для частотно-керованих приводів	84
5.6.1. Дистанційний пульт керування	84
5.6.2. Електромагнітні фільтри (дроселі)	84
5.6.3. Гальмівний резистор	87
5.6.4. Рекуперативний модуль	88
5.7. Схема підключення перетворювача частоти	88
5.8. Огляд компаній-виробників частотних перетворювачів	89
5.9. Завдання та питання для самоконтролю	94
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	95