

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЕЛЕКТРОПРИВОД

Курс лекцій

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітніми програмами «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології»,
«Системи забезпечення споживачів електричною енергією»
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Укладачі: Д. Д. Мугенов, С. Л. Прядко, А. А. Хотян

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО
2025

УДК 62-83 (075.8)

E45

Укладачі: *Мугенов Даніїл Джалільович, д. філ.
Прядко Сергій Леонідович
Хотян Артем Анатолійович*

Рецензент *Островерхов М.Я., д.т.н., професор, кафедра Теоретичної електротехіки, Факультет електроенерготехніки та автоматики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Відповідальний редактор *Босак Алла Василівна, к.т.н., доц.*

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 9 від 26.06.2025 р.)
за поданням вченої ради навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту
(протокол № 10 від 29.05.2025 р.)*

E45 Електропривод [Електронний ресурс] : курс лекцій : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмами «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології», «Системи забезпечення споживачів електричною енергією» спец. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Д. Д. Мугенов, С. Л. Прядко, А. А. Хотян. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 216 с.

У навчальному посібнику викладено основи теорії та практики електропривода, що є невід’ємною частиною професійної підготовки фахівців у галузі електротехніки, електромеханіки та автоматизації. У посібнику приділено увагу принципам побудови, особливостей функціонування та керування електроприводами. Матеріал наведено відповідно до навчальної програми дисципліни, що дозволяє ефективно засвоїти основні положення, сформувані практичні навички розрахунку, аналізу та вибору електроприводів для різних типів навантажень. Подано контрольні запитання для перевірки засвоєного студентами матеріалу.

Посібник призначений для здобувачів ступеня бакалавр за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітніми програмами «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології», «Системи забезпечення споживачів електричною енергією». Також буде корисним для студентів інженерних спеціальностей, діяльність яких пов’язана з електромеханічним обладнанням промислових виробництв та цивільних споруд.

УДК 62-83 (075.8)

Реєстр. № НП 24/25-589. Обсяг 8 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025

ЗМІСТ

Вступ.....	7
Розділ 1. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ АСПЕКТИ ЙОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ	9
Лекція 1. Вступ до електроприводу: структура та класифікація.....	9
Тема 1.1. Вступ до електроприводу.....	9
1.1.1. Структура сучасного електроприводу.....	11
1.1.2. Цифрове управління електроприводами.....	13
1.1.3. Енергозбереження в електроприводі.....	14
Тема 1.2. Класифікація електроприводів	15
1.2.1. За способом передачі механічної енергії	15
1.2.2. За родом струму двигуна	16
1.2.3. За способом комутації.....	17
1.2.4. За родом передавального органу	18
1.2.5. За ступенем автоматизації	19
1.2.6. За ступенем керованості	19
Лекція 2. Механіка електропривода	20
Тема 1.3. Механіка електроприводу	20
1.3.1. Рівняння руху.....	20
1.3.2. Приведення моментів і сил	23
Лекція 3. Механічні характеристики. Момент статичного опору. Статична стійкість електропривода. Регулювання координат електропривода.	27
1.3.3. Механічні характеристики	27
1.3.4. Момент статичного опору	31
1.3.5. Статична стійкість електроприводу	32
1.3.6. Регулювання координат електроприводу.....	33
Лекція 4. Структура енергетичного каналу електропривода. Баланс потужностей потоків енергії силового каналу. Коефіцієнт корисної дії. Узагальнений критерій енергетичної ефективності каналу.....	38
Тема 1.4. Структура енергетичного каналу електропривода	38
Тема 1.5. Баланс потужностей потоків енергії силового каналу	43
Тема 1.6. Коефіцієнт корисної дії	45
Тема 1.7. Узагальнений критерій енергетичної ефективності каналу	46
Розділ 2. ЕЛЕКТРОПРИВОД З ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	52

Лекція 5. Електропривод з двигунами постійного струму незалежного збудження.	52
Тема 2.1. Схема підключення, основні рівняння ДПС НЗ	52
Тема 2.2. Статичні характеристики і режими ДПС НЗ при $U=\text{const}$	54
Тема 2.3. Характеристики і режими ДПС НЗ при $I=\text{const}$	58
Тема 2.4. Регулювання координат ДПС НЗ у розімкнених схемах	59
Лекція 6. Гальмівні режими двигуна постійного струму з послідовним збудженням. Електропривод з ДПС послідовного збудження. Електропривод з ДПС змішаного збудження.	64
Тема 2.5. Гальмівні режими ДПС НЗ	64
Тема 2.6. Електропривод з ДПС послідовного збудження.....	66
Тема 2.7. Гальмівні режими ДПС послідовного збудження	70
Тема 2.8. Електропривод з ДПС змішаного збудження.....	72
Лекція 7. Структурна схема ДПС незалежного збудження. Перехідні процеси двигунів з лінійною характеристикою.	75
Тема 2.9. Структурна схема ДПС незалежного збудження.....	75
Тема 2.10. Перехідні процеси двигунів з лінійною характеристикою.....	78
2.10.1. Механічні перехідні процеси	79
2.10.2. Електромагнітні перехідні процеси.....	80
2.10.3. Електромеханічні перехідні процеси	82
Розділ 3. ЕЛЕКТРОПРИВОД ЗМІННОГО СТРУМУ	85
Лекція 8. Електропривод з асинхронними двигунами. Регулювання координат АД КЗР	85
Тема 3.1. Електропривод із асинхронними двигунами	85
3.1.1. Схеми, основні рівняння	85
3.1.2. Регулювання координат асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором зміною параметрів напруги живлення	89
Лекція 9. Регулювання координат АД КЗР зміною пар полюсів. Зміна індуктивності статорного кола. Регулювання координат АД ФР. Гальмівні режими АД.	93
3.1.3. Регулювання координат асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором зміною параметрів двигуна	93
3.1.4. Регулювання координат асинхронних двигунів із фазним ротором	97
3.1.5. Гальмівні режими асинхронних двигунів	98
3.1.6. Характерні риси асинхронного електроприводу	102

Лекція 10. Електропривод з синхронними двигунами. Схеми, основні рівняння і характеристики. СД як компенсатор реактивної потужності... 104	104
Тема 3.2. Електропривод із синхронними двигунами	104
3.2.1. Схеми, основні рівняння	104
3.2.2. Синхронна машина як компенсатор реактивної потужності.....	108
Розділ 4. ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ В СТАТИЧНОМУ РЕЖИМІ	112
Лекція 11. Енергетичні характеристики електропривода в статичному режимі. Втрати потужності в електроприводі.....	112
Тема 4.1. Втрати потужності в нерегульованому електроприводі	112
Тема 4.2. Коефіцієнт потужності електропривода.....	115
Тема 4.3. Енергетичні характеристики регульованих електроприводів у статичному режимі, енергетичні характеристики механічних перетворювачів у статичних режимах.....	116
4.3.1 Регульований електропривод із ДПС незалежного збудження	116
4.3.2. Регульований електропривод з асинхронним двигуном	117
4.3.3. Енергетичні показники механічних перетворювачів у статичних режимах.....	118
Лекція 12. Розрахунок потужності електропривода. Розрахунок потужності і вибір електродвигунів.....	121
Тема 4.4. Розрахунок потужності і вибір електродвигунів	121
Тема 4.5. Перевірка двигунів по нагріванню прямим методом	128
Тема 4.6. Перевірка двигунів по нагріванню непрямыми методами.....	131
4.6.1. Метод середніх втрат	131
4.6.2. Методи еквівалентних величин	132
Лекція 13. Особливості вибору двигунів в залежності від теплового режиму роботи.....	134
Тема 4.7. Особливості вибору двигунів в залежності від теплового режиму роботи.....	134
4.7.1. Тривалий режим роботи S1	134
4.7.2. Короткочасний режим роботи S2.....	135
4.7.3. Повторно-короткочасний режим роботи S3	138
4.7.4. Додаткові режими роботи.....	140
Розділ 5. ТИПОВІ СТРУКТУРИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ. 143	143
Лекція 14. Типові структури перетворювачів електроенергії.	143
Тема 5.1. Електромашинні перетворювачі.....	143

Тема 5.2. Статичні перетворювачі на напівкерованих електронних приладах (тиристорах)	145
Тема 5.3. Статичні перетворювачі на керованих електронних пристроях	153
Розділ 6. ТИПОВІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	161
Лекція 15. Асинхронно-вентильні каскади. Фазове керування АД	161
Тема 6.1. Асинхронно-вентильні каскади.....	161
Тема 6.2. Асинхронний електропривод із фазовим керуванням	167
Лекція 16. Вентильний двигун.....	170
Тема 6.3. Вентильний двигун.....	170
6.3.1. Принцип роботи і способи керування ВД	170
6.3.2. Оптимізація параметрів електрообладнання вентильних двигунів	178
Лекція 17. Вентильно-індукторний двигун. Схеми приводів постійного струму. Зменшення впливу на мережу перетворювачів електропривода ..	183
Тема 6.4. Вентильно-індукторний двигун	183
Тема 6.5. Електропривод з двигунами постійного струму.....	185
Тема 6.6. Зменшення впливу на мережу перетворювачів електропривода	189
Лекція 18. Аналіз умов експлуатації, вибір системи електропривода.....	201
Тема 6.7. Аналіз умов експлуатації, вибір системи електропривода	201
6.7.1. Аналіз умов експлуатації електропривода.....	201
6.7.2. Вибір системи електропривода.....	205
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	216

Вступ

Здобуття якісної освіти в галузі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки неможливе без ґрунтовного вивчення дисциплін, що формують у здобувача вищої освіти системне уявлення про принципи функціонування, побудову та управління сучасними електроприводами. Серед таких дисциплін особливе місце посідає курс, присвячений системам електричних приводів. Він забезпечує фундаментальну підготовку для фахівців, які працюватимуть у сферах проектування, експлуатації та модернізації електроприводів. У сучасному світі електропривод є одним із ключових елементів автоматизованих технологічних процесів, виробничих ліній, транспортних систем і побутових приладів. Його широке застосування зумовлене високою ефективністю, точністю управління, надійністю та можливістю інтеграції з цифровими системами керування. Вивчення принципів роботи електроприводу, його складових та енергетичних характеристик є необхідним для майбутніх інженерів, техніків і фахівців в області електротехніки та автоматизації.

Основними завданнями, що постають перед здобувачами під час вивчення цієї дисципліни, є оволодіння теоретичними основами систем електроприводу, засвоєння методів аналізу та синтезу таких систем, а також розуміння взаємозв'язку між складовими елементами комплексу електромеханічного перетворювання енергії.

Це навчальне видання призначене для студентів закладів вищої освіти, які здобувають ступінь бакалавра за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Посібник також може бути корисним аспірантам, викладачам та інженерам-практикам. Його зміст побудовано на основі сучасних науково-технічних досягнень, з урахуванням актуальних стандартів і тенденцій розвитку електроприводної техніки.

Посібник побудований таким чином, щоб поступово формувати в читача цілісне уявлення про електропривод – від загальних понять, структури та класифікації до особливостей вибору та розрахунку електродвигунів, а також глибокого розуміння енергетичних характеристик систем. Перші лекції присвячені базовим поняттям: визначенню електроприводу, його структурі, типам керування та принципам енергозбереження. У наступних розділах увагу приділено механіці електроприводу, включаючи рівняння руху, приведення моментів і сил, а також статичну стійкість та способи регулювання координат. Це дозволяє читачу не лише зрозуміти, як працює система електроприводу в статичних і динамічних режимах, а й навчитися розраховувати її характеристики для конкретних задач. Значну частину посібника присвячено розгляду електроприводів із різними типами двигунів – як постійного, так і змінного струму – та особливостям їх регулювання.

Окрему увагу зосереджено на питаннях енергоефективності, що є актуальними в умовах зростання вимог до ощадливого використання ресурсів. Розглядаються втрати потужності, коефіцієнт потужності, баланс енергії, а

також критерії енергетичної ефективності електроприводів. Це дає змогу оцінити роботу системи з точки зору економічної доцільності та екологічної безпеки.

Посібник також охоплює теми вибору та перевірки електродвигунів за різних умов роботи, включаючи теплові режими, що часто є визначальними при проектуванні систем електроприводу. Завершується курс матеріалами щодо типових структур перетворювачів енергії, що забезпечують ефективне керування роботою електродвигунів. Таким чином, посібник є комплексним ресурсом для вивчення сучасного електроприводу з акцентом на практичні аспекти застосування.

Актуальність даної дисципліни зумовлена зростаючими вимогами до енергоефективності, надійності та автоматизації технологічних процесів, що неможливо без глибокого розуміння принципів керування електроприводами. Розвиток цієї галузі науки спрямований на вирішення широкого спектра технічних задач, пов'язаних із підвищенням точності, швидкодії та адаптивності систем, зокрема із застосуванням інтелектуальних алгоритмів та цифрових технологій.

Розділ 1. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ АСПЕКТИ ЙОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ

Лекція 1. Вступ до електроприводу: структура та класифікація

Тема 1.1. Вступ до електроприводу

Тема.1.2. Класифікація електроприводів

Тема 1.1. Вступ до електроприводу

Майже всі процеси, що стосуються механічної енергії та руху, реалізуються за допомогою електроприводу. Виняток становлять автономні транспортні засоби, такі як автомобілі, літаки, деякі типи рухомого складу й суден, які працюють на неелектричних двигунах. У промисловості гідропривод використовується відносно рідко, а пневмопривод – ще рідше.

Електропривод (ЕП) являє собою електромеханічний пристрій, що забезпечує кероване перетворення електроенергії в механічну, приводячи в рух робочі машини й механізми. Він є сполучною ланкою між енергосистемою та технологічними установками і певною мірою виконує функцію регулятора цих взаємозв'язків.

Електропривод взаємодіє з системою електропостачання або джерелом електроенергії з одного боку, з технологічною установкою або машиною – з іншого, а також з інформаційною системою вищого рівня, якою нерідко є людина-оператор.

Можна розглядати електропривод як підсистему, що інтегрується в ці системи та є їхньою складовою частиною. Для фахівця з електропостачання він виступає як споживач електроенергії, для технолога або конструктора машин – як джерело механічної енергії, а для інженера, який займається розробкою або експлуатацією автоматизованої системи управління (АСУ), – як складний інтерфейс, що забезпечує зв'язок його системи з технологічним процесом або електропостачанням.

Порівняно з іншими видами приводів, електропривод має низку переваг: високий коефіцієнт корисної дії (ККД), відсутність відходів у процесі роботи, можливість регулювання та зворотного перетворення енергії.

Найпоширенішими є електроприводи змінного струму, оснащені асинхронними (АД) та синхронними (СД) двигунами. Окрім цього, використовуються електроприводи з двигунами постійного струму (ДПС).

Сучасні електроприводи охоплюють широкий діапазон потужностей – від кількох мікроват до десятків мегават, наприклад, у компресорах на газоперекачувальних станціях. Це означає, що їхній діапазон за потужністю перевищує 10^{12} . Подібний розмах спостерігається і в частоті обертання: у процесі витягування кристалів напівпровідників вал двигуна здійснює один оберт за кілька десятків годин, вимагаючи надзвичайної рівномірності руху,

тоді як у сучасних шліфувальних верстатах частота обертання шліфувального круга може досягати 150 000 об/хв.

Сучасні електроприводи застосовуються в найрізноманітніших сферах – л від штучного серця до крокуючого екскаватора, від вентилятора до антени радіотелескопа, від пральної машини до гнучких виробничих систем. Проте більшість електродвигунів працюють у нерегульованому режимі, що призводить до низької ефективності. Через особливості проектування та експлуатації коефіцієнт завантаження багатьох машин не перевищує 50%, що вимагає перегляду підходів до вибору встановленої потужності двигунів.

Недовантажена робота приводів спричиняє значні енергетичні втрати, посилюючись ще й низьким коефіцієнтом потужності. Це особливо критично, враховуючи, що загальна встановлена потужність асинхронних електроприводів у країні сягає 40–50 млн кВт.

З точки зору енергоспоживання електропривод є ключовим споживачем електроенергії. У розвинених країнах він забезпечує понад 60% загального електроспоживання.

Зростаючі труднощі у видобутку енергії, поширення енергоємних технологій і необхідність забезпечення безперебійної роботи машин вимагають впровадження регульованих електроприводів. Використання таких приводів у певних механізмах змінного струму дозволяє скоротити споживання електроенергії до 50%. Ще більшу економічну вигоду дає збереження ресурсів та вдосконалення технологічних процесів.

Досягнення в напівпровідниковій індустрії, зокрема в силовій електроніці та мікроконтролерах, зробили частотно-регульовані приводи доступними та практичними. Сьогодні вони широко застосовуються не лише в потужних промислових установках, а й у побутовій техніці.

Електроприводи зі складними керованими процесами становлять лише незначну частину загальної кількості. Основна ж маса електроприводів – це прості, здебільшого нерегульовані пристрої, такі як вентилятори, насоси, конвеєри, підйомні механізми та обладнання переробної промисловості й будівництва. Саме вони є основними споживачами електроенергії, і саме тут існує значний потенціал для її економії.

Розглянемо основні фактори, що впливають на енергозбереження в електроприводах, а також ключові тенденції їх розвитку.

Зі зростанням енергоємних технологій та ускладненням видобутку енергії спостерігається дефіцит доступних енергоресурсів. Витрати на видобуток тонни палива та виробництво еквівалентної кількості електроенергії майже вдвічі перевищують витрати на її економію, і ця різниця надалі лише збільшуватиметься.

Ускладнення технологічних процесів сприяє зростанню частки регульованих і керованих електроприводів. Дискусія щодо оптимального типу регульованого електропривода фактично завершена – вибір зроблено на користь електроприводів змінного струму.

Збільшуються вимоги до забезпечення безаварійної роботи електроприводів, що стимулює вдосконалення методів керування режимами споживання енергії електричними машинами та енергосистемами.

Розвиток силової електроніки, зокрема транзисторів, тиристорів і мікропроцесорної техніки, відкрив нові можливості в управлінні електроприводами. Крім того, сучасні потужні обчислювальні засоби, доступні кожному інженеру, дозволяють більш раціонально проектувати та оптимізувати електроприводи.

У зв'язку з цим нагальною задачею є розробка та широке впровадження енергозберігаючих рішень у сфері промислового електропривода.

1.1.1. Структура сучасного електроприводу

Сучасний автоматизований електропривод є складною системою, в якій взаємопов'язані функціональні елементи. Він поєднує електромеханічний перетворювач енергії (двигун) та електричний перетворювач, що формують енергетичний (силовий) канал, а також пристрої керування та інформаційно-вимірювальні засоби, які утворюють керуючий канал. Основне призначення електропривода – здійснювати перетворення електричної енергії в механічну відповідно до алгоритму роботи технологічного процесу.

Головною особливістю сучасного регульованого електропривода змінного струму є наявність таких ключових компонентів (рис.1.1):

асинхронного або синхронного двигуна, оптимізованого за розмірами, вартістю та енергоспоживанням;

частотного перетворювача з ланкою постійного струму, що містить інвертор на повністю керованих елементах і некерований випрямляч;

датчиків енергетичних, механічних і технологічних параметрів, які забезпечують точність стабілізації координат у замкненій системі;

мікропроцесорної системи керування, що виконує регулювання вихідних параметрів, формування сигналів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), діагностику, прогнозування та взаємодію з іншими локальними приводами.

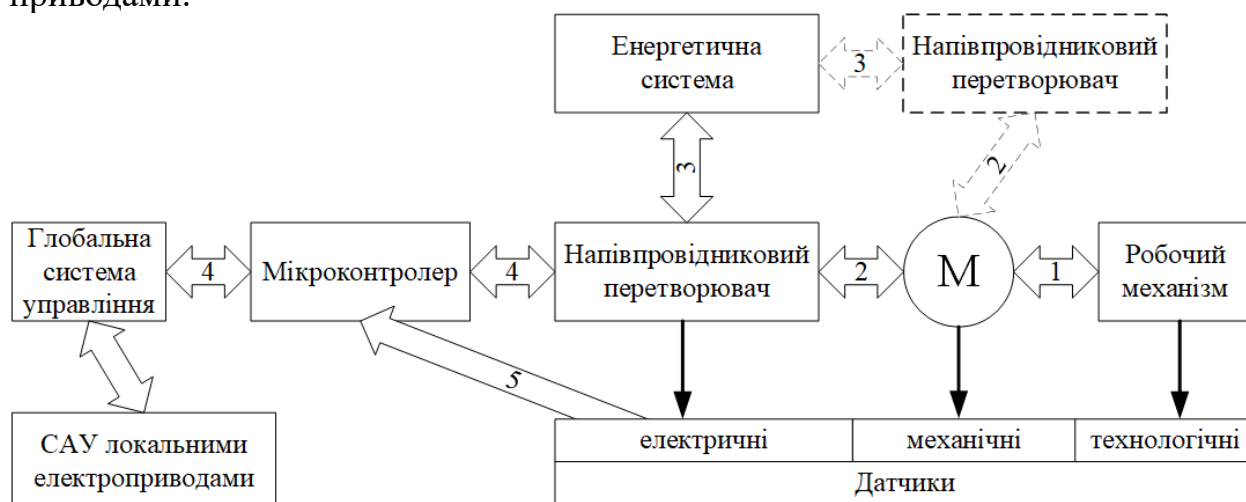


Рис.1.1. Багаторівнева структура сучасного електропривода

Об'єднання різних за природою та функціональним призначенням елементів електропривода в єдину систему здійснюється за допомогою багаторівневих **сполучних пристроїв**. Вони включають конструктивні, схемотехнічні та програмні засоби, що забезпечують оптимальну взаємодію всіх компонентів електропривода, дозволяючи максимально реалізувати їхні можливості.

Сполучний пристрій **першого рівня** забезпечує механіко-енергетичну взаємодію між двигуном і робочим механізмом. Він може бути реалізований у вигляді механічної, гідравлічної або електромагнітної передачі енергії від електричної машини до виконавчого механізму. Його основна функція – узгодження руху двигуна з виконавчим органом, забезпечуючи максимальний ККД та стабільну роботу в усіх режимах. Це досягається шляхом узгодження механічних характеристик двигуна та механізму відповідно до заданих умов експлуатації згідно виразу

$$\frac{M_J}{\Delta\omega} = \beta - \beta_c < 0, \quad (1.1)$$

де M_J – динамічний момент електропривода; $\Delta\omega$ – зміна частоти обертання валу двигуна; β, β_c – жорсткості механічних характеристик двигуна і механізму.

Швидкодія механічної частини електропривода визначається електромеханічною сталою часу $T_m \in (0.1; 10)$, яка може варіюватися від десятих часток секунди до кількох секунд.

Другий і третій рівні електропривода є електроенергетичними. Для забезпечення двигуна електроенергією з необхідними параметрами напруги та частоти, а також для керування і регулювання потоку енергії, використовується статичний перетворювач. Оскільки двигун є безперервним нелінійним елементом, а перетворювач – дискретним нелінійним пристроєм, їхня взаємодія потребує узгодження. Оптимальне живлення двигуна квазісинусоїдальним струмом і напругою дозволяє досягти максимального ККД та мінімізувати спотворення напруги живлення.

На цих рівнях вирішуються завдання покращення енергетичних та динамічних характеристик привода. Швидкодія електроенергетичних рівнів визначається електромагнітними сталими часу $T_e \in (0.01; 0.1)$, які зазвичай знаходяться в діапазоні від сотих до десятих часток секунди.

Четвертий рівень відповідає за інтерфейси локального керування та регулювання параметрів енергетичного каналу електропривода. Від його організації залежать функціональні можливості привода, точність регулювання та швидкодія системи. Інтерфейс реалізується через порти, таймери, цифро-аналогові перетворювачі та підсилювачі, які формують сигнали керування для силових транзисторів або тиристорів.

П'ятий рівень – це пристрої інформаційно-вимірювальної системи електропривода, які здійснюють вимірювання та обробку фізичних параметрів:

- електричних (струм, напруга, ЕРС тощо);
- механічних (момент, швидкість, переміщення тощо);

– технологічних (тиск, температура тощо).

Пристрої цього рівня виконують перетворення сигналів від первинних датчиків, гальванічну розв'язку, підсилення, інтегрування, а також аналого-цифрове або імпульсно-цифрове перетворення для їх подальшої обробки мікроконтролерною системою керування. Швидкодія цього рівня безпосередньо впливає на ефективність і точність роботи четвертого рівня та визначається методами перетворення сигналів, характеристиками цифрового обміну і конкретною апаратною реалізацією.

Мікроконтролерна система автоматичного управління містить енергетичну модель електромеханічного пристрою, що включає чотири основні складові: мережу, перетворювальний пристрій, двигун і технологічний механізм, які розглядаються в аспектах споживання, використання та управління енергією.

Шостий рівень відповідає за інтерфейс міжприводного обміну, який забезпечує координацію роботи локальних електроприводів між собою, а також зв'язок із центральною обчислювальною машиною вищого рівня ієрархії. Обмін даними зазвичай здійснюється в цифровому форматі з високою швидкістю, що забезпечує ефективну статистичну обробку інформації, контроль поточного стану кожного привода і можливість інтерактивної взаємодії з оператором.

Для забезпечення обміну інформацією між окремими електроприводами та між елементами системи управління електроприводу застосовуються промислові протоколи зв'язку, такі як RS-232, RS-485 та PROFINET.

RS-232 – призначений для зв'язку типу «точка-точка» між пристроями, такими як ПК, мікроконтролери чи інші промислові системи. Він підтримує обмін даними на короткі відстані (до 15 м) з низькою швидкістю передачі (до 115,2 кбіт/с) і є чутливим до перешкод.

RS-485 – більш сучасний і надійний промисловий серійний протокол, що дозволяє передавати дані на більші відстані (до 1200 м) з вищою швидкістю (до 10 Мбіт/с) та підтримує багатоточковий зв'язок (до 32 пристроїв в одній мережі без повторювачів). Він широко використовується в промислових автоматизованих системах, системах керування та збору даних через високу стійкість до електромагнітних завад.

PROFINET – це промисловий мережевий протокол, розроблений для швидкої та надійної передачі даних у реальному часі в автоматизованих системах. Він заснований на Ethernet і використовується для обміну даними між контролерами, датчиками, виконавчими механізмами та іншими пристроями в промислових мережах. PROFINET підтримує інтеграцію з PROFIBUS, можливість роботи в реальному часі (RT) та ізохронний режим реального часу (IRT), що важливо для прецизійного керування.

1.1.2. Цифрове управління електроприводами

Сучасне промислове виробництво включає випуск біполярних транзисторів з ізольованим затвором (IGBT), тиристорів, що запираються

(GTO), тиристорів з інтегрованим керуванням (IGCT), а також силових інтелектуальних модулів (IPM), що мають вбудовані засоби захисту ключів та інтерфейси для безпосереднього підключення до мікропроцесорних систем керування. Підвищення ступеня інтеграції в мікропроцесорній техніці та перехід від мікропроцесорів до мікроконтролерів із вбудованим набором спеціалізованих периферійних пристроїв зробили масову заміну аналогових систем керування приводами на системи прямого цифрового керування незворотною тенденцією.

Пряме цифрове керування передбачає не лише безпосереднє управління кожним ключем силового перетворювача з боку мікроконтролера, але й можливість прямого введення сигналів зворотного зв'язку різного типу (аналогових або цифрових) безпосередньо в мікроконтролер із подальшою програмно-апаратною обробкою. Такий підхід дозволяє зменшити кількість додаткових інтерфейсних пристроїв та створити компактні одноплатні контролери для керування приводами. У підсумку, вбудована система керування формується як однокристальне рішення, яке разом із силовим перетворювачем та виконавчим двигуном конструктивно інтегрується в єдиний мехатронний модуль руху.

Електроприводи, керовані за допомогою мікроконтролерів і розвинутих алгоритмів, мають ряд переваг:

- підвищують енергетичну ефективність системи, оскільки регулювання швидкості сприяє зниженню втрат потужності;

- цифрове керування вдосконалює функціонування електропривода, додаючи можливість використання інтелектуальних замкнених контурів, зміни частотних характеристик, розширення діапазону контрольованих несправностей і забезпечення взаємодії з іншими системами;

- такі приводи спрощують електромеханічний перетворювач енергії, дозволяючи усунути необхідність у трансмісіях, коробках передач і редукторах;

- системи на базі мікроконтролерів із флеш-пам'яттю забезпечують простоту оновлення програмного забезпечення, що дозволяє швидко змінювати алгоритми роботи та регульовані параметри при необхідності.

1.1.3. Енергозбереження в електроприводі

З впровадженням регульованих приводів складність системи часто збільшується, тому важливо зберігати загальну вартість у допустимих межах. Для деяких систем, особливо побутових, загальна вартість повинна залишатися на рівні нерегульованого варіанту, щоб забезпечити економічну доцільність впровадження.

Енергозбереження в електроприводі є складовою частиною загального процесу ефективного використання електроенергії і визначається трьома основними процесами:

- енергоспоживанням;
- ефективністю використання спожитої енергії;

– управлінням процесом енергоспоживання.

Енергоспоживання – це процес формування складових потужності на вході перетворювача під час роботи електропривода. Він визначається залежностями активної, реактивної та перетвореної потужності від швидкості та моменту двигуна. Важливим аспектом є розуміння характеру перетворення енергії, складових потужності, а також показників якості електроенергії (ПЯЕ) і їх впливу на характеристики електромеханічних перетворювачів.

Енерговикористання визначає ефективність використання потужності, спожитої з мережі. Воно характеризує якісну сторону процесу енергоспоживання, визначаючи, яка частина електроенергії йде на корисну потужність, а яка втрачається у вигляді тепла та інших факторів. Розподіл втрат впливає на робочий режим електродвигуна, його температуру і загальну надійність. Аналіз балансу складових потужності дозволяє виявити механізми старіння електроустаткування, доповнюючи загальновідомі термічні впливи на його експлуатаційні характеристики.

Енергоуправління – це процес формування режимів енергоспоживання за допомогою технічних пристроїв і систем, що впливають на кола керування електроприводом та перетворювальними пристроями, які живлять ці кола. Воно включає керування перерозподілом втрат у електродвигунах, оптимізацію втрат, мінімізацію нагрівання активних частин електричної машини, зниження рівнів споживаної реактивної потужності та генерування гармонік струму. При цьому всі ці можливості реалізуються завдяки регулювальним функціям самої системи електропривода, а не через додаткові технічні засоби.

Такий енергетичний підхід, що базується на взаємозв'язку процесів енергоспоживання, енерговикористання та енергоуправління, формує єдиний електромеханічний комплекс, який поєднує енергосистему, споживача (електропривод) і технологічну установку. Кожен із цих компонентів має власні можливості регулювання в сфері керування енергоспоживанням і перерозподілом втрат, що дозволяє досягати високої енергоефективності.

Тема.1.2. Класифікація електроприводів

1.2.1. За способом передачі механічної енергії

За способом передачі механічної енергії від вала двигуна до робочих органів машини електропривод поділяється на три групи:

– **груповий**, передбачає використання одного двигуна для приводу кількох механізмів або робочих органів, що дозволяє зменшити кількість електродвигунів, але ускладнює регулювання кожного окремого механізму;

– **одиначний** (однодвигуновий) застосовується для приводу лише одного механізму, що забезпечує кращу точність керування і простоту експлуатації;

– **багатодвигуновий** електропривод застосовується в об'єктах високої потужності, де необхідно забезпечувати значний крутний момент і рівномірний розподіл навантаження між двигунами. Такий підхід використовується в механізмах, де один двигун не може забезпечити необхідні параметри роботи.

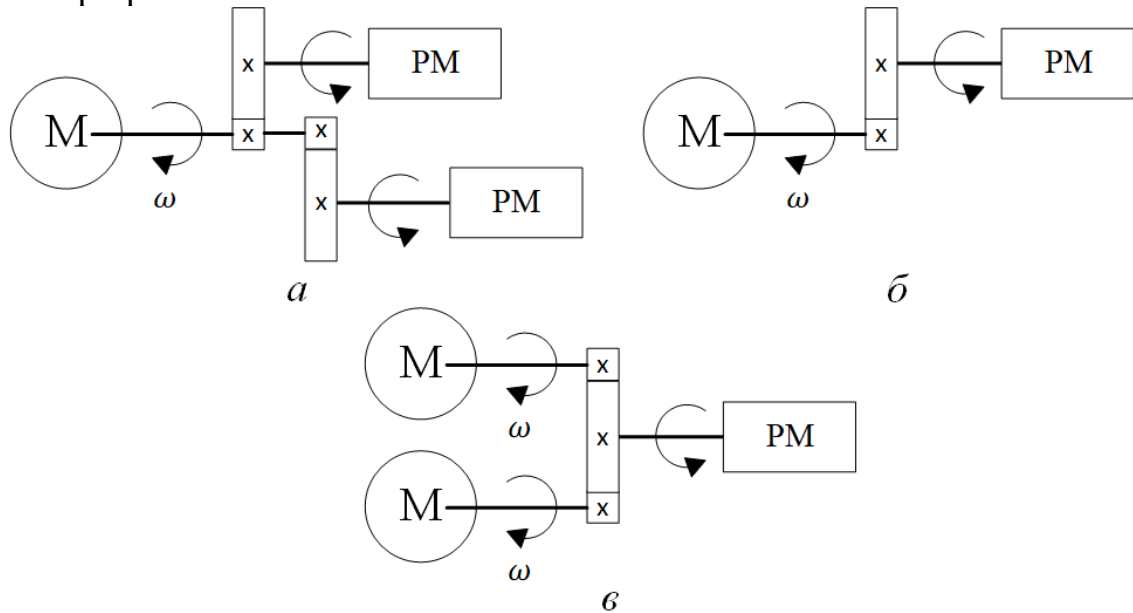


Рис.1.2. Класифікація ЕП за способом передачі механічної енергії (а – груповий, б – однодвигуновий, в – багатодвигуновий)

1.2.2. За родом струму двигуна

За родом струму двигуна електроприводи поділяються на приводи постійного струму та змінного струму.

– Приводи **постійного струму** застосовуються там, де потрібне плавне регулювання швидкості та високий пусковий момент, наприклад, у металургійних прокатних станах, електротранспорті, підйомних механізмах.

Приводи **змінного струму** поділяються на асинхронні та синхронні. Асинхронні двигуни є найбільш поширеними завдяки простоті конструкції, надійності та відносно низькій вартості, тому їх широко використовують у промисловості, транспорті та побутовій техніці. Синхронні двигуни застосовуються в установках з високими вимогами до стабільності швидкості, наприклад, у генераторних установках, компресорах та насосах високої потужності.

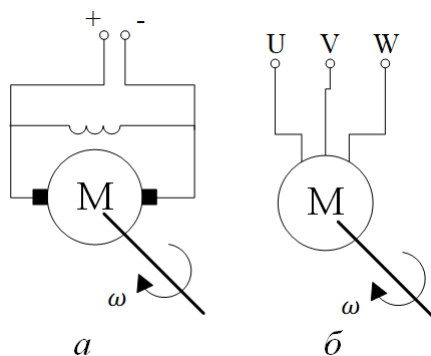


Рис.1.3. Класифікація ЕП за родом струму
(а – постійного, б – змінного струму)

1.2.3. За способом комутації

За способом комутації та конструктивними особливостями електродвигуна приводи можна розділити на колекторні, безколекторні і безконтактні.

– **Колекторний** електропривод використовує двигун постійного струму (ДПС) з щітково-колекторним вузлом для комутації струму в обмотках якоря. Завдяки цьому забезпечується просте керування, висока точність регулювання швидкості та високий пусковий момент. Однак така конструкція має певні недоліки, зокрема швидке зношування щіток, необхідність регулярного технічного обслуговування, а також іскріння, що може обмежувати використання в запиленому або вологому середовищі.

– **Безколекторний** електропривод (BLDC – Brushless DC motor) використовує безщітковий двигун постійного струму з електронною комутацією. Керування фазами здійснюється за допомогою датчиків положення ротора та інвертора, що дозволяє усунути механічний знос щіток, підвищити надійність і довговічність, а також збільшити ККД і уникнути іскріння. Проте складність керування та необхідність використання спеціального контролера роблять такі приводи дорожчими у порівнянні з колекторними.

– **Безконтактний** електропривод працює на основі асинхронного або синхронного двигуна, у якому комутація здійснюється без щіток і колектора, а передача енергії відбувається електромагнітним способом. Це забезпечує високу надійність, відсутність зносу контактів і можливість експлуатації у складних умовах. Однак такі приводи потребують складніших систем керування, зокрема частотних перетворювачів або спеціальних інверторів для регулювання швидкості.

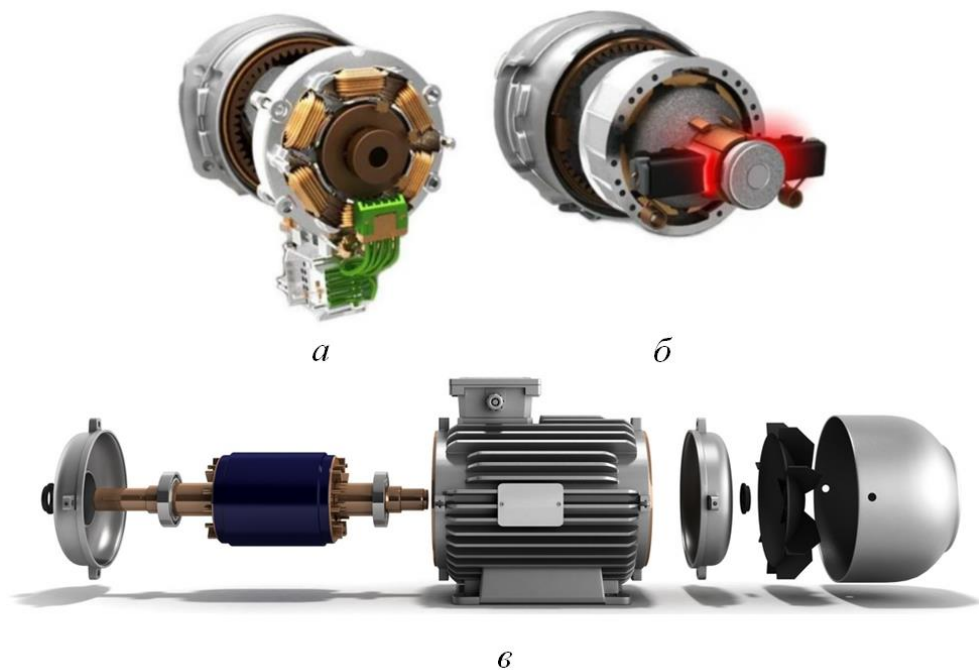


Рис.1.4. Класифікація ЕП за способом комутації (а – безколекторний, б – колекторний, в – безконтактний)

1.2.4. За родом передавального органу

За родом передавального органу електроприводи поділяються на редукторні та безредукторні.

– **Редукторний** електропривод використовує механічний редуктор для передавання обертового моменту від двигуна до виконавчого механізму. Редуктори можуть бути різних типів залежно від способу передачі: зубчасті, черв'ячні або ремінні.

– **Безредукторний** електропривод безпосередньо передає механічну енергію від двигуна до виконавчого механізму, уникаючи втрат енергії на редукторі. Такі приводи зазвичай використовують двигуни з великим моментом або високою швидкістю обертання, що дозволяє обійтися без проміжних передач.

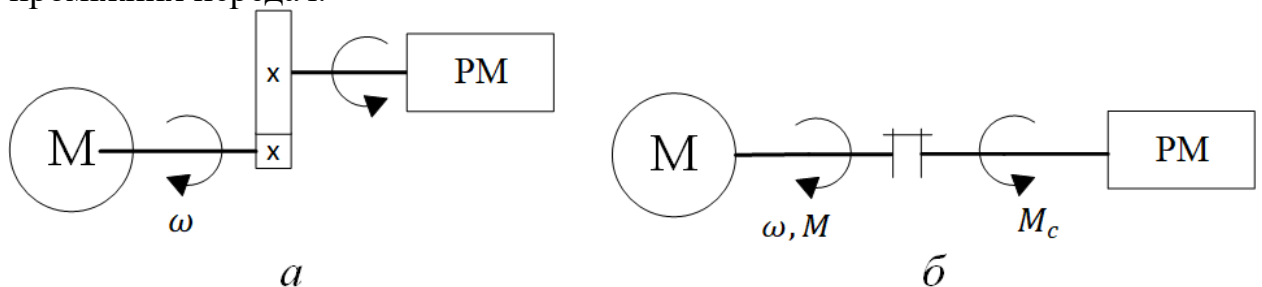


Рис.1.5. Класифікація ЕП за родом передавального органу (а – редукторний, б – безредукторний)

1.2.5. За ступенем автоматизації

За ступенем автоматизації електроприводи поділяються на неавтоматизовані, автоматизовані та автоматичні.

– **Неавтоматизовані** електроприводи повністю керуються оператором, який вручну виконує всі операції, зокрема пуск, зупин, регулювання швидкості та напрямку руху. Такі системи застосовуються в простих механізмах, де автоматизація не є необхідною або економічно виправданою.

– **Автоматизовані** електроприводи передбачають часткову автоматизацію, коли оператор лише подає команди на зміну режиму роботи, а самі процеси, такі як розгін, уповільнення чи підтримка заданої швидкості, виконуються автоматично.

– **Автоматичні** електроприводи функціонують без безпосередньої участі людини, виконуючи всі операції відповідно до заданої програми чи сигналів від системи керування. Вони широко застосовуються в складних виробничих процесах, транспортних системах і робототехніці, де потрібна висока точність і швидкість реакції.

1.2.6. За ступенем керованості

За ступенем керованості електроприводи поділяються на нерегульовані, регульовані, програмно-керовані, ті, що стежать та адаптивні.

– **Нерегульовані** електроприводи працюють з постійною швидкістю, яка визначається параметрами двигуна та навантаження. Вони застосовуються там, де немає необхідності змінювати швидкість або момент, наприклад, у вентиляторах та насосах із постійним навантаженням.

– **Регульовані** електроприводи дають змогу змінювати швидкість і момент двигуна відповідно до вимог технологічного процесу. Це дозволяє підвищити енергоефективність та продуктивність обладнання.

– **Програмно-керовані електроприводи** (числове програмне керування ЧПК) працюють за наперед визначеною програмою, що задає зміну швидкості, напрямку руху та інших параметрів у певний момент часу. Вони застосовуються в автоматизованих виробничих лініях, верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК) та робототехнічних системах.

– **Електроприводи, що стежать**, автоматично відпрацьовують переміщення виконавчого органу робочого механізму із заданою точністю відповідно до сигналу управління, який змінюється довільно.

– **Адаптивні** (самоналагоджувальні) електроприводи здатні автоматично змінювати свої параметри або структуру для оптимізації керування при зміні режиму роботи установки.

Контрольні запитання

1. Що таке електропривод?
2. З яких компонентів складається сучасний багаторівневий електропривод?

3. Які переваги мають електроприводи із цифровим керуванням?
4. Які промислові протоколи зв'язку застосовуються в системах управління електроприводами?
5. Якими процесами визначається енергозбереження в електроприводі?
6. Які типи електроприводів розрізняють залежно від способу передачі механічної енергії?
7. Які існують види електроприводів з урахуванням роду струму двигуна?
8. Як поділяються електроприводи залежно від ступеня автоматизації?
9. Як класифікуються електроприводи за ступенем керованості?

Рекомендована література

[1] – с. 27-32

Лекція 2. Механіка електропривода

Тема 1.3. Механіка електроприводу

Тема 1.3. Механіка електроприводу

1.3.1. Рівняння руху

Елементарна електромеханічна система включає двигун і робочий механізм, безпосередньо з ним з'єднаний. Незважаючи на свою простоту, адже в ній відсутні пружні сили, така система є цілком реальною. Подібний принцип використовується в конструкціях насосів, вентиляторів, підйомних механізмів та багатьох інших машин.

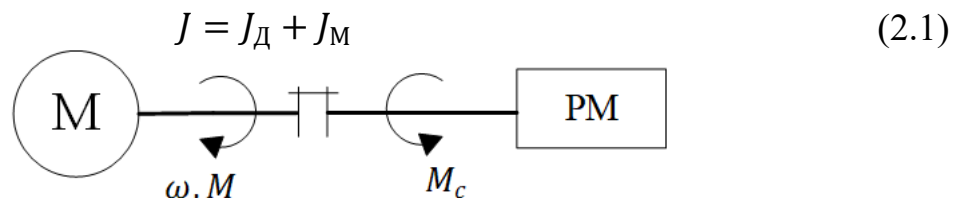


Рис.2.1. Найпростіша електромеханічна система

У системі, зображеній на рис. 2.1, діють два моменти: електромагнітний момент M , який створює двигун, і статичний момент M_c , який створює робочий механізм. Кожен із цих моментів має власну величину та напрямок, а рух системи підпорядковується другому закону Ньютона.

Вся електроенергія W , що надходить до двигуна, перетворюється на механічну і розподіляється між енергією W_c , яка витрачається на подолання сил опору руху, та енергією W_j , що змінює запас кінетичної енергії рухомих елементів системи.

$$W = W_c + W_j, \text{ Дж} \quad (2.2)$$

Якщо розглядати енергію в перерахунку на одиницю часу, отримаємо рівняння потужності.

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dW_c}{dt} + \frac{dW_j}{dt}, \quad (2.3)$$

$$P = P_c + P_j, \text{ Вт}, \quad (2.4)$$

де $P = M \cdot \omega$.

Потужність, яку розвиває двигун, визначається як $P = M \cdot \omega$, де M – електромагнітний момент, Н·м; ω – кутова швидкість обертання, рад/с. Під час обертання двигун створює момент M , необхідний для компенсації статичного моменту M_c , який створює робочий механізм.

$$M = M_c + M_j, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.5)$$

де M_j – динамічний момент.

При обертвовому русі запас кінетичної енергії розраховується за відповідним виразом, що враховує момент інерції системи та кутову швидкість її обертання:

$$W_j = J \cdot \frac{\omega^2}{2}, \quad (2.6)$$

де $J = J_d + J_m$ – сумарний момент інерції обертвових частин мехатронної системи.

$$J = m \cdot R^2, \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (2.7)$$

де m – маса обертвових частин, кг; R – радіус інерції, м.

Динамічні потужність і момент можна визначити, враховуючи зміну кінетичної енергії системи у процесі руху.

$$\frac{dW_j}{dt} = J \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ}{dt}; \quad (2.8)$$

$$M_j = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \cdot \frac{dJ}{dt}. \quad (2.9)$$

У підсумковому вигляді рівняння руху записується з урахуванням всіх моментів, що діють у системі, та кінетичних характеристик обертального руху:

$$M = M_c + J \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \cdot \frac{dJ}{dt}. \quad (2.10)$$

Якщо момент інерції привода залишається незмінним під час роботи, то друга складова рівняння стає нульовою, і рівняння руху набуває спрощеного вигляду:

$$M = M_c + J \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.11)$$

При поступальному русі ($P = F \cdot V$):

$$F = F_c + m \cdot \frac{dV}{dt}, \text{ Н}, \quad (2.12)$$

де F – рушійна сила, Н; F_c – статичне зусилля, Н; m – маса елементів, що рухаються поступально, кг; V – лінійна швидкість, м/с.

Ці рівняння дають змогу розв'язати два ключові завдання електропривода:

– визначити характер його руху за відомих значень моменту двигуна M і моменту опору M_c ;

– обчислити необхідний момент M для забезпечення заданого режиму роботи при відомому навантаженні M_c і визначеному законі зміни частоти обертання двигуна.

Зазвичай основним режимом роботи електричної машини є рушійний. У цьому режимі момент опору чинить гальмівну дію відносно руху ротора та спрямований протилежно моменту, що розвиває двигун. Тому позитивний напрямок моменту опору приймають протилежним до позитивного напрямку моменту двигуна, що дозволяє записати рівняння:

$$M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.13)$$

Режими роботи електропривода узагальнено та представлено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Режими роботи електропривода

1	$M > M_c;$ $\frac{d\omega}{dt} > 0;$ $M_j > 0$	Пуск (розгін) електропривода
2	$M = M_c;$ $\frac{d\omega}{dt} = 0;$ $M_j = 0$	Рух зі сталою швидкістю. Статичний режим роботи
3	$M < M_c;$ $\frac{d\omega}{dt} < 0;$ $M_j < 0$	Гальмування в рушійному режимі
4	$M = 0;$ $\frac{d\omega}{dt} < 0;$ $M_j < 0$	Гальмування вільним вибігом. Двигун відімкнений від мережі
5	$M < 0;$ $-M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt};$ $\frac{d\omega}{dt} < 0;$ $M_j < 0$	Режим електричного гальмування
6	$M = 0;$ $M_r > 0;$ $\frac{M_c + M_r}{J} = -\frac{d\omega}{dt};$ $\frac{d\omega}{dt} < 0;$ $M_j < 0$	Гальмівний режим з застосуванням механічного гальма

У деяких випадках у паспортних даних двигуна вказується швидкість обертання в обертах за хвилину, n (об/хв), а замість моменту інерції наводиться маховий момент GD^2 (кГм²).

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = 1,05 \cdot n \quad (2.14)$$

$$J = \frac{GD^2}{4} \quad (2.15)$$

1.3.2. Приведення моментів і сил

Сучасний розвиток електроприводів спрямований на спрощення та підвищення надійності з'єднання приводного електродвигуна з робочою машиною шляхом усунення проміжних передач. Проте швидкість обертання двигунів обмежується кількістю пар полюсів і частотою живлення. Тому для узгодження параметрів робочої машини та електродвигуна зазвичай використовують проміжну передачу, найчастіше редуктор.

Щоб спростити аналіз будь-якої системи, її необхідно привести до найпростішої моделі шляхом виконання операцій приведення моментів, сил і моментів інерції до вала двигуна. Це означає, що реальну електромеханічну систему, таку як зображена на рис. 2.2,а, замінюють еквівалентною моделлю, поданою на рис. 2.2,б.

Передбачається, що система є жорсткою, без зазорів, а моменти інерції залишаються незмінними. Передатне відношення $i = \frac{\omega_M}{\omega}$ та ККД передачі η вважаються сталими. При цьому потужність у приведеній і реальній системах залишається незмінною, а втрати компенсуються тією частиною системи, яка забезпечує рух. Частота обертання механізму позначається як ω_M .

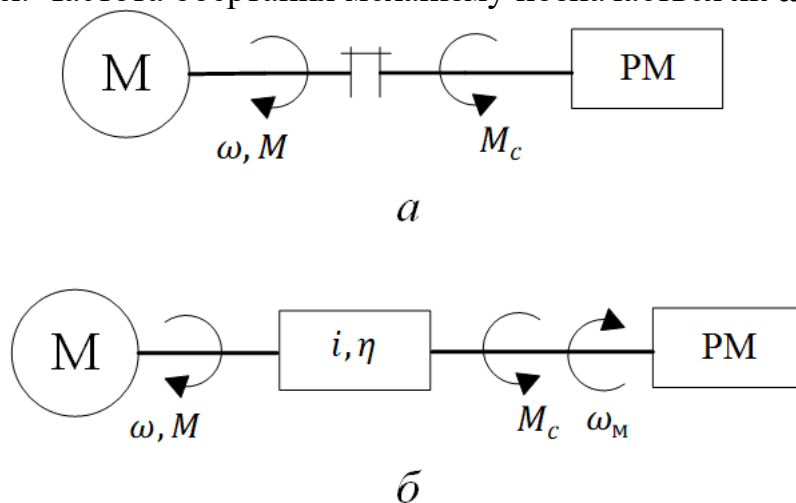


Рис.2.2. Кінематична схема електроприводу

У рушійному режимі $P = M \cdot \omega > 0$, а втрати покриваються двигуном:

$$P'_C = \frac{P_C}{\eta}; \quad (2.16)$$

$$\frac{M_c \cdot \omega_M}{\eta} = M'_C \cdot \omega. \quad (2.17)$$

Звідки приведений статичний момент:

$$M'_C = \frac{M_c}{i \cdot \eta} \quad (2.18)$$

Для поступального руху відповідно:

$$\begin{aligned}
P'_C &= F'_C \cdot V_{\text{пр}}; \\
V_{\text{пр}} &= \omega \cdot R; \\
M_C &= F_C \cdot R.
\end{aligned}
\tag{2.19}$$

У загальному випадку один електродвигун може приводити в дію кілька робочих механізмів, які можуть мати як обертовий, так і поступальний рух робочого органа $P_{cn} = M_{cn} \cdot \omega_n$; $P_{ck} = F_{ck} \cdot V_{ck}$:

$$M'_C = \sum_{n=1}^m M_{cn} \cdot \frac{1}{\eta_n i_n} + \sum_{k=1}^l F_{ck} \cdot \frac{V_k}{\omega} \cdot \frac{1}{\eta_k}.
\tag{2.20}$$

Приведене статичне зусилля:

$$F'_C = \sum_{n=1}^m M_{cn} \cdot \frac{\omega_n}{V_{\text{пр}}} \cdot \frac{1}{\eta_n} + \sum_{k=1}^l F_{ck} \cdot \frac{V_k}{V_{\text{пр}}} \cdot \frac{1}{\eta_k}.
\tag{2.21}$$

Динамічний момент з'являється при зміні кінетичної енергії рухомих частин системи, тобто в разі зміни швидкості або моменту інерції. Приведений динамічний момент можна виразити наступним чином:

$$M'_J = J' \cdot \frac{d\omega}{dt}.
\tag{2.22}$$

Приведення моментів інерції базується на умові рівності запасів кінетичної енергії між реальною та еквівалентною системами:

$$J' \cdot \frac{\omega^2}{2} = \sum_{n=1}^m W_{jn}.
\tag{2.23}$$

У правій частині рівняння підсумовуються кінетичні енергії електромеханічної системи, що включає як обертальний, так і поступальний рух:

$$J' \cdot \frac{\omega^2}{2} = \sum_{n=1}^m W_{jn} = \sum_{n=1}^m J_n \cdot \frac{\omega_n^2}{2} + \sum_{k=1}^l m_k \cdot \frac{V_k^2}{2}.
\tag{2.24}$$

Приведений момент інерції:

$$J' = \sum_{n=1}^m J_n \cdot \frac{\omega_n^2}{\omega^2} + \sum_{k=1}^l m_k \cdot \frac{V_k^2}{\omega^2}.
\tag{2.25}$$

Приведена маса обчислюється на основі умови рівності запасів кінетичної енергії еквівалентної та реальної систем.

$$\begin{aligned}
m' \cdot \frac{V_{\text{пр}}^2}{2} &= \sum_{n=1}^m W_{jn} = \sum_{n=1}^m J_n \cdot \frac{\omega_n^2}{2} + \sum_{k=1}^l m_k \cdot \frac{V_k^2}{2}; \\
m' &= \sum_{n=1}^m J_n \cdot \left(\frac{\omega_n}{V_{\text{пр}}} \right)^2 + \sum_{k=1}^l m_k \cdot \left(\frac{V_k}{V_{\text{пр}}} \right)^2.
\end{aligned}
\tag{2.26}$$

Розглянемо приклади розрахунку приведених сил.

Приклад 1: Визначити приведені статичний момент і момент інерції для заданої схеми (рис. 2.3), враховуючи, що вага каната не береться до уваги.

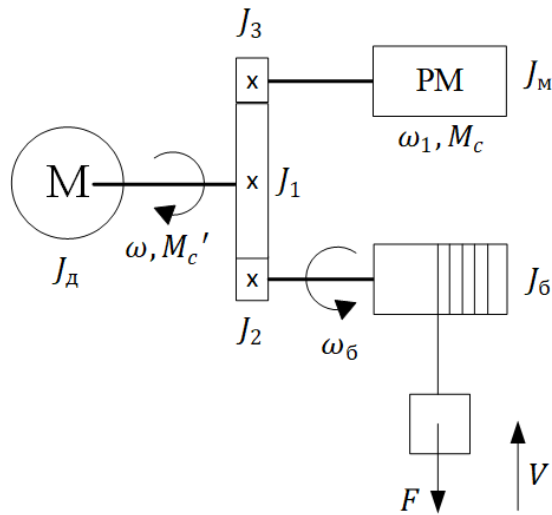


Рис.2.3. Схема системи із обертальним і поступальним рухом робочого механізму

Розв'язання:

Статичне зусилля визначається за виразом:

$$F = m \cdot g. \quad (2.27)$$

Приведений статичний момент:

$$M'_c = M_c \cdot \frac{1}{\eta_{1-3}} \cdot \frac{\omega_1}{\omega} + m \cdot g \cdot \frac{V}{\omega} \cdot \frac{1}{\eta_6 \eta_{1-2}}. \quad (2.28)$$

Приведений момент інерції:

$$J' = J_d + J_1 + (J_3 + J_M) \left(\frac{\omega_1}{\omega}\right)^2 + (J_2 + J_6) \left(\frac{\omega_6}{\omega}\right)^2 + m \frac{V^2}{\omega^2}. \quad (2.29)$$

Приклад 2: Визначити приведені статичний момент і момент інерції схеми (рис. 2.4) за умови: $\omega_1 = \omega_2$; $J_1 = J_2$; $J_3 = J_5$.

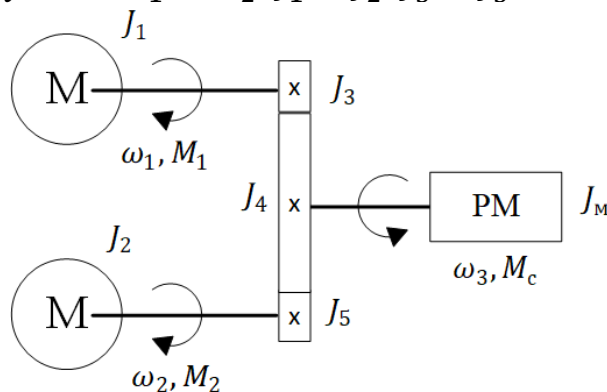


Рис.2.4. Схема дводвигунової системи електроприводу із обертальним рухом робочого механізму

Розв'язання:

Приведений статичний момент:

$$M'_c = \frac{M_c}{2} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\omega_3}{\omega_1}. \quad (2.30)$$

Приведений момент інерції:

$$J' = J_1 + J_3 + \frac{J_4 + J_M}{2} \left(\frac{\omega_3}{\omega_1}\right)^2. \quad (2.31)$$

Приклад 3: Визначити приведені статичний момент і момент інерції схеми на рис. 2.5.

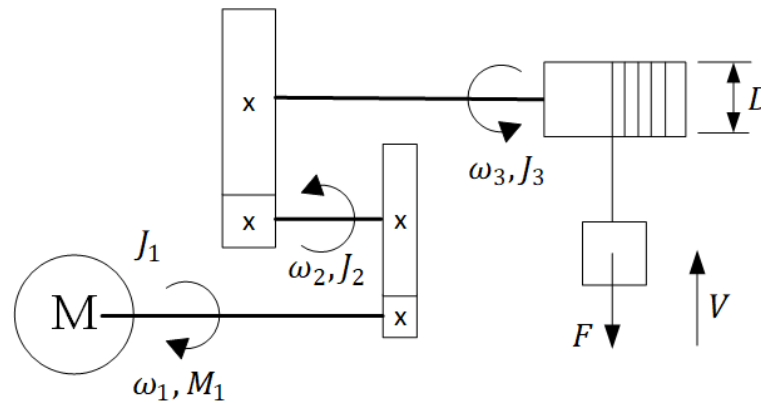


Рис.2.5. Схема системи електроприводу із редуктором і поступальним рухом робочого механізму

Розв'язання:

Приведений статичний момент:

$$M'_c = M_c \cdot \frac{1}{\eta_{1-2}\eta_{2-3}} \cdot \frac{\omega_3}{\omega_1};$$

$$M_c = F \cdot R.$$
(2.32)

Залежність кутової швидкості від лінійної:

$$V = \omega_3 R.$$
(2.33)

Приведений момент інерції:

$$J' = J_1 + J_2 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 + J_3 \left(\frac{\omega_3}{\omega_1} \right)^2 + m \frac{V^2}{\omega_1^2}.$$
(2.34)

Контрольні запитання

1. Чим визначається механічна потужність, яку розвиває двигун?
2. Як пов'язані між собою зміна кінетичної енергії обертових частин електроприводу і приведені момент інерції?
3. Навести рівняння руху для обертального і поступального рухів при незмінному моменті інерції системи.
4. Перелічити можливі режими роботи електропривода.
5. Навести рівняння приведенного статичного моменту для обертального руху робочого механізму.
6. Навести рівняння приведенного статичного моменту для поступального руху робочого механізму.
7. Навести рівняння приведенного моменту інерції для обертального руху робочого механізму.
8. Навести рівняння приведенного моменту інерції для поступального руху робочого механізму.
9. Для чого виконується операція приведення моментів і сил?

Рекомендована література

[2] – с. 5-12

Лекція 3. Механічні характеристики. Момент статичного опору. Статична стійкість електропривода. Регулювання координат електропривода.

1.3.3. Механічні характеристики

1.3.4. Момент статичного опору

1.3.5. Статична стійкість електроприводу

1.3.6. Регулювання координат електроприводу

1.3.3. Механічні характеристики

Моменти M і M_c можуть змінюватися залежно від часу, положення та швидкості. Найбільш значущим є взаємозв'язок цих моментів із частотою обертання ω . Механічною характеристикою електродвигуна називають залежність його кутової швидкості від обертового моменту:

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

Механічна характеристика механізму – це залежність швидкості обертання двигуна від приведеного статичного моменту:

$$\omega = f(M'_c). \quad (3.2)$$

Механічна характеристика двигуна, коли він живиться від мережі з номінальними параметрами без додаткових опорів у колах обмоток, називається природною. Вона містить точки, що відповідають паспортним даним двигуна. Якщо змінюється один або кілька параметрів, характеристики називають штучними.

Залежності частоти обертання від струму називають електромеханічними характеристиками. Крім того, існують і регулювальні характеристики.

Механічні характеристики оцінюються коефіцієнтом жорсткості, який визначається як відношення нескінченно малих приростів моменту до відповідних змін швидкості:

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}. \quad (3.3)$$

У більшості випадків β є від'ємною величиною, тому для оцінки форми механічної характеристики зазвичай вказують його абсолютне значення. За рівнем жорсткості характеристики двигуни поділяються на три групи (рис.3.1).

Жорсткість характеристики механізму розраховується за наступним виразом:

$$\beta_c = \frac{\Delta M_c}{\Delta \omega}. \quad (3.4)$$

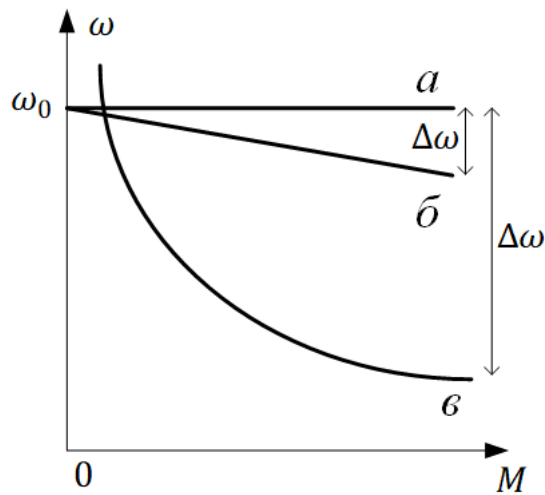


Рис.3.1. Механічні характеристики двигунів: а – абсолютно жорстка; б – жорстка; в – м’яка

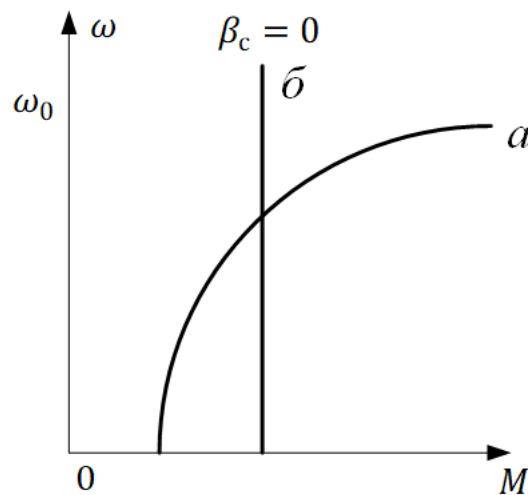


Рис.3.2. Механічні характеристики механізмів: а – залежні від швидкості навантаження; б – незалежні

Режим роботи, за якого навантаження та швидкість залишаються незмінними й не змінюються з часом, називається статичним або усталеним: $M_j = 0$; $M = M_c$.

Розгляд механічних характеристик двигуна та навантаження разом (рис. 3.3) дає змогу безпосередньо визначити параметри усталеного режиму, зокрема швидкість $\omega_{уст}$ та момент $M_{уст}$.

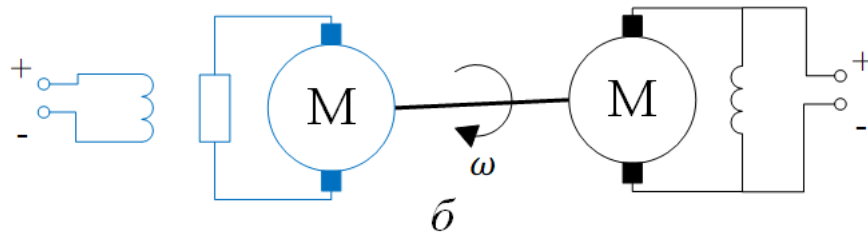
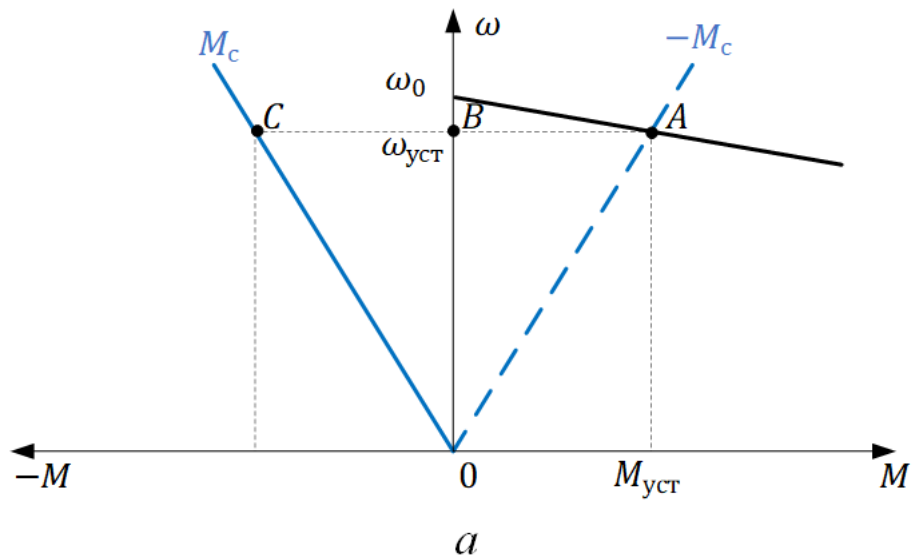


Рис.3.3. а – Механічні характеристики двигуна і навантаження; б – схема підключення

Якщо відобразити характеристику M_c дзеркально відносно осі швидкості, то точка A , де відображена характеристика перетинається з характеристикою двигуна, визначить статичний режим, оскільки виконується рівність $M + (-M_c) = 0$ (відрізки AB і BC рівні). Цей метод широко застосовується в електроприводі.

Всі електричні машини є оборотними, тобто можуть працювати як у рушійному, так і в генераторному режимах. У **рушійному режимі** електрична машина споживає електроенергію і створює обертальний момент, напрямок якого збігається зі швидкістю ($P = M \cdot \omega > 0$). Характеристики машини в цьому режимі розташовуються в першому і третьому квадрантах (рис. 3.4).

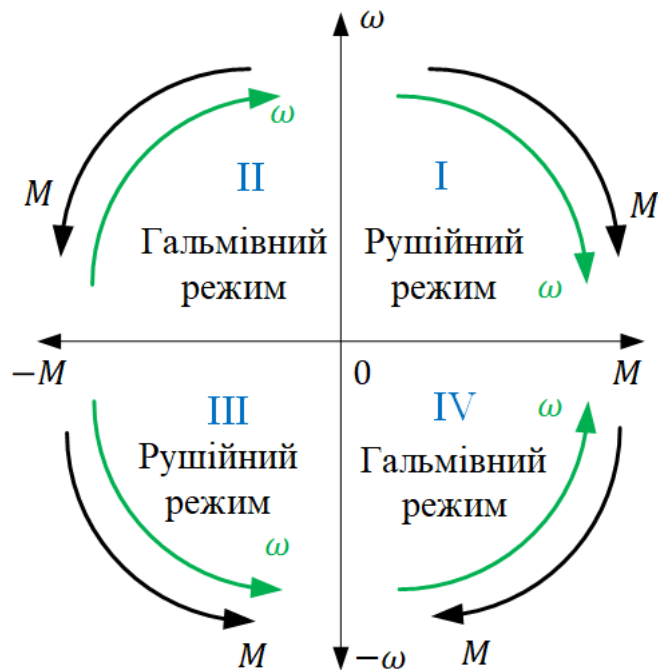


Рис.3.4. Напрями моменту і кутової швидкості обертання в різних режимах роботи

Якщо ж машина працює як джерело електроенергії, її момент спрямований протилежно до напрямку обертання – це **гальмівний режим**. ($P = M \cdot \omega < 0$). У гальмівному режимі механічні характеристики машини розташовуються у другому та четвертому квадрантах.

Для зупинки машини двигун можна вимкнути від мережі, у такому випадку гальмування відбуватиметься під впливом сил опору руху – це **режим вільного вибігу**. За будь-якої швидкості обертаючий момент дорівнює нулю, а механічна характеристика двигуна збігається з віссю ординат.

Щоб прискорити процес гальмування, момент електричної машини має бути спрямований протилежно до напрямку швидкості. Такий режим називається гальмівним, при якому двигун працює в генераторному режимі ($P = M \cdot \omega < 0$). У цьому випадку механічна енергія, що надходить від робочого механізму, передається на вал машини та перетворюється в електричну. Відповідні механічні характеристики розташовуються у другому та четвертому квадрантах.

Функціонування електропривода за умов зміни швидкості або навантаження називається динамічним режимом або перехідним процесом.

У загальному випадку можна виділити такі режими роботи електропривода:

- пуск;
- робота при постійному навантаженні;
- зміна навантаження (скидання або накидання);
- регулювання швидкості;
- реверсування;

- гальмування (із зупинкою або без неї);
- холостий хід.

Будь-яка робоча машина під час виконання виробничого процесу проходить як перехідні, так і статичні режими роботи, однак їхнє значення варіюється залежно від умов експлуатації. Для установок із постійною швидкістю та навантаженням, де пуски відбуваються рідко (наприклад, вентилятори, компресорні станції), тривалість і характер перехідних процесів не мають критичного значення. Натомість для приводів із частими пусками (наприклад, підйомні механізми, екскаватори) особливості перехідних процесів відіграють ключову роль.

1.3.4. Момент статичного опору

Статичний момент на валу двигуна виникає під впливом сил опору, які поділяються на корисні та шкідливі. Корисні сили опору – це ті, для подолання яких призначена машина. Здебільшого статичні моменти чинять опір руху, проте в окремих випадках можуть його підтримувати.

За своєю природою статичні моменти поділяються на дві категорії:

– **реактивні** (пасивні), що виникають через сили тертя, різання, стискання непружних матеріалів, вони завжди протидіють руху та змінюють знак при зміні напрямку обертання (рис. 3.5,а);

– **активні**, що залишаються незмінними незалежно від напрямку обертання валу двигуна та виникають випадку зміни потенційної енергії окремих елементів системи (підйом вантажу, стискання пружних тіл тощо), тому їх також називають потенційними моментами (рис. 3.5,б).

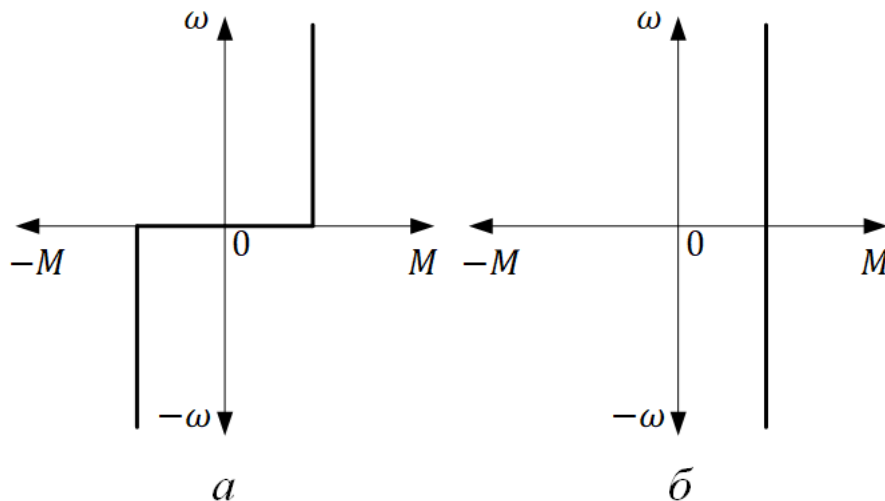


Рис.3.5. Статичні моменти: а – реактивний, б – активний

Робочі механізми можна класифікувати за характером зміни статичного моменту на п'ять основних категорій.

Перша група (рис. 3.6,а) включає механізми, у яких статичний момент залишається постійним ($M_c = const$). До них належать підйомні пристрої з

механізмами урівноваження, конвеєри, що працюють при незмінному навантаженні, тощо.

До **другої групи** (рис. 3.6,б) входять механізми, такі як вентилятори, насоси й компресори, у яких статичний момент змінюється залежно від швидкості:

$$M_c = f(\omega^n), \quad (3.5)$$

де n – будь яке число.

Третя група (рис. 3.6,в) включає механізми, у яких статичний момент змінюється залежно від кута повороту:

$$M_c = f(\varphi). \quad (3.6)$$

До цієї групи відносяться механізми, що мають кривошипно-шатунні системи, такі як поршневі насоси та компресори.

Четверта група включає механізми, у яких статичний момент змінюється залежно від пройденого шляху, наприклад, рейковий електротранспорт і неурівноважені підйомні машини.

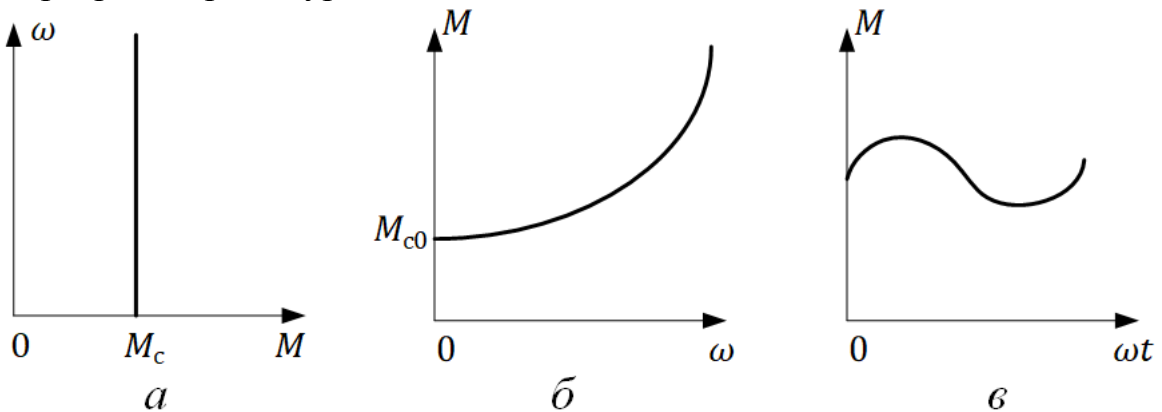


Рис.3.6. Статичні моменти різних робочих механізмів

П'ята група охоплює обладнання, для якого статичний момент має випадковий характер через особливості виробничого процесу. До таких механізмів належать пристрої, що використовуються в свердлінні, копанні та видобутку корисних копалин, зокрема видобувні комбайни, екскаватори та електроінструмент. Розрахунок статичного моменту для цих машин базується на усередненій кривій, отриманій експериментально.

1.3.5. Статична стійкість електроприводу

Статична стійкість роботи агрегату означає його здатність повертатися до стану стійкої рівноваги після дії нескінченно малих збурень. Умови такої рівноваги визначаються формою механічних характеристик як самого механізму, так і двигуна. Аналіз механічних характеристик навантаження та двигуна дає змогу встановити, чи буде сталий режим роботи статично стійким, тобто чи зможе система повернутися до початкового стану після випадкового збурення.

Ступінь стійкості роботи агрегату оцінюється за допомогою коефіцієнта стійкості, який визначається виразом:

$$k_c = \frac{M_j}{\Delta\omega}. \quad (3.7)$$

На рис. 3.7 показані механічні характеристики асинхронного двигуна при роботі зі сталим навантаженням. Якщо внаслідок збурення швидкість з точки *a* зменшиться до значення ω_2 , тобто на $\Delta\omega$, то момент двигуна зросте до M_2 . Оскільки навантажувальний момент M_c залишається незмінним, виникає додатний динамічний момент $M_j = M_2 - M_c$, під дією якого привод починає прискорюватися. Цей процес триватиме до моменту, коли швидкість досягне значення ω_c , після чого система стабілізується.

Якщо швидкість збільшується на $\Delta\omega$ понад значення ω_c , утворюється від'ємний динамічний момент, який уповільнює привод і повертає його до початкової швидкості. Таким чином, робота приводу в точці “*a*” є статично стійкою, оскільки коефіцієнт стійкості має від'ємне значення.

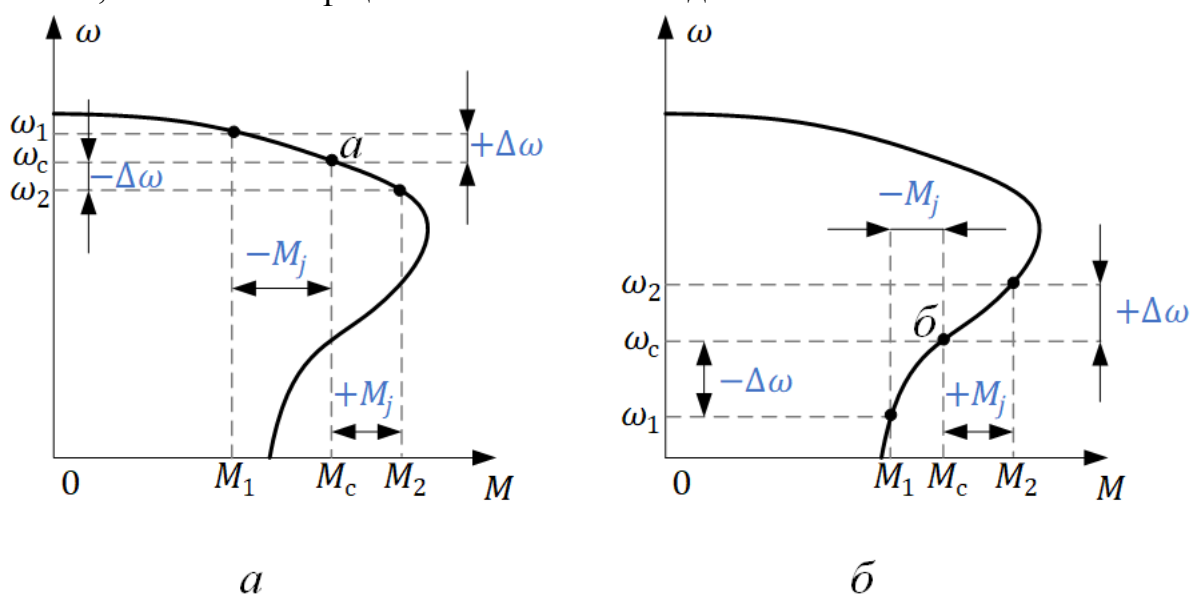


Рис.3.7. Статична стійкість роботи асинхронного двигуна

Сталий режим роботи спостерігається і в точці “*б*”. Однак, якщо швидкість збільшується на $\Delta\omega$, динамічний момент M_j також стає додатним, що спричиняє подальше зростання швидкості. Навпаки, при зменшенні швидкості на $\Delta\omega$ момент M_j стає від'ємним, що ще більше уповільнює привод. Отже, у точці “*б*” робота приводу є статично нестійкою, оскільки коефіцієнт стійкості має додатне значення.

1.3.6. Регулювання координат електроприводу

Головне завдання електропривода полягає в керуванні його вихідними параметрами – швидкістю та моментом, забезпечуючи їх цілеспрямовану зміну відповідно до вимог технологічного процесу. Регулювання цих величин здійснюється шляхом впливу на механічну характеристику двигуна. Окремим випадком такого регулювання є підтримка однієї координати на заданому рівні незалежно від змін іншої.

У більшості випадків основною регульованою величиною є швидкість обертання. Наприклад, слід змінювати швидкість відповідно до умов руху транспортного засобу та стану дорожнього покриття; необхідно контролювати швидкість обертання робочого колеса насоса, щоб забезпечити необхідний напір у водопостачальній системі; також потрібно підтримувати стабільну швидкість руху кабельної жили під час нанесення ізоляції, та в інших подібних процесах.

Термін “регулювання швидкості” означає використання різних механічних характеристик, наприклад, для двигуна постійного струму (рис. 3.8,а), і його не слід плутати зі звичайною зміною швидкості, навіть якщо вона значна. Остання виникає внаслідок збільшення або зменшення навантаження та відбувається відповідно до форми наявної механічної характеристики (рис. 3.8,б).

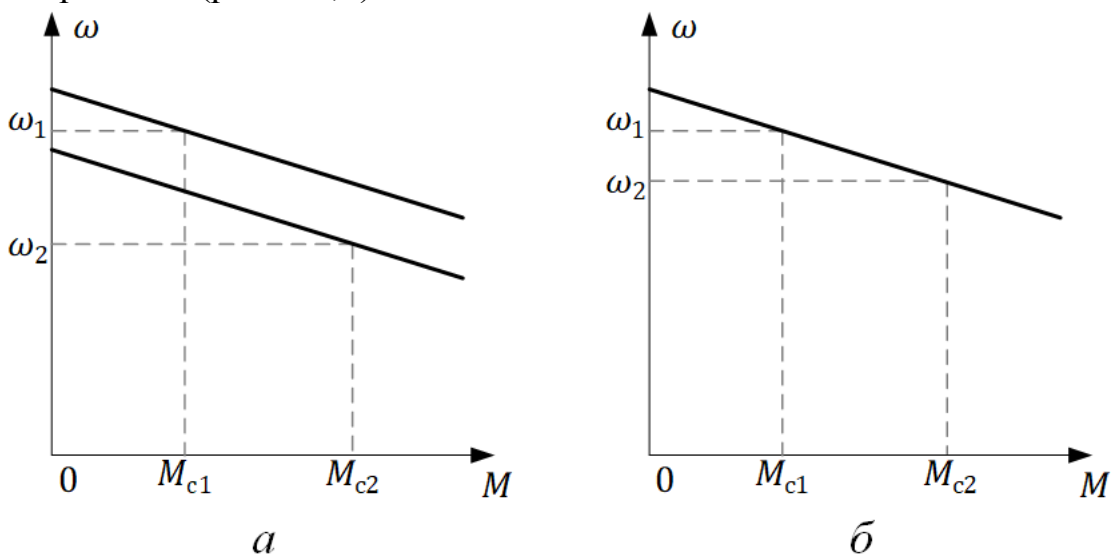


Рис.3.8. Регулювання координат електропривода

У деяких випадках виникає потреба в регулюванні моменту. Це необхідно, наприклад, для якісного намотування дроту на котушку після волочильного стану або для запобігання обриву троса під час буксирування судна на великих хвилях.

Регулювання швидкості передбачає цілеспрямоване формування механічних характеристик. Основною вважається природна характеристика двигуна, яка відповідає номінальним параметрам. Усі інші характеристики, створені для регулювання швидкості, є штучними й можуть формуватися різними методами, що відрізняються як технічно, так і економічно.

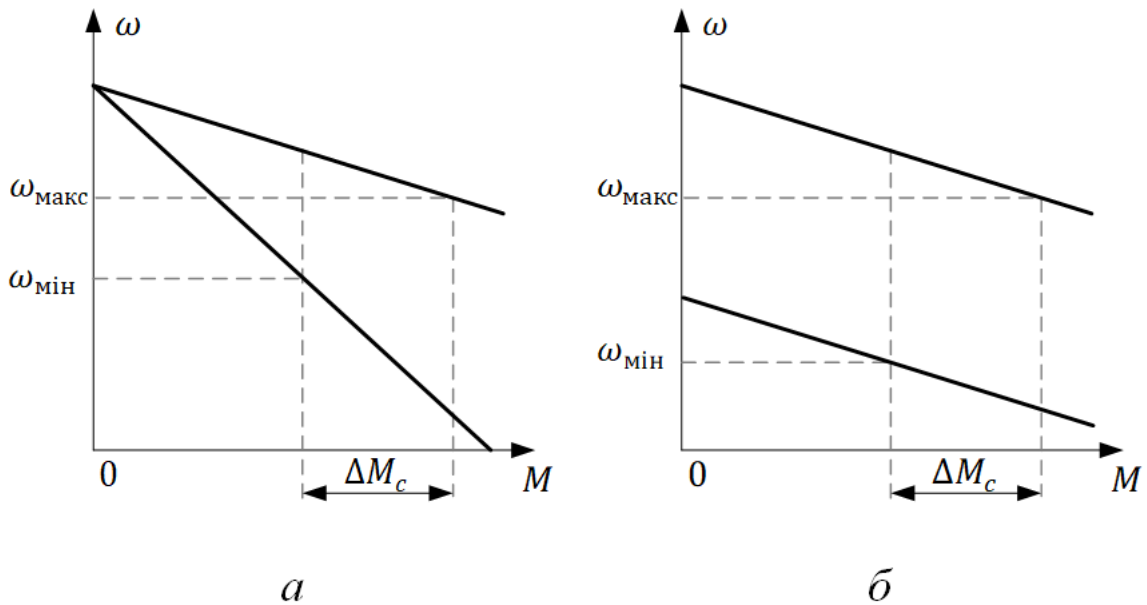


Рис.3.9. Регулювання швидкості

Напрямок регулювання може бути різним. Штучні характеристики можуть розташовуватися лише нижче природної, що означає **однозонне регулювання** вниз від основної швидкості, або тільки вище природної, що відповідає однозонному регулюванню вгору. Якщо ж регулювання здійснюється як вище, так і нижче природної швидкості, воно називається **двозонним**.

Діапазон регулювання визначається як відношення максимальної швидкості до мінімальної при певних змінах моменту навантаження:

$$D = \frac{\omega_{\text{макс}}}{\omega_{\text{мін}}}. \quad (3.8)$$

Як показано на рис. 3.8, навіть за однакових природних характеристик і однакових змін моменту навантаження можливі суттєві відмінності у діапазоні регулювання, що обумовлено жорсткістю штучних характеристик.

Жорсткість характеристик також визначає такий важливий показник, як стабільність (стійкість) швидкості на штучних характеристиках. Вона може бути низькою, як показано на рис. 3.8,а, або високою, як на рис. 3.8,б. У деяких випадках необхідні абсолютно жорсткі характеристики ($\beta = \infty$), тоді як в інших, навпаки, потрібні дуже м'які характеристики, наприклад, при регулюванні моменту.

Плавність регулювання визначає можливість отримання штучних характеристик, які можуть розташовуватися на будь-якій необхідній відстані одна від одної, що забезпечує плавне регулювання. У протилежному випадку, коли можливо використовувати лише декілька фіксованих характеристик, таке регулювання називають ступінчатим (дискретним).

Перевантажувальна спроможність визначається як відношення максимального моменту до номінального, що характеризує здатність системи витримувати короточасні перевантаження без втрати працездатності:

$$\lambda = \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}} \quad (3.9)$$

Характер зміни моменту двигуна під час регулювання швидкості визначає допустиме навантаження на штучних характеристиках, що впливає на надійність і термін служби електропривода. Тривало допустиме навантаження обмежується рівнем допустимого нагрівання двигуна.

Допустиме навантаження на природній характеристиці визначається номінальним моментом двигуна $M_{\text{н}}$. Якщо не враховувати зміну тепловіддачі, то номінальний струм двигуна $I_{\text{н}}$ приймається як гранично допустимий у силових колах незалежно від швидкості. У такому разі для двигуна з примусовим охолодженням допустимий момент $M_{\text{пр}} \equiv I \cdot \Phi$ залежить від магнітного потоку Φ на відповідній штучній характеристиці. Оптимальне використання електродвигуна при регулюванні швидкості досягається, коли його момент на всіх штучних характеристиках відповідає статичному моменту робочої машини.

Якщо **регулювання здійснюється при незмінному магнітному потоці** $\Phi = \Phi_{\text{н}} = \text{const}$, то момент двигуна залишається постійним $M_{\text{пр}} \equiv I_{\text{н}} \cdot \Phi_{\text{н}} = M_{\text{н}}$. Такий тип регулювання швидкості називають регулюванням зі сталим моментом. У цьому випадку потужність двигуна змінюється пропорційно швидкості (рис. 3.10, а).

У разі **регулювання зі сталою потужністю** змінюється магнітний потік двигуна, тоді як струм залишається незмінним. При цьому момент двигуна змінюється за гіперболічною залежністю в міру зміни швидкості (рис. 3.10, б).

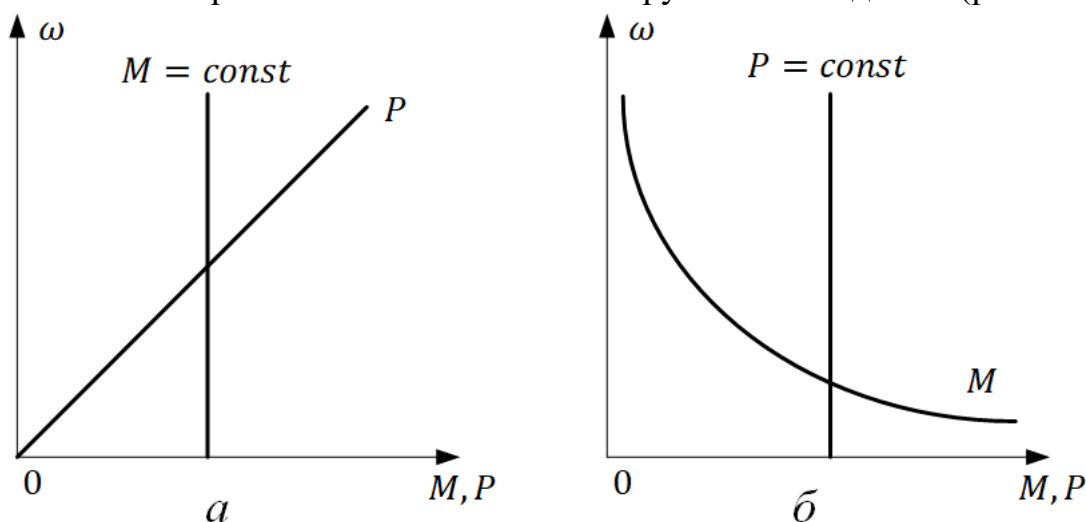


Рис.3.10. Регулювання координат при сталому моменті (а) та потужності (б)

Економічність регулювання визначається рівнем енергетичних втрат, що супроводжують обраний метод регулювання. У деяких випадках її можна приблизно оцінити шляхом порівняння корисної потужності $P_2 = M \cdot \omega$ із потужністю, що споживається з мережі P_1 . Це дозволяє визначити втрати ΔP або розрахувати ККД у певній характерній точці:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}. \quad (3.10)$$

Більш точні й обґрунтовані оцінки економічності регулювання при порівнянні різних методів базуються на циклічному ККД, що враховує реальні умови роботи привода протягом усього робочого циклу. Витрати на регулювання можна визначити через вартість додаткового обладнання C , необхідного для його реалізації. Оцінити ефективність цих витрат зручно за допомогою розрахунку строку їх окупності:

$$T_{\text{ок}} = \frac{C}{E}, \quad (3.11)$$

де E – ціна річного ефекту від використання регулювання.

Якщо замість нерегульованого електропривода насоса застосувати частотно-регульований, при цьому витрати на перетворювач частоти складуть 10 000 грн, а річна економія електроенергії, води та тепла досягне 11 000 грн/рік, то період окупності становитиме менше року:

$$T_{\text{ок}} = \frac{10000}{11000} \approx 0,9. \quad (3.12)$$

Зазначені показники регулювання дають змогу порівнювати різні методи зміни частоти обертання. Ідеальним був би метод, що забезпечує плавне двозонне регулювання в широкому діапазоні зі сталим припустимим навантаженням $M_{\text{пр}} \approx M_{\text{н}}$, мінімальними втратами та невисокою вартістю додаткового обладнання. Однак такого універсального способу не існує, тому інженер завжди змушений знаходити оптимальний компроміс.

Контрольні запитання

1. Що таке механічні характеристики двигуна і робочого механізму?
2. Що таке жорсткість механічних характеристик?
3. Назвати основні режими роботи електроприводу.
4. Як за допомогою механічних характеристик двигуна та робочого механізму визначити швидкість усталеного руху?
5. Які існують типи статичного моменту?
6. Навести класифікацію робочих механізмів за характером зміни статичного моменту.
7. Що таке статична стійкість електроприводу і яким чисельним показником вона вимірюється?
8. Що називають регулюванням швидкості двигуна?
9. Чим відрізняється природна зміна швидкості від регулювання швидкості двигуна?
10. Чому при зниженні жорсткості механічної характеристики двигуна зменшується діапазон регулювання швидкості?

Рекомендована література

[2] – с. 13-23

Лекція 4. Структура енергетичного каналу електропривода. Баланс потужностей потоків енергії силового каналу. Коефіцієнт корисної дії. Узагальнений критерій енергетичної ефективності каналу

Тема 1.4. Структура енергетичного каналу електропривода

Тема 1.5. Баланс потужностей потоків енергії силового каналу

Тема 1.6. Коефіцієнт корисної дії

Тема 1.7. Узагальнений критерій енергетичної ефективності каналу

Тема 1.4. Структура енергетичного каналу електропривода

На рисунку 4.1 представлена структурна схема енергетичного каналу електропривода.

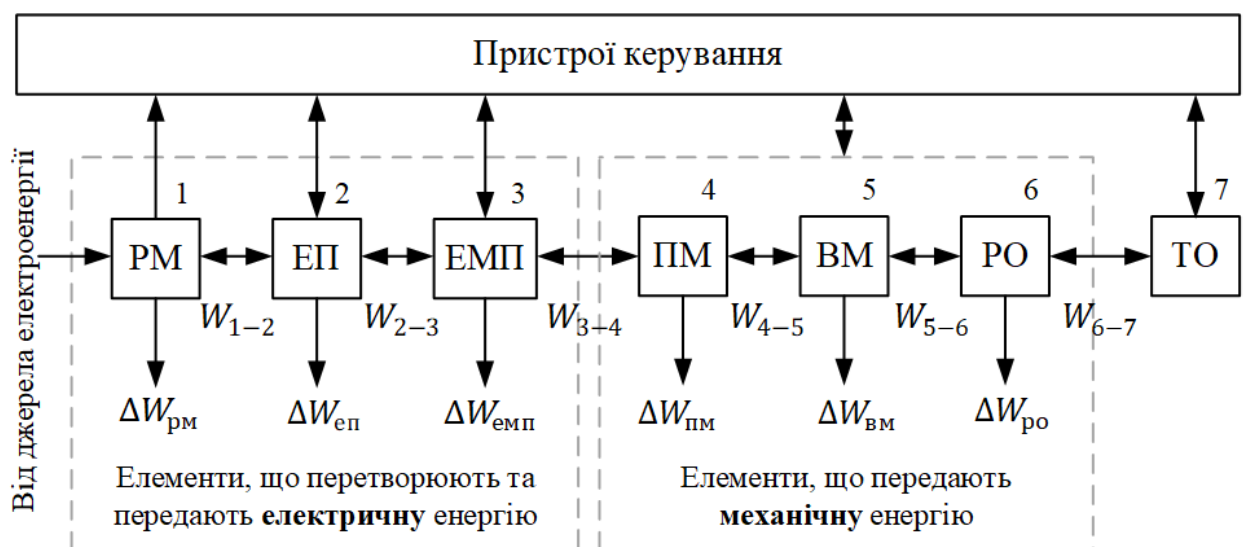


Рис 4.1. Структурна схема енергетичного каналу електропривода

Пристрої керування подані без розподілу на окремі блоки, оскільки в загальному випадку вони можуть взаємодіяти з усіма силовими елементами. Ці взаємозв'язки поділяються на два типи: керуючі сигнали, що спрямовуються від пристроїв керування до енергетичної частини, та сигнали зворотного зв'язку, що надходять у зворотному напрямку. Двонаправлені стрілки в силовому каналі вказують на можливість передавання енергії між елементами в обох напрямках. Кожен елемент кола перетворення енергії характеризується трьома ключовими параметрами: якістю процесу, тривалістю його протікання та здатністю до керування.

Першим елементом є **розподільна мережа (РМ)**, через яку подається електроенергія. Її параметри безпосередньо впливають на характеристики електроенергії, що надходить на вхід електропривода. Під якістю електроенергії зазвичай розуміють рівень несинусоїдальності та несиметрії напруги живлення, а також можливі коливання та відхилення напруги і частоти. Якість живлення впливає на роботу електропривода, тоді як характеристики і режими його силового каналу, у свою чергу, визначають втрати енергії та режим роботи розподільної мережі.

Питання електромеханічного та енергетичного зв'язку між територіально розосередженими електроприводами, а також оцінка їх взаємного впливу є особливо актуальними для потужних агрегатів, що працюють від спільної мережі живлення. Робочі режими окремих електроприймачів впливають на сусідні, що може спричинити технологічні наслідки. Реалізація енергозберігаючих заходів шляхом відключення певних установок потребує не лише спрощення процесу їхнього запуску, а й запобігання впливу на інші агрегати, зокрема й віддалені. Подібні виклики виникають і під час керування енергетичними режимами таких приводів.

Надійність розподільної мережі як частини енергосистеми визначається її працездатністю, що залежить від режиму енергопостачання та показників якості енергії (ПЯЕ). Енергосистема має можливість як формувати ПЯЕ, так і регулювати режим енергопостачання. Якщо електропривод включає перетворювач енергії, його характеристики споживання енергії подібні до ПЯЕ, проте відрізняються тим, що певні параметри якості споживаної енергії впливають на загальні ПЯЕ системи. До таких параметрів належать складові повної потужності та гармонічні спотворення струму й напруги, які надходять з мережі.

Миттєва потужність, яка визначається добутком миттєвих значень напруги та струму на вході перетворювача, характеризує швидкість надходження електромагнітної енергії до перетворювача в певний момент часу. Протягом періоду змінного струму її значення та знак змінюються. Якщо потужність є позитивною, енергія надходить у перетворювач, а якщо негативною – повертається до джерела. Повернення енергії можливе завдяки електромагнітному полю, яке акумулює її в одній частині періоду змінного струму і віддає в іншій. У схемі електропривода цей процес відображають індуктивності та ємності, що беруть участь в енергетичному обміні.

Активна потужність (P) визначається як середнє значення миттєвої потужності за період напруги живлення та характеризує кількість електромагнітної енергії, що безповоротно перетворюється за секунду в тепло чи інші форми енергії. Вона відображає корисну роботу в навантаженні, включаючи як корисну потужність, так і втрати в установці.

Повна потужність (S) визначає розрахункові струми та напруги в мережі й завжди перевищує фактичну активну потужність, передану навантаженню, оскільки містить неактивні складові. Ці складові не створюють корисного ефекту, але спричиняють додаткові втрати в мережі живлення та електроприводі. До них належать реактивна потужність, потужність спотворень і потужність несиметрії.

Реактивна потужність (Q), або потужність зсуву, виникає через фазовий зсув між основною гармонікою струму навантаження та синусоїдальною напругою мережі живлення. Основною гармонікою струму називається його складова, що змінюється з тією ж частотою, що й напруга мережі. Внаслідок цього фазового зсуву утворюється реактивна складова струму, яка не бере участі в передачі активної потужності навантаженню, оскільки середнє значення миттєвої потужності, обумовлене цією складовою,

дорівнює нулю. Водночас, проходячи через перетворювач та мережу живлення, ця складова струму спричиняє додаткові втрати енергії.

Коефіцієнт потужності ($\cos\varphi$) – чисельний показник, що характеризує ефективність використання електричної потужності. Він є відношенням активної потужності, яка фактично перетворюється в корисну енергію, до повної потужності: $\cos\varphi = P/S$.

Потужність спотворень виникає через протікання гармонік струму, частота яких не збігається з частотою напруги мережі. Хоча середнє значення миттєвої потужності, пов'язане з цими гармоніками, за період дорівнює нулю, вони все ж спричиняють додаткові втрати енергії в мережі.

Потужність несиметрії відображає додаткові енергетичні втрати, що виникають через нерівномірний розподіл струму між фазами у багатофазному колі. Оскільки втрати залежать від квадрата струму, його збільшення в одній фазі за рахунок інших призводить до зростання загальних втрат.

Електричний перетворювач (ЕП) трансформує електричну енергію, що поступає на його вхід, у такий вигляд, який необхідний для подальшого перетворення її в механічну роботу через електромеханічний перетворювач (ЕМП). Він управляє рівнями енергетичних потоків до електромеханічного перетворювача і дозволяє регулювати параметри споживаної та перетвореної енергії. Так, можливі:

Так, можливі:

– регулювання споживаної реактивної потужності в межах заданих значень (управління коефіцієнтом зсуву першої гармоніки струму відносно напруги);

– регулювання гармонічного складу струму (управління коефіцієнтом спотворення струму мережі згідно з заданою функціональною залежністю);

– керування амплітудою та фазою окремих гармонік струму в мережі перетворювального пристрою для взаємної компенсації складових струму між двома або більше перетворювальними пристроями, що живляться від однієї мережі;

– симетрування навантаження в мережі живлення при використанні перетворювачів великої потужності.

В сучасних приводах в якості електричних перетворювачів використовуються наступні:

– керовані і некеровані випрямлячі (рис. 4.2, а);

– інвертори (рис. 4.2, б);

– перетворювачі частоти з ланкою постійного струму (рис. 4.2, в);

– циклоконвертори та матричні перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком (рис. 4.2, г);

– регулятори напруги і струму.

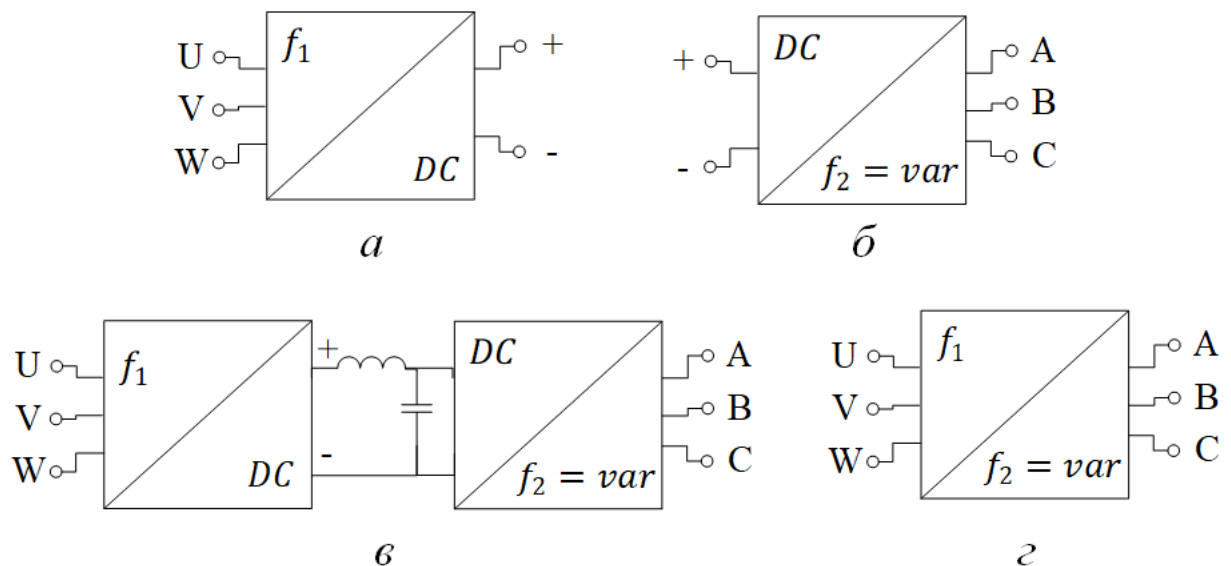


Рис.4.2. Типи електричних перетворювачів

Електромеханічний перетворювач (двигун) перетворює електричну енергію в механічну, визначаючи з урахуванням параметрів механічної частини характер руху робочого органа. Він задає змінний електромагнітний момент M та частоту обертання ω при обертальному русі, а також силу F і лінійну швидкість V при поступальному русі.

Аналіз системи електропривода разом з перетворювачем енергії в умовах керування енергоспоживанням показує, що при сталій швидкості обертання зміна енергетичного стану, спричинена зміною струму збудження та напруги, веде до зміни параметрів енергоспоживання перетворювача енергії. Ця зміна залежить від численних факторів, включаючи конструкцію перетворювального пристрою, що вказує на зв'язаний енергетичний ефект між перетворювачем і двигуном.

До складу силової частини входить **передавальний механізм (ПМ)**, який забезпечує зв'язок між електромеханічним перетворювачем (ЕМП) та **виконавчим механізмом (ВМ)**. Зазвичай для цього використовують редуктор, який знижує швидкість обертання двигуна до рівня, необхідного для роботи виконавчого механізму. Виконавчий механізм, наприклад, барабан лебідки, трос або відхиляючі шківи, забезпечує узгодження швидкості підвіски (робочого органу, РО) зі швидкістю технологічного об'єкта (ТО) – вантажу.

Приклад фізичної реалізації силового каналу зображений на рис. 4.3.

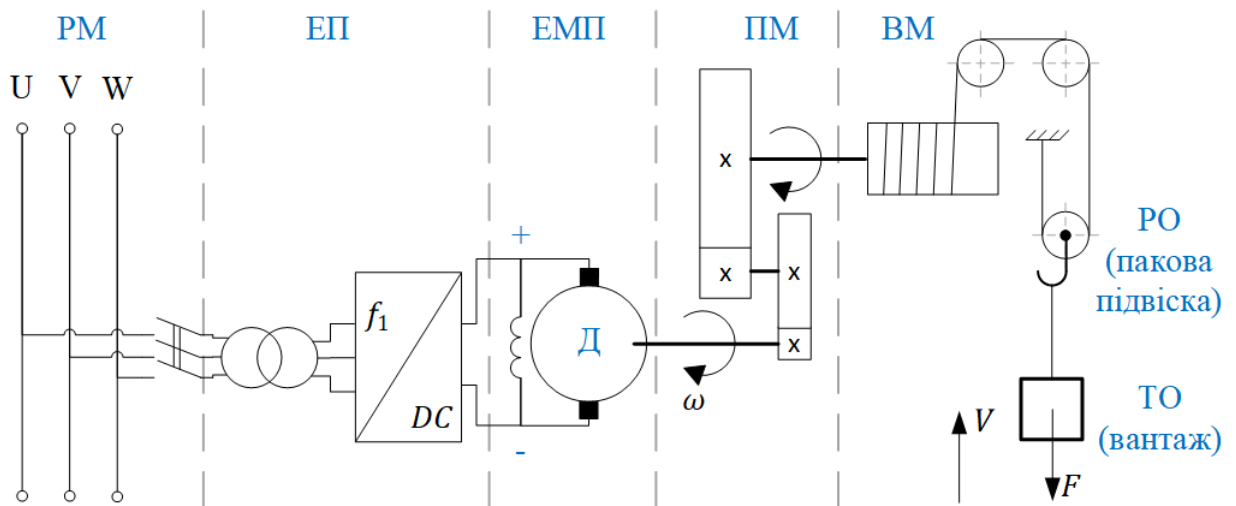


Рис.4.3. Приклад фізичної реалізації силового каналу електропривода підйому

Процес передачі та перетворення енергії в силовому каналі супроводжується її частковими втратами в кожному елементі (ΔW), незалежно від напрямку передачі. В результаті ці втрати енергії перетворюються на теплоту.

Усі елементи силового каналу можуть накопичувати енергію в різних формах, залежно від типу елемента:

- на індуктивностях зберігається енергія магнітного поля;
- на ємностях – енергія електричного поля;
- на пружних елементах і піднятих над землею масах – потенційна механічна енергія;
- на обертових і масах, що рухаються лінійно, – кінетична енергія.

У силових електроприводах найбільшими накопичувачами енергії є механічні елементи. Наприклад, електропривод підйому, показаний на рис. 4.3, використовується в мостовому крані. Розглянемо запаси електромагнітної та кінетичної енергії в його компонентах. Припустимо, що індуктивність якоря двигуна $L_{\text{я}} = 10^{-2}$ Гн, а приведений момент інерції $J' = 2$ кгм². Струм якоря $I_{\text{я}} = 100$ А та частота обертання вала двигуна $\omega = 100 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ відповідають підйому номінального вантажу.

У цьому стані накопичується енергія в індуктивностях:

$$W_L = L_{\text{я}} \frac{I^2}{2} = 0,005 \cdot 10^4 \text{ Дж}; \quad (4.1)$$

а в механічній частині:

$$W_J = J' \frac{\omega^2}{2} = 10^4 \text{ Дж}. \quad (4.2)$$

Тема 1.5. Баланс потужностей потоків енергії силового каналу

Розглянемо баланс енергетичних потоків у силовому каналі електропривода, враховуючи кінетичну енергію рухомих мас, припускаючи, що зміна потенціальної енергії в системі не має місця.

$$P_e = \sum_i J_i \omega_i \frac{d\omega_i}{dt} + \sum_j m_j V_j \frac{dV_j}{dt} + \sum_k \Delta P_k + M\omega + FV, \quad (4.3)$$

де P_e – електрична потужність потоку енергії між джерелом електроенергії та розподільчою мережею; $\sum_i J_i \omega_i \frac{d\omega_i}{dt}$ та $\sum_j m_j V_j \frac{dV_j}{dt}$ – потужності, що виникають в динамічних режимах і зумовлені зміною кінетичної енергії обертових мас або мас, що рухаються лінійно; $\sum_k \Delta P_k$ – загальні втрати потужності, що відбуваються в усіх елементах силового кола; $M\omega$ та FV – потужність механічної енергії, що виникає внаслідок обертального та поступального руху.

Приймаючи умовно позитивним напрямком потоку енергії від джерела до робочого органа, важливо відзначити, що, крім втрат енергії, значення яких завжди позитивні, інші компоненти можуть бути як позитивними, так і негативними. Наприклад, при збільшенні кінетичної енергії механічної частини привода потужність буде позитивною:

$$\frac{dW_J}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{J \cdot \omega^2}{2} \right) = J \cdot \omega \frac{d\omega}{dt} > 0. \quad (4.4)$$

І навпаки, при гальмуванні привода, коли кінетична енергія вивільняється, відповідна складова потужності буде негативною.

Компоненти рівняння можуть поєднувати різні рівні, напрямки енергій і знаки, що, в свою чергу, визначає різноманіття енергетичних станів силового каналу та варіативність його режимів роботи. Для кращого розуміння можна згорнути структурну схему привода з урахуванням рівняння балансу потужностей потоків енергії (рис. 4.4).

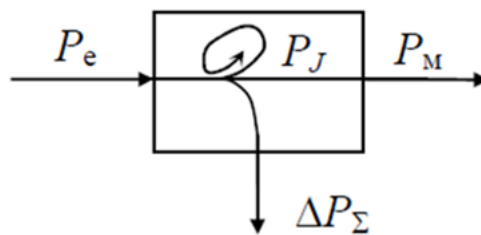


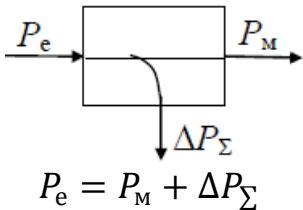
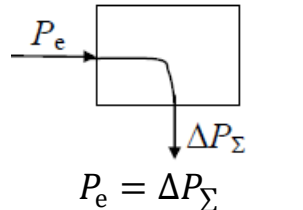
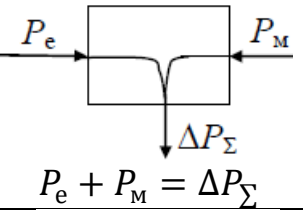
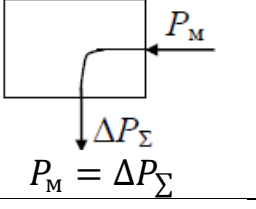
Рис. 4.4. Спрощена схема привода для врахування балансу потужностей потоків енергії

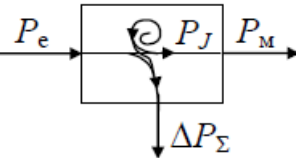
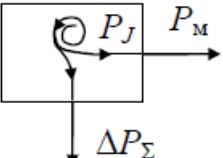
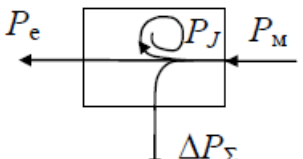
На схемі показані позитивні напрямки потоків потужності: P_e – електрична потужність, P_M – механічна потужність, P_J – потужність, що пов'язана зі зміною запасу кінетичної енергії механічної частини, а ΔP_Σ – сумарна потужність втрат.

Кожна з складових потужності має окреме значення для аналізу енергетичних характеристик електропривода. Так, P_e та $\int P_e dt$ характеризують відповідно витрати потужності та енергії; P_M та $\int P_M dt$ – механічну потужність

і корисну роботу; ΔP_{Σ} та $\int \Delta P_{\Sigma} dt$ – потужність втрат та енергію процесу нагрівання елементів силового каналу. Ці складові дозволяють визначити близько десяти енергетичних станів електропривода. У таблиці 4.1 надані сполучення рівнів і напрямків енергії, що зображені умовною схемою балансу потужностей. Перші шість станів – статичні, а інші п'ять – динамічні режими роботи електропривода.

Таблиця 4.1 – Енергетичний потік електропривода в різних режимах роботи

P_e	P_m	P_j	ΔP_{Σ}	Баланс потужностей	Режим роботи електропривода
+	+	0	+	 $P_e = P_m + \Delta P_{\Sigma}$	Рушійний. Енергія, яка споживається з мережі, за винятком втрат передається механізму.
+	$M = 0$	0	+	 $P_e = \Delta P_{\Sigma}$	Холостий хід. Енергія, яка споживається з мережі, йде на покриття втрат у двигуні, перетворювачі і передачах.
+	$\omega = 0$	0	+	 $P_e = \Delta P_{\Sigma}$	Режим короткого замикання. Двигун підключений до мережі, але вал нерухомий. Енергія, яка споживається з мережі розсіюється в двигуні і перетворювачі.
+	-	0	+	 $P_e + P_m = \Delta P_{\Sigma}$	Противвімкнення. Енергія одночасно надходить від мережі і механізму, розсіюючись у вигляді втрат у перетворювачі, двигуні і передачах.
0	-	0	+	 $P_m = \Delta P_{\Sigma}$	Електродинамічне гальмування. Енергія розсіюється в елементах привода.
-	-	0	+	 $P_m = P_e + \Delta P_{\Sigma}$	Рекуперація. Потужність, що розвивається навантаженням, передається (за винятком втрат у передачах двигуні і перетворювачі) у мережу.

P_e	P_M	P_J	ΔP_Σ	Баланс потужностей	Режим роботи електропривода
+	+	+	+	 $P_e = \Delta P_\Sigma + P_J + P_M$	Рушійний – розгін. Енергія, яка споживається з мережі йде на здійснення корисної роботи, збільшення запасу кінетичної енергії привода і частково втрачається.
+	+	-	+	 $P_e + P_J = P_M + \Delta P_\Sigma$	Рушійний – гальмування. Зниження швидкості. Кінетична енергія, що вивільняється, разом зі споживаною з мережі йде на корисну роботу і покриття втрат.
-	+	-	+	 $P_J = P_e + P_M + \Delta P_\Sigma$	Гальмування (перехідний процес). Енергія, що вивільняється, частково повертається в мережу, йде на корисну роботу і втрачається.
0	+	-	+	 $P_J = \Delta P_\Sigma + P_M$	Гальмування (перехідний процес) при відсутності зв'язку з мережею.
-	-	+	+	 $P_M = P_J + P_e + \Delta P_\Sigma$	Збільшення швидкості за рахунок енергії, що надходить від навантаження, при цьому частина її повертається в мережу.

Тема 1.6. Коефіцієнт корисної дії

Необхідність порівняння ефективності роботи елементів силового каналу виникла через можливість вирішення однієї й тієї ж технічної задачі за допомогою різних пристроїв, що відрізняються конструкцією та принципом роботи. Найбільш поширеним показником ефективності енергоспоживання є коефіцієнт корисної дії (ККД), який відображає економічність перетворення енергії в електроприводі та рівень корисного використання спожитої енергії.

Коефіцієнт корисної дії визначається як співвідношення корисної роботи (енергії), що видобувається на виході пристрою, до енергії, витраченої на його вході:

$$\eta = \frac{W_{\text{кор}}}{W_{\text{вит}}} \quad (4.5)$$

Якщо робота пристрою оцінюється за період часу, протягом якого потужності на виході і вході постійні, то ККД:

$$\eta = \frac{P_{\text{кор}}}{P_{\text{вит}}} \quad (4.6)$$

При змінному характері навантаження за цикл роботи $t_{\text{ц}}$ коефіцієнт корисної дії можна визначити як середнє значення співвідношення корисної потужності до витраченої потужності за весь період циклу:

$$\eta = \frac{\int_0^{t_{\text{ц}}} P_{\text{кор}} dt}{\int_0^{t_{\text{ц}}} P_{\text{кор}} dt + \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P_{\Sigma} dt} \quad (4.7)$$

Для послідовного силового каналу, де вихід попереднього елемента є входом наступного, ККД всього каналу визначається як добуток коефіцієнтів корисної дії кожного окремого елемента каналу:

$$\eta_{\Sigma} = \prod_{i=1}^n \eta_i \quad (4.8)$$

Недостатність використання ККД лише для оцінки ефективності електропривода як перетворювача енергії, без врахування його характеристик як споживача енергії, створює потребу у розробці нових підходів до аналізу процесів енергоспоживання та енерговикористання. Це дозволяє більш точно оцінити взаємодію між різними елементами системи та врахувати всі аспекти енергетичних втрат і ефективності на кожному етапі роботи електропривода.

Тема 1.7. Узагальнений критерій енергетичної ефективності каналу

Для того, щоб оцінити, яка система електропривода є найбільш енергетично ефективною, чи всі елементи силового каналу працюють на оптимальному рівні, наскільки вдало вибраний метод керування, а також як електропривод взаємодіє з джерелом енергії, необхідно застосувати узагальнений критерій енергетичної ефективності. Це дозволить точніше визначити загальну ефективність системи. Для цього силовий канал можна представити у вигляді послідовно з'єднаних елементів (рис. 4.5), що дозволяє зрозуміти, як кожен компонент впливає на загальний енергетичний баланс.

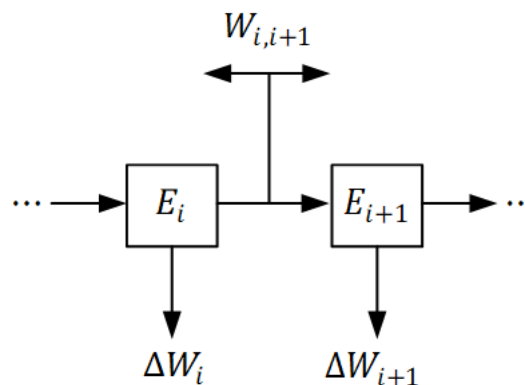


Рис.4.5. Силовий канал електропривода як система послідовно сполучених елементів

Корисна механічна робота, яку виконує електропривод, пов'язана з такими процесами:

- зміною потенціальної енергії технологічного об'єкта;
- зміною кінетичної енергії об'єкта;
- зміною внутрішньої енергії об'єкта;
- зміною геометричних розмірів об'єкта.

Технологія виконання корисної роботи та параметри елементів силового каналу електропривода визначають обсяг енергії $W_{i,i+1}$, якою обмінюються “сусідні” елементи, а також кількість енергії, що втрачається в кожному елементі ΔW_j .

Визнання корисною не лише енергії, переданої від джерела до механізму, що виконує механічну роботу (наприклад, підйом вантажу), але й енергії, що надходить від механізму (наприклад, під час спуску), точне визначення перетину енергетичного каналу (між елементами i та $i + 1$), для якого проводиться оцінка ефективності, а також врахування втрат енергії у кожному елементі каналу і встановлення інтервалу часу, на який поширюється оцінка, дозволяють отримати узагальнений критерій енергетичної ефективності:

$$H = \frac{W_{i,i+1}}{W_{i,i+1} + \sum_j \Delta W_j}, \quad (4.9)$$

де $W_{i,i+1} = \int_{t_1}^{t_1+\tau} |P_{i,i+1}(t)| dt$ – енергія обміну між сусідніми елементами силового каналу за період оцінки визначається відповідно до даного режиму роботи та параметрів каналу, вона характеризує кількість енергії, що передається або змінюється між цими елементами протягом визначеного періоду часу; $|P_{i,i+1}(t)|$ – модуль потужності цього потоку енергії; $\sum_j \Delta W_j = \sum_j \int_{t_1}^{t_1+\tau} \Delta P_j(t) dt$ – сумарні втрати енергії у вибраних j елементах силового каналу; $P_{i,i+1}(t)$ – корисна потужність, що проходить через перетин енергетичного каналу між елементами i та $i + 1$; $\Delta P_j(t)$ – втрати потужності в j -му елементі; t_1, τ – початок і кінець часового інтервалу, в окремому випадку $t_1 = 0$ і τ – час циклу.

Розглянемо, наприклад, узагальнений критерій для статичних режимів роботи двигуна постійного струму з незалежним збудженням (рис. 4.6).

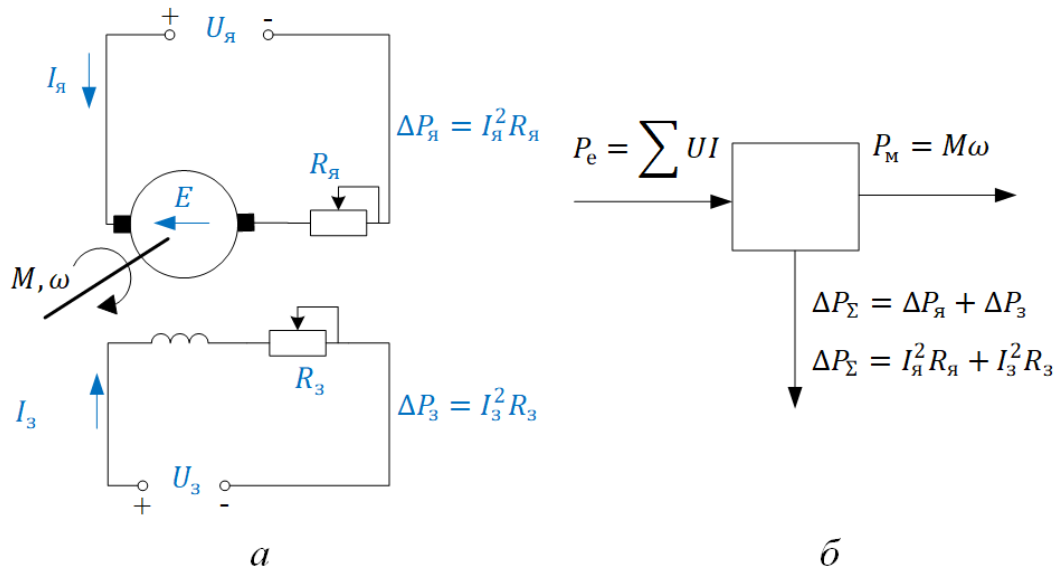


Рис. 4.6. Схема підключення ДПС НЗ (а) та його енергетичні потоки (б)

Розглянемо лише втрати потужності в двигуні, які спричинені тепловим розсіюванням енергії в якірному колі. Баланс потужностей для статичного режиму якірного кола двигуна можна визначити рівнянням:

$$UI = M\omega + I^2 r_{\text{я}}, \quad (4.10)$$

де $UI = P_e$ – електрична потужність на вході двигуна (споживана); $P_M = M\omega$ – механічна; $I^2 r_{\text{я}}$ – втрати в якірному колі.

Енергія, яка споживається в колі збудження, не бере участі в процесі перетворення енергії, а необхідна тільки для підтримки магнітного потоку в машині. Взаємозв'язок між швидкістю і моментом двигуна можна описати наступним чином:

$$\omega = \frac{UI - I^2 r_{\text{я}}}{M}, \quad (4.11)$$

або з урахуванням $M = k\Phi I$, механічна характеристика (рис. 4.7)

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{Mr_{\text{я}}}{(k\Phi)^2}, \quad (4.12)$$

де $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$, $M_{\text{кз}} = k\Phi I_{\text{кз}}$, $I_{\text{кз}} = \frac{U}{r_{\text{я}}}$.

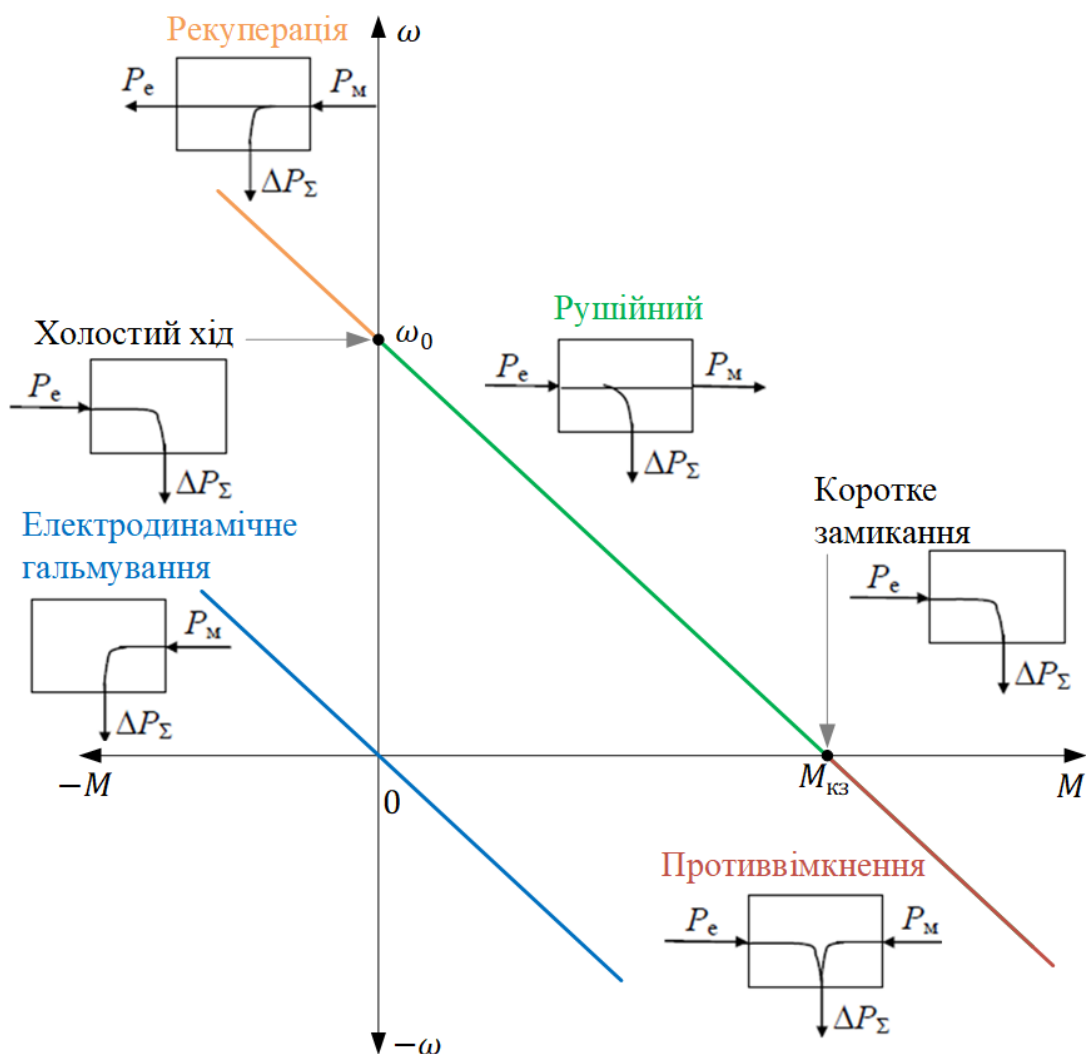


Рис. 4.7. Потоки енергії в ДПС НЗ в різних режимах роботи електропривода на механічній характеристиці

У першому випадку візьмемо $W_{i,i+1}$ як енергію, що надходить на електричний вхід машини:

$$W_{i,i+1} = \int_{t_1}^{t_1+\tau} UI dt, \quad (4.13)$$

в другому – як енергію на механічному вході

$$W_{i,i+1} = \int_{t_1}^{t_1+\tau} M\omega dt. \quad (4.14)$$

Оцінюючи значення узагальненого критерію для статичних режимів, замість енергії $W_{i,i+1}$ підставимо відповідні потужності. В такому випадку потужність втрат у якорі буде визначатися відповідно до розсіювання енергії в ньому:

$$\Delta P_{\Sigma} = I^2 r_{\Sigma} = UI - M\omega = M(\omega_0 - \omega). \quad (4.15)$$

Стосовно електричного і механічного входів одержимо відповідно:

$$H_e = \frac{|UI|}{|UI| + |M(\omega_0 - \omega)|} = \frac{|M\omega_0|}{|M\omega_0| + |M(\omega_0 - \omega)|}; \quad (4.16)$$

$$H_M = \frac{|M\omega|}{|M\omega| + |M(\omega_0 - \omega)|}. \quad (4.17)$$

Залежності $H_e(\omega)$ і $H_M(\omega)$ представлені на рис. 4.8.

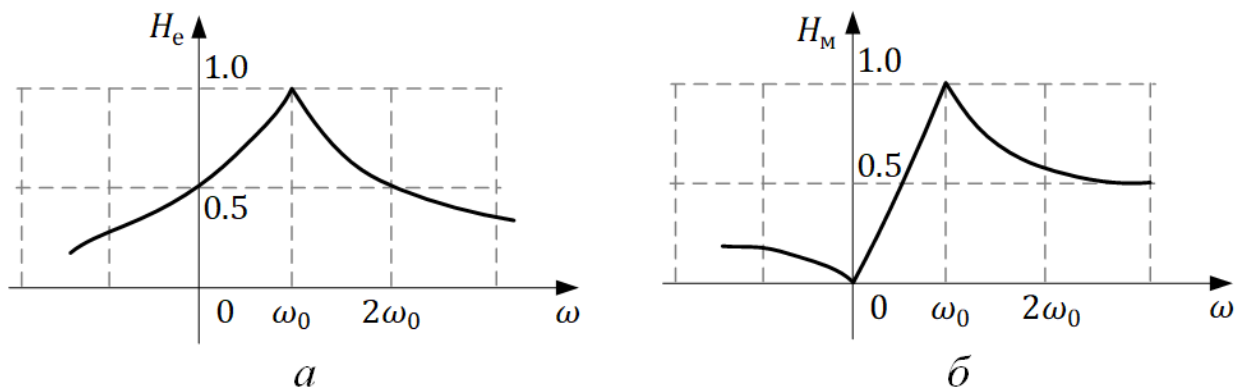


Рис.4.8. Залежності узагальнених критеріїв ефективності від швидкості обертання валу: а – електричного; б – механічного.

Коефіцієнт H_e дає оцінку ефективності двигуна як споживача енергії, в той час як H_M визначає його ефективність як перетворювача енергії. Розглянемо, як ці коефіцієнти змінюються в залежності від різних режимів роботи двигуна.

За прийнятих умов ($\Delta P_e = 0$), у **режимі холостого ходу**, тобто при $\omega = \omega_0$, коефіцієнти H_e і H_M дорівнюють 1, оскільки втрати відсутні.

У **рекуперативному режимі** ($\omega > \omega_0$) обидва коефіцієнти знижуються, причому ефективність машини стосовно мережі (H_e) зменшується швидше, ніж ефективність як перетворювача енергії (H_M).

У **рушійному режимі** ($0 < \omega < \omega_0$) обидва коефіцієнти зменшуються, при цьому H_M знижується швидше, досягаючи значення $H_M = 0$ при $\omega = 0$, а $H_e = 0,5$.

При роботі в режимі **протипротивлення** $\omega < 0$ значення H_M зростає до 0,5, а H_e наближається до нуля.

У режимі **динамічного гальмування** $H_e = 0$ (оскільки двигун не з'єднаний з мережею і $P_e = 0$), а $H_M = 0,5$, оскільки завжди $\Delta P_{я} = P_M$.

З урахуванням постійних втрат, які не залежать від режиму роботи силового каналу, жоден з показників не може досягти значення, рівного одиниці. У будь-якій фізичній реалізації системи втрати є неминучими. Найвищому значенню коефіцієнта H відповідатимуть мінімальні втрати енергії.

$$\Delta W_{\Sigma} = \int_0^T \Delta P_{\Sigma} dt \rightarrow \min, \quad (4.18)$$

де T – час виконання корисної механічної роботи $W_{\text{пол}}$, що визначається необхідною продуктивністю.

Граничним значенням коефіцієнта ефективності $H_{\text{гр}}$ для електропривода із заданими параметрами є його значення при мінімальних можливих втратах $\Delta W'_{\Sigma}$, що відповідають виконанню заданої роботи при постійному значенні $P_{i,i+1} = \text{const}$ і $W_{\text{кор}}/T = P_{\text{кор}} = \text{const}$. Наприклад, для перетину “робочий орган – технологічний об’єкт”:

$$H_{\text{гр}} = \frac{W_{\text{кор}}}{W_{\text{кор}} + \Delta W'_{\Sigma}}. \quad (4.19)$$

Для стимулювання енергозбереження за допомогою критерію ефективності потрібно встановити залежність вартості використаної електроенергії від цього показника. Наприклад, у випадку з двигуном постійного струму, цей підхід передбачає підвищення вартості енергії в режимах холостого ходу.

Контрольні запитання

1. Навести структурну схему енергетичного каналу електроприводу.
2. Які показники якості електричної енергії впливають на роботу електроприводів?
3. Надати визначення повної, активної та реактивної потужності, а також коефіцієнту потужності.
4. Які типи електричних перетворювачів застосовуються в електроприводах?
5. Записати баланс потужностей потоків енергії для силового каналу електроприводу з урахуванням кінетичної енергії мас, що рухаються.
6. Записати рівняння балансу потужностей для рушійного режиму, електродинамічного гальмування, противімкнення та рекуперації.
7. Надати визначення коефіцієнту корисної дії та записати вираз ККД при змінному характері навантаження за цикл роботи.
8. Чому дорівнює ККД системи, яка складається із послідовно з’єднаних елементів?
9. Записати вираз узагальненого критерію енергетичної ефективності системи, що враховує енергії обміну між елементами системи та сумарні втрати.

Рекомендована література

[1] – с. 67-81

Розділ 2. ЕЛЕКТРОПРИВОД З ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Лекція 5. Електропривод з двигунами постійного струму незалежного збудження.

Тема 2.1. Схема підключення, основні рівняння ДПС НЗ

Тема 2.2. Статичні характеристики і режими ДПС НЗ при $U = \text{const}$

Тема 2.3. Характеристики і режими ДПС НЗ при $I = \text{const}$

Тема 2.4. Регулювання координат ДПС НЗ у розімкнутих схемах

Тема 2.1. Схема підключення, основні рівняння ДПС НЗ

На рисунку 5.1 представлена схема двигуна постійного струму незалежного збудження (ДПС НЗ). У його конструкції передбачена нерухома частина (статор), в якій знаходиться обмотка збудження, а також обертовий якір (ротор), що містить якірну обмотку.

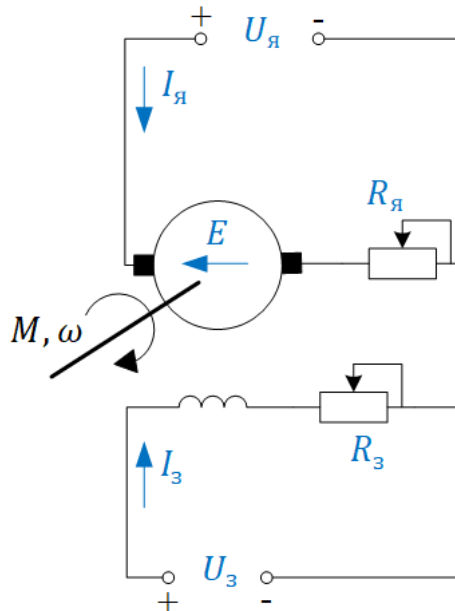


Рис. 5.1. Схема підключення ДПС НЗ

Відповідно до закону Ампера, струм I , що протікає через обмотку якоря, взаємодіє з магнітним потоком Φ , який створюється обмотками на полюсах машини. Це спричиняє появу електромагнітних сил, що діють на активні провідники обмотки, в результаті чого виникає електромагнітний момент:

$$M = k\Phi I, \quad (5.1)$$

де $k = \frac{pN}{2\pi a}$ – конструктивний коефіцієнт машини; N – число провідників у пазу; a – число пар паралельних гілок.

У провідниках обмотки якоря, що обертаються в магнітному полі під впливом моменту M з кутовою швидкістю ω , згідно із законом Фарадея, індукується електрорушійна сила (ЕРС).

$$E = k\Phi\omega, \quad (5.2)$$

спрямована в зворотному напрямі відносно напруги джерела живлення U .

За умови постійного магнітного потоку потокозчеплення визначається конструктивною сталою двигуна:

$$\psi = k\Phi = C_d. \quad (5.3)$$

Згідно з другим законом Кірхгофа, для якірного кола електричної машини виконується рівняння балансу напруг:

$$U = C_d\omega + IR + L\frac{dI}{dt}, \quad (5.4)$$

у статичному режимі це рівняння набуває вигляду:

$$U - E = IR. \quad (5.5)$$

Значення опорів для кола якоря та кола збудження розраховуються за відповідними формулами, що враховують матеріал провідників, їхню геометрію та температуру, яка впливає на зміну електричного опору:

$$\begin{aligned} R_z &= r_z + R_{pz}; \\ R &= R_y + R_p; \end{aligned} \quad (5.6)$$

де $R_y = r_{yd} + r_{zc} + r_{ko} + r_{dp}$ – опір якірного кола, який включає в себе сумарний опір обмотки якоря, щіткового контакту, компенсаційної обмотки та обмотки додаткових полюсів.

ЕРС у процесі енергетичного перетворення, що відбувається в електричній машині, виконує функцію регулювання. Наприклад, якщо електропривод працював у стабільному режимі з моментом $M_1 = M_{c1}$, а потім навантаження зросло до M_{c2} , для досягнення нового рівноважного стану необхідний механізм зміни моменту двигуна відповідно до нових умов. Цю функцію в електричній машині виконує ЕРС: при збільшенні навантаження швидкість двигуна зменшується, що спричиняє зниження ЕРС (за умови, що магнітний потік, напруга живлення та опір якоря залишаються постійними). Струм якоря, що визначається як:

$$I = \frac{U - E}{R} \quad (5.7)$$

збільшиться, що призведе до зростання моменту. Таким чином, двигун автоматично, без необхідності зовнішніх втручань, перейде до нового сталого стану. Ці процеси відбудуться незалежно від величини та знаку статичного моменту.

Для розв'язання практичних завдань ці рівняння необхідно доповнити рівнянням руху, що дозволить визначити значення струму двигуна та його першу похідну:

$$\begin{aligned} I &= I_c + J\frac{1}{C_d}\frac{d\omega}{dt}; \\ \frac{dI}{dt} &= \frac{dI_c}{dt} + J\frac{1}{C_d}\frac{d^2\omega}{dt^2}. \end{aligned} \quad (5.8)$$

Підставивши в рівняння якірного кола двигуна значення струму та його похідної, можна отримати рівняння, що описує динаміку електричного процесу в машині:

$$U = C_d \omega + I_c R + J \frac{R}{C_d} \frac{d\omega}{dt} + L \frac{dI_c}{dt} + LJ \frac{1}{C_d} \frac{d^2\omega}{dt^2}. \quad (5.9)$$

Поділивши обидві частини рівняння на сталу двигуна та винісши всі члени, що містять ω , у ліву частину, отримаємо загальне диференціальне рівняння для двигуна постійного струму з незалежним збудженням:

$$T_m T_j \frac{d^2\omega}{dt^2} + T_m \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U}{C_d} - \frac{I_c R}{C_d} - \frac{R}{C_d} T_j \frac{dI_c}{dt}, \quad (5.10)$$

де $\frac{L}{R} = T_j$ – електромагнітна стала часу якірного кола двигуна;
 $J \frac{R}{C_d^2} = T_m$ – електромеханічна стала часу двигуна.

У ліву частину рівняння входять три величини: швидкість, прискорення та ривок.

Фізичне тлумачення електромеханічної сталої часу T_m полягає в тому, що це період часу, необхідний для розгону двигуна до швидкості ідеального холостого ходу при пусковому моменті, що дорівнює моменту короткого замикання $M_{\Pi} = M_{кз}$, за умови відсутності навантаження на валу, тобто $M_c = 0$. Це характеризує швидкість, з якою двигун може розвивати свою обертальну швидкість, коли не існує зовнішнього навантаження, і визначає його динамічні властивості під час пуску.

Фізичне тлумачення електромагнітної сталої часу T_j полягає в тому, що це період часу, протягом якого струм у контурі з індуктивністю змінюється від нульового значення до сталого значення. Це сталий струм, який встановлюється в результаті взаємодії прикладеної напруги та омичного опору контуру. Тривалість цього процесу залежить від індуктивності контуру та величини активного опору.

Тема 2.2. Статичні характеристики і режими ДПС НЗ при $U = \text{const}$

При живленні від джерела напруги $U = \text{const}$ для двигуна постійного струму з незалежним збудженням (рис. 5.2), рівняння електромеханічної характеристики $\omega(I)$ можна отримати шляхом інтеграції загального диференціального рівняння, яке описує динаміку системи. Це рівняння зв'язує електричні й механічні параметри системи, такі як струм, момент, швидкість обертання, індуктивність, опір і параметри двигуна:

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}. \quad (5.11)$$

При сталому магнітному потоці рівняння електромеханічної характеристики для двигуна постійного струму незалежного збудження має вигляд:

$$\omega = \frac{U}{C_d} - \frac{IR}{C_d}. \quad (5.12)$$

Рівняння механічної характеристики $\omega(M)$ для двигуна постійного струму незалежного збудження можна записати як:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR}{(k\Phi)^2}. \quad (5.13)$$

При заданих значеннях напруги U , магнітного потоку Φ і опору якоря R , рівняння $\omega(I)$ та $\omega(M)$ встановлюють чіткий зв'язок між швидкістю обертання ω , струмом I та механічним моментом M для всіх режимів роботи двигуна. Обидві характеристики – $\omega(I)$ та $\omega(M)$ – є прямими лініями, які проходять через дві ключові точки: при $M = 0$, $\omega = \omega_0$ (швидкість холостого ходу), та при $M = M_{кз}$, $\omega = 0$, (момент короткого замикання, йому відповідає струм короткого замикання $I = I_{кз}$). Якщо магнітний потік Φ залишається постійним, то ці характеристики відрізняються тільки масштабами на осі абсцис.

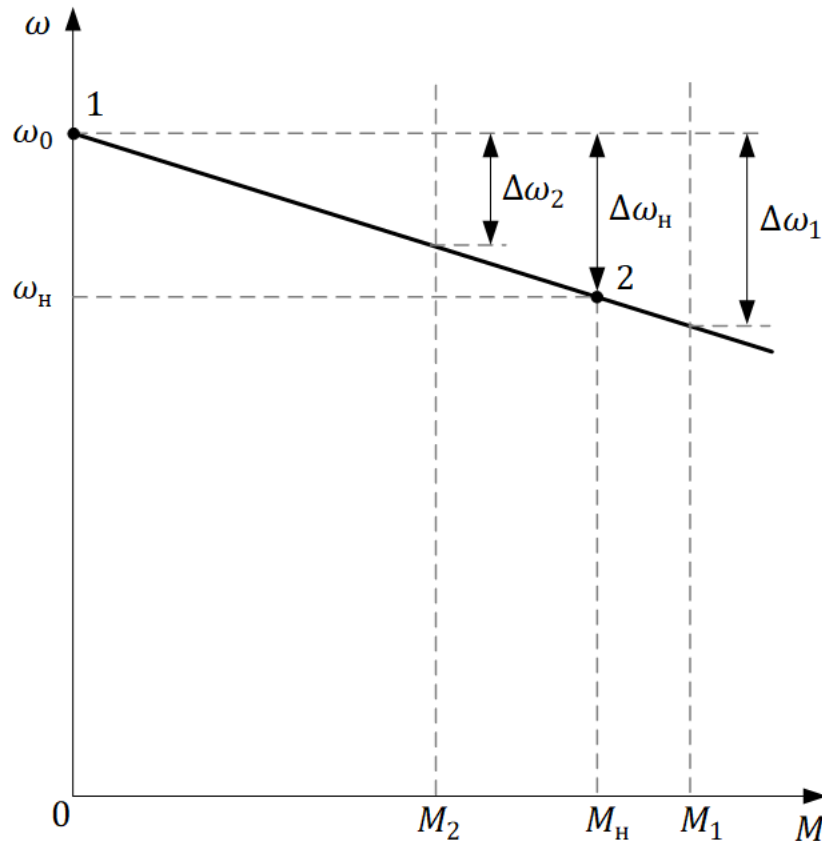


Рис.5.2. Механічна характеристика ДПС НЗ в рушійному режимі

Швидкість $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$ (рис. 5.2, точка 1 – точка холостого ходу) відповідає режиму ідеального холостого ходу, де момент двигуна дорівнює нулю, а електрорушійна сила та напруга дорівнюють одна одній і спрямовані зустрічно. Величина $\Delta\omega = \frac{MR}{(k\Phi)^2}$ – це перепад швидкості під впливом навантаження (рис. 5.2, точка 2 – точка з номінальними параметрами).

Номінальні дані двигуна зазвичай зазначаються в паспорті пристрою. До таких даних для двигунів, призначених для роботи в тривалому режимі, відносяться:

- номінальна напруга $U_n, В$;
- номінальний струм $I_n, А$; потужність на валу $P_n, кВт$;
- частота обертання $n_n, об/хв$, або $\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}, \frac{рад}{с}$;

- коефіцієнт корисної дії η_H ;
- напруга збудження $U_{зн}$, В;
- струм збудження $I_{зн}$, А;
- момент інерції J , кгм²;
- виконання двигуна за класом захисту ІР.

Номинальні дані відповідають одній точці на площині $\omega - M$, де задані припустимі значення всіх основних параметрів для визначеного режиму роботи. Однак на практиці електропривод може працювати в різних точках і не завжди в номінальному режимі. Номинальні дані використовуються для побудови природної характеристики двигуна, яка, в свою чергу, слугує основою для отримання штучних характеристик під час регулювання координат.

В електроприводах із двигунами незалежного збудження всі механічні та електромеханічні характеристики є прямими лініями. Для побудови цих характеристик достатньо двох точок, наприклад, точки ідеального холостого ходу ($M = 0, \omega = \omega_0$) та номінального режиму ($M = M_H, \omega = \omega_H$). Дві з цих координат (M_H і ω_0) визначаються за номінальними даними: $\omega_0 = \frac{U_H}{k\Phi_H}$; $M_H = k\Phi_H I_H$. Для того, щоб визначити знати величину $k\Phi_H$ використаємо рівняння із номінальними величинами:

$$k\Phi_H = \frac{U_H - I_H R_{я}}{\omega_H} \quad (5.14)$$

Номинальну швидкість і швидкість ідеального холостого ходу можна також визначити за допомогою виразів:

$$\begin{aligned} \omega_H &= \frac{U_H}{k\Phi_H} - \frac{M_H R_{я}}{k^2 \Phi_H^2}; \\ \omega_0 &= \omega_H \frac{U_H}{U_H - I_H R_{я}}. \end{aligned} \quad (5.15)$$

Формула для ЕРС, яка відповідає швидкості ідеального холостого ходу на природній характеристиці:

$$E_0 = \omega_0 k\Phi_H = U_H. \quad (5.16)$$

Часто опір якорного кола $R_{я}$, який включає опори обмотки якоря, щіткового контакту та додаткових обмоток, є невідомим. В такому випадку використовується наближена оцінка, заснована на припущенні, що половина номінальних втрат ΔP_H припадає на втрати в міді обмотки, тобто $0,5 \cdot \Delta P_H \approx I_H^2 R_{я}$, звідки:

$$R_{я} \approx \frac{0,5 \cdot \Delta P_H}{I_H^2} = 0,5 \frac{U_H}{I_H} (1 - \eta_H). \quad (5.17)$$

Номинальний опір якоря – це опір у колі двигуна, при якому, за номінальної напруги та нерухомому якорі, струм в обмотці якоря обмежується до номінального значення:

$$R_H = \frac{U_H}{I_H}. \quad (5.18)$$

Номинальний електромагнітний момент M_H , означений як:

$$M_H = k\Phi_H I_H, \quad (5.19)$$

більше, ніж номінальний момент на валу

$$M_{HВ} = \frac{P_H}{\omega_H} \quad (5.20)$$

на величину ΔM , яку слід враховувати при проведенні розрахунків.

Іноді для зручності використовують статичні характеристики в відносних одиницях. Для цього базовими величинами обирають U_H ; I_H ; ω_H ; $k\Phi_H = \frac{U_H}{\omega_0}$ та $R_H = \frac{U_H}{I_H}$. Провівши алгебраїчні перетворення отримаємо:

$$\begin{aligned} \omega^* &= \frac{U^* - I^* R^*}{\Phi^*}; \\ \omega^* &= \frac{U^*}{\Phi^*} - \frac{M^* R^*}{(\Phi^*)^2}. \end{aligned} \quad (5.21)$$

Якщо прийняти, що $U^* \equiv \Phi^* = 1$, можна визначити рівняння механічної характеристики, як

$$\omega^* = 1 - I^* R^*, \quad (5.22)$$

або при номінальному струмі $I^* = 1$ рівняння механічної характеристики набуває вигляду:

$$\omega^* = 1 - R^*. \quad (5.23)$$

Відносний опір якірної обмотки є невеликим $R_{я}^* = 0,02 \dots 0,05$, що пояснює високу жорсткість природної характеристики двигуна з незалежним збудженням – $\beta_{пр} = (-50) \dots (-20)$.

У відносних одиницях при сталому магнітному потоці момент чисельно дорівнює струму, а перепад швидкості відповідає опору при номінальному моменті.

Тепер розглянемо допустимі межі зміни основних координат:

– Напряга обмежується номінальним значенням, а в реверсивних електроприводах допускається тимчасове (на період реверсу) перевищення номінального значення вдвічі.

– Магнітний потік також обмежений номінальним значенням, оскільки тривале перевищення струму збудження може призвести до неприпустимого перегріву обмоток. Хоча короткочасне (до хвилини) дворазове збільшення струму збудження можливе, внаслідок насичення магнітної системи потік змінюється незначно.

– Швидкість двигуна обмежується номінальним значенням, з можливістю перевищення на 20–30% залежно від умов механічної міцності. Спеціальні двигуни, призначені для роботи з ослабленим магнітним полем, можуть витримувати перевищення номінальної швидкості в 3–4 рази.

– Струм якоря є ключовим параметром, що визначає надійність роботи електропривода. У тривалому режимі струм на всіх швидкостях не повинен перевищувати номінальне значення, якщо двигун має незалежне охолодження. У випадку двигунів, охолоджуваних власним вентилятором, струм необхідно знижувати на 30–40% при низьких швидкостях, щоб уникнути перегріву. Короткочасні перевантаження по струму (секунди) обмежуються умовами

комутації машини і зазвичай не перевищують 2–3 номінальних струми. З огляду на це, **неприпустимо здійснювати пуск електропривода постійного струму прямим вмиканням на номінальну напругу.**

– Момент двигуна при максимальному магнітному потоці має ті самі обмеження, що й струм якоря.

Тема 2.3. Характеристики і режими ДПС НЗ при $I = \text{const}$

У деяких застосуваннях якірне коло ДПС незалежного збудження живиться не від джерела напруги, а від джерела струму ($I = \text{const}$), що призводить до радикальних змін у властивостях електропривода. У такому випадку електромеханічні $\omega(I)$ та механічні $\omega(M)$ характеристики двигуна, представлені вертикальними прямими (рис. 5.3).

$$I = \text{const} \rightarrow M = k\Phi = \text{const}. \quad (5.24)$$

Привод набуває нової характеристики, яку називають “джерелом моменту”. Це пояснюється тим, що джерело живлення – джерело струму – усуває вплив ЕРС. Тепер ЕРС більше не виступає як внутрішній регулятор і не має впливу на швидкість. Водночас напруга U стає змінною величиною:

$$U = E + IR = k\Phi\omega + IR \quad (5.25)$$

і характеристика $\omega(U)$ (рис.5.3) визначає енергетичні режими роботи електропривода.

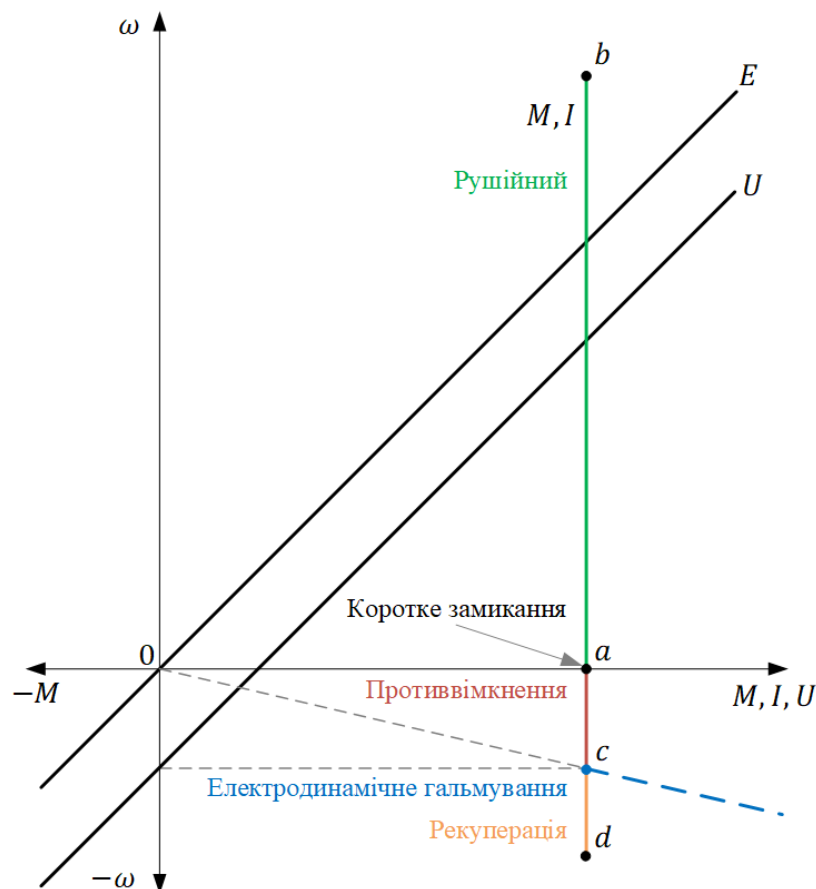


Рис.5.3. Електромеханічна і механічна характеристики ДПС НЗ при $I = \text{const}$

У розглянутій структурі відсутній режим ідеального холостого ходу.

Рушійний режим відповідає ділянці ab у першому квадранті ($M\omega > 0$), що означає, що механічна енергія надходить до технологічної машини, а електрична енергія ($UI > 0$) надходить до двигуна.

У режимі короткого замикання (точка a) $E = 0$, і $U = IR$. На ділянці ac механічна енергія передається від технологічної машини ($M\omega < 0$) і, перетворюючись в електричну, передається в якірне коло. Тут, як і раніше, $IU > 0$ – електрична енергія надходить від джерела струму до якірного кола, що відповідає режиму гальмування противвімкненням.

У точці, де $U = 0$, спостерігається режим динамічного гальмування. Вся механічна енергія, що надходить, розсіюється в опорах якірного кола.

На ділянці cd , коли $M\omega < 0$ та $UI < 0$, відбувається рекуперативне гальмування. При двосторонній провідності джерела струму енергія повертається в мережу. Якщо джерело струму має однобічну провідність, цього режиму не буде, і електропривод працюватиме в режимі динамічного гальмування (рис. 5.3, пунктирна лінія).

Тема 2.4. Регулювання координат ДПС НЗ у розімкнутих схемах

Рівняння механічної характеристики двигуна постійного струму із незалежним збудженням (5.13) показує, що швидкість та/або момент двигуна можна регулювати шляхом зміни трьох основних параметрів:

- напругою, що подається на якір;
- магнітним потоком;
- опором в якірному колі.

У ДПС найефективнішим способом регулювання частоти обертання є **зміна напруги, що подається до якоря двигуна**. Схема електропривода для такого регулювання, як показано на рис. 5.4,а, передбачає використання перетворювача з двосторонньою провідністю. Для реалізації цього способу необхідно застосовувати керований напівпровідниковий перетворювач (КНП), потужність якого повинна перевищувати потужність самого двигуна. З рівнянь (5.12) та (5.13) видно, що при зміні напруги змінюється тільки швидкість холостого ходу, тоді як перепад швидкості $\Delta\omega$ залишається сталим.

Сімейство штучних характеристик при постійному магнітному потоці ($k\Phi = k\Phi_H$) утворюють паралельні прямі, що мають трохи більший нахил, ніж природна характеристика двигуна (рис. 5.4,б), оскільки опір R включає в себе якірний і опір перетворювача ($R = R_{\text{я}} + R_{\text{п}}$). Рівняння характеристик для таких умов має вигляд:

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{k_{\text{п}} U_{\text{к}}}{C_{\text{д}}} - \frac{I(R_{\text{я}} + R_{\text{п}})}{C_{\text{д}}}; \\ \omega &= \frac{k_{\text{п}} U_{\text{к}}}{C_{\text{д}}} - \frac{M(R_{\text{я}} + R_{\text{п}})}{C_{\text{д}}^2};\end{aligned}\tag{5.26}$$

де $k_{\text{п}} = \frac{E_{\text{д}}}{U_{\text{к}}}$ – коефіцієнт передачі перетворювача.

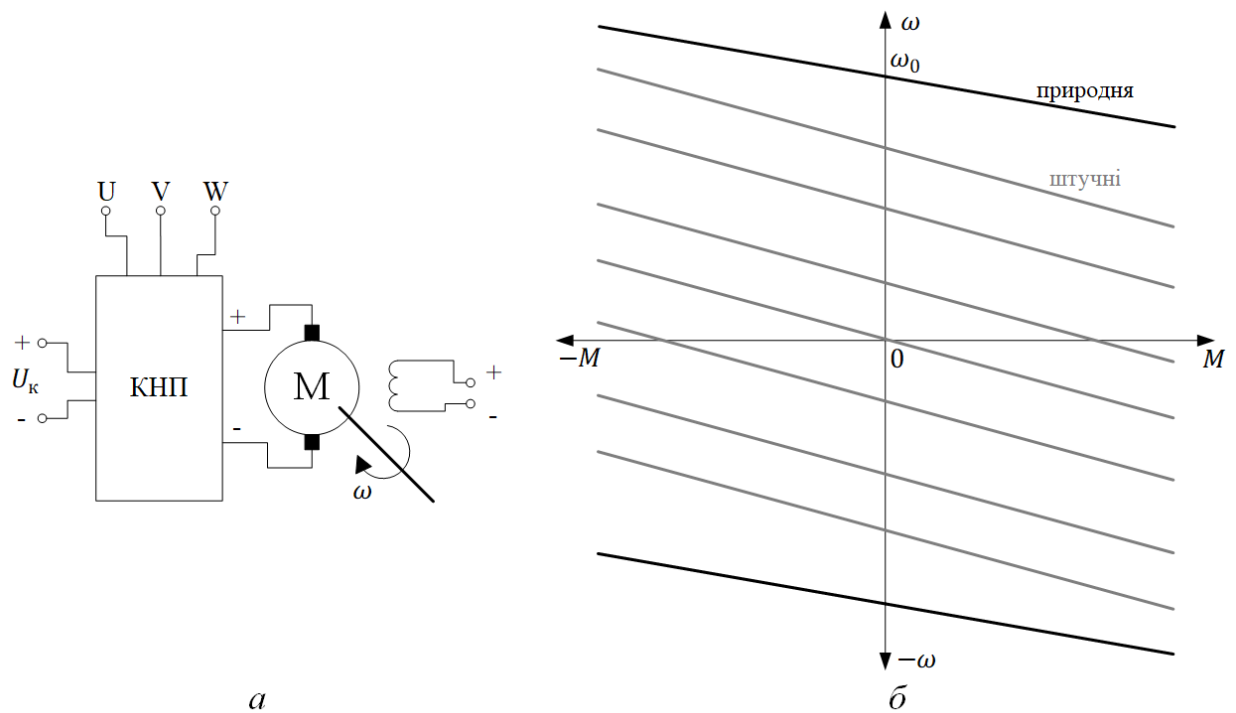


Рис.5.4. Регулювання швидкості обертання ДПС НЗ зміною напруги:
 а – схема підключення; б – механічні характеристики.

Властивості керованих напівпровідникових перетворювачів (КНП) суттєво впливають на вигляд характеристик. Зокрема, при використанні перетворювачів з однобічною провідністю ($I > 0$) характеристики будуть розташовуватися лише в I та IV квадрантах. Регулювання напругою дозволяє досягати великого діапазону швидкостей з постійним моментом і жорсткістю, як у напрямку збільшення, так і зменшення швидкості, переміщаючи характеристики вгору та вниз від природної характеристики. Хоча таке регулювання є економічним, воно вимагає використання КНП.

Схема ввімкнення двигуна для **регулювання швидкості зміною магнітного потоку** (Рис.5.5,а) показує, що якорне коло двигуна підключене до джерела з номінальною напругою $U = U_n$, без додаткових резисторів. Коло збудження живиться від перетворювача збудження (ПЗ), або, в найпростішому варіанті, від того самого джерела через додатковий резистор. Це дозволяє змінювати магнітний потік, що, в свою чергу, впливає на швидкість обертання двигуна.

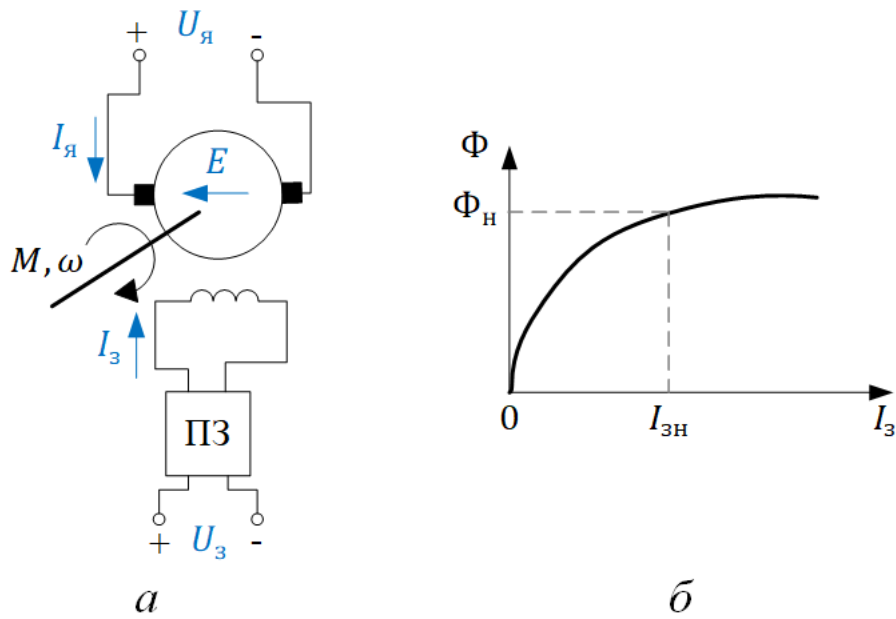


Рис.5.5. Регулювання швидкості обертання ДПС НЗ послабленням магнітного потоку: а – схема підключення; б – усереднена крива намагнічування.

У електричних машинах номінальному струму збудження відповідає магнітний потік, який знаходиться на вигині кривої намагнічування. Типова усереднена крива намагнічування показана на рис. 5.5, б. Оскільки струм збудження $I_{зН}$ визначається допустимим нагріванням обмоток збудження, при регулюванні швидкості в умовах тривалої роботи струм збудження можна регулювати лише в сторону зменшення, щоб уникнути перегрів обмотки збудження.

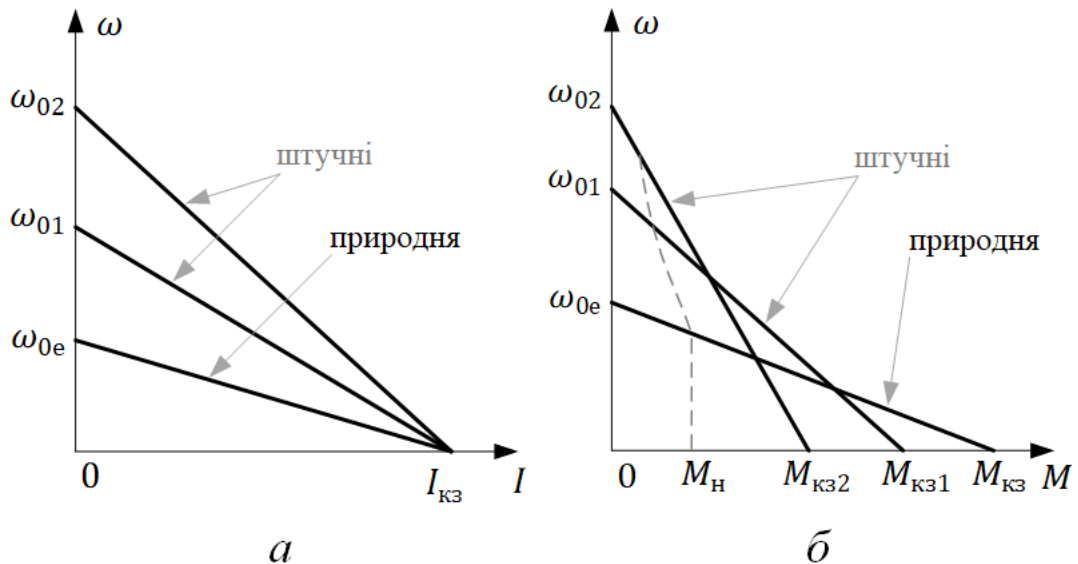


Рис.5.6. Характеристики ДПС НЗ при послабленні магнітного потоку: а – електромеханічні; б – механічні.

На рис. 5.6 показані електромеханічні (а) та механічні (б) характеристики двигуна при ослабленні поля, де неробочі ділянки зображені пунктирними

лініями. Швидкість ідеального холостого ходу $\omega_0 = \frac{U_H}{k\Phi}$ зростає при зменшенні потоку. Оскільки струм короткого замикання не залежить від ступеня ослаблення поля, усі електромеханічні характеристики перетинаються в одній точці $I_{кз} = \frac{U_H}{R_{я}}$. При цьому важливо пам'ятати, що струм короткого замикання може в кілька разів перевищувати допустимий. Момент короткого замикання $M_{кз} = kI_{кз}\Phi$ зменшується при зниженні потоку, що видно на механічній характеристиці (рис. 5.6, б).

Регулювання з постійною потужністю має кілька переваг, серед яких простота та економічність. Однак його недоліками є можливість регулювання лише вгору в обмеженому діапазоні (10...15%), що призводить до розмагнічування магнітної системи електродвигуна та зниження його перевантажувальної здатності.

У випадку, якщо якірне коло живиться від джерела струму, зміна магнітного потоку дозволяє регулювати момент від $-M_H$ до $+M_H$, при цьому механічні характеристики стають вертикальними прямими.

Реостатне регулювання є найпростішим, але водночас найбільш неефективним методом регулювання швидкості. У цьому випадку додаткові реостати вмикаються послідовно в якірне коло, як показано на рис. 5.7, а.

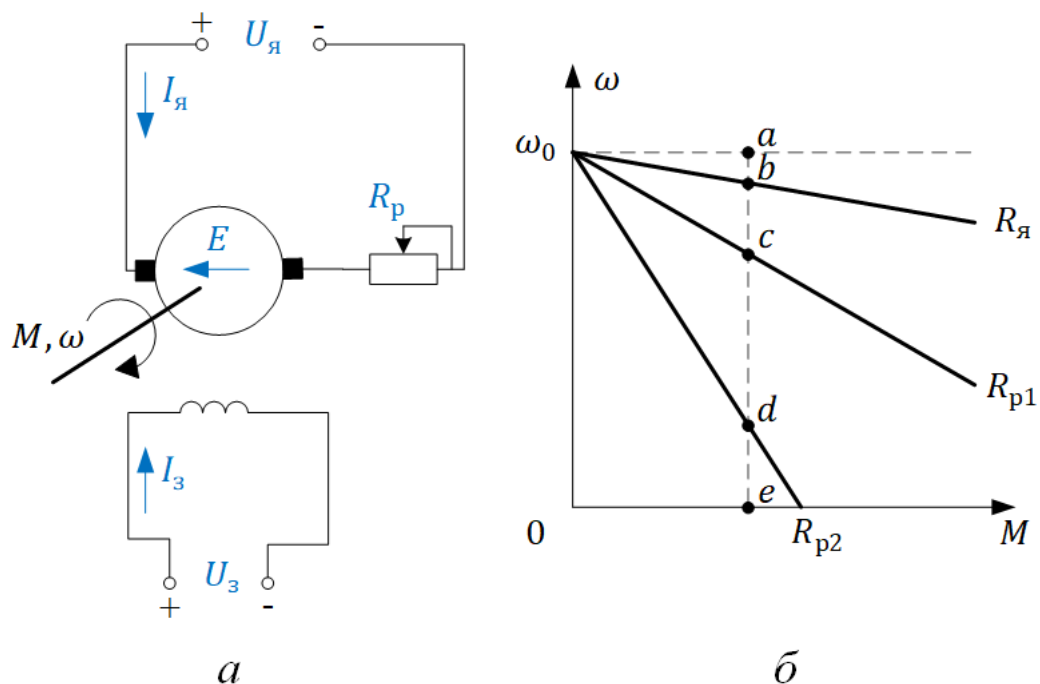


Рис.5.7. Реостатне регулювання ДПС НЗ: а – схема підключення; б – механічні характеристики.

Швидкість ідеального холостого ходу при включенні додаткового опору R_p залишатиметься незмінною, однак нахил характеристик збільшиться пропорційно величині загального опору $R = R_{я} + R_p$. Таким чином, перепад

швидкості, визначений виразом $\Delta\omega = \frac{IR}{k\Phi_H} = \frac{MR}{(k\Phi_H)^2}$, буде збільшуватися, оскільки величина опору зростає. При $I^* = M^* = 1$ отримаємо:

$$\Delta\omega^* = R^*, \quad (5.27)$$

де $\Delta\omega^* = 1 - \omega^*$, $R^* = \frac{R}{R_H} = \frac{RI_H}{U_H}$.

Це співвідношення дозволяє вирішувати як пряме, так і зворотне завдання:

– в прямому завданні можна побудувати механічні характеристики, знаючи значення опору R ,

– в зворотному – визначити опори R та R_d для заданої характеристики (5.28).

Наприклад, на рис. 5.7, б, показано, як зміна опору впливає на механічні характеристики, змінюючи її нахил (перепад швидкості) відповідно до значення опору в колі якоря.

$$\begin{aligned} R_{я} &= R_H \frac{ab}{ae}; \\ R_{p1} &= R_H \frac{bc}{ae}; \\ R_{p2} &= R_H \frac{cd}{ae}; \end{aligned} \quad (5.28)$$

$$R = R_{я} + R_{p1} + R_{p2} = R_H \frac{ad}{ae}.$$

Енергетичні втрати при реостатному регулюванні є значними і залежать від зміни швидкості. Це пояснюється самим методом регулювання, при якому швидкість коригується через підключення резистора, що перетворює електричну енергію в тепло:

$$UI = EI + I^2R, \quad (5.29)$$

де UI – потужність, яку споживає електропривод із мережі; EI – електромагнітна потужність, яка перетворюється на механічну; $I^2R = \Delta P$ – втрати потужності в якірному колі.

Вивівши вирази для напруги U і ЕРС E через магнітний потік і швидкість, отримаємо:

$$\Delta P = k\Phi\omega_0 I - k\Phi\omega I = M\omega_0 - M\omega = M(\omega_0 - \omega) = P_1\Delta\omega^*. \quad (5.30)$$

Вираз (5.30) демонструє, що втрати потужності пропорційні відносному перепаду швидкості.

Контрольні запитання

1. Чому в двигунах постійного струму потрібно подавати живлення як на якірне коло, так і на обмотку збудження?

2. Записати загальне диференціальне рівняння для двигуна постійного струму з незалежним збудженням.

3. У чому полягає сутність електромагнітної та електромеханічної сталих часу двигуна?

4. Навести рівняння механічної характеристики $\omega(M)$ для двигуна постійного струму незалежного збудження.

5. Як для інженерних розрахунків визначається величина номінального опору якоря?

6. Чому неприпустимо здійснювати пуск електропривода постійного струму прямим вмиканням на номінальну напругу?

7. Зміною яких параметрів можна регулювати швидкість обертання валу ДПС НЗ?

8. Навести схему підключення і механічні характеристики при регулюванні швидкості ДПС НЗ зміною напруги якоря.

9. Навести схему підключення і механічні характеристики при регулюванні швидкості ДПС НЗ зміною магнітного потоку.

10. Навести схему підключення і механічні характеристики при регулюванні швидкості ДПС НЗ зміною опору якірного кола.

Рекомендована література

[2] – с. 52-65

Лекція 6. Гальмівні режими двигуна постійного струму з послідовним збудженням. Електропривод з ДПС послідовного збудження. Електропривод з ДПС змішаного збудження.

Тема 2.5. Гальмівні режими ДПС НЗ

Тема 2.6. Електропривод з ДПС послідовного збудження

Тема 2.7. Гальмівні режими ДПС послідовного збудження

Тема 2.8. Електропривод з ДПС змішаного збудження

Тема 2.5. Гальмівні режими ДПС НЗ

Гальмівні режими двигуна постійного струму незалежного збудження поділяються на три основні типи:

- генераторний режим (рекуперація);
- противвмкнення;
- електродинамічне гальмування.

На рисунку 6.1 представлені механічні характеристики двигуна в кожному з цих режимів: а – для рекуперативного гальмування, б – для противвмкнення, в – для електродинамічного гальмування.

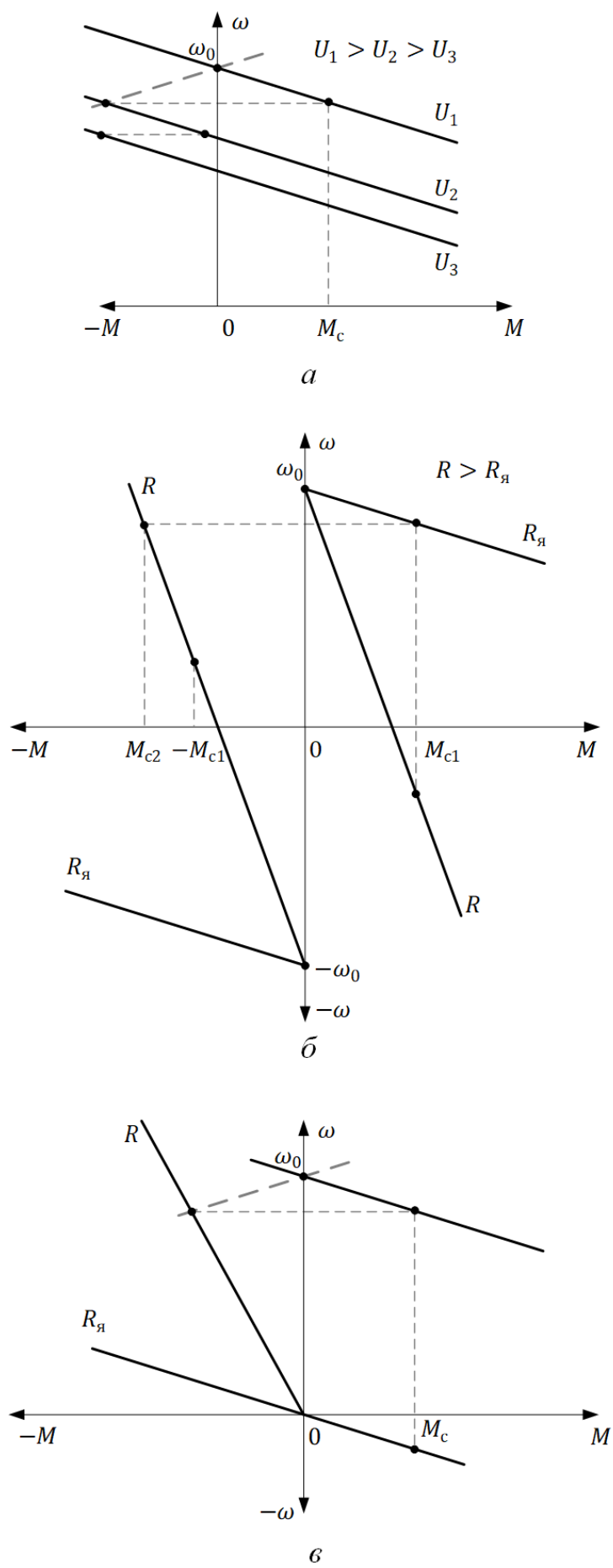


Рис.6.1. Гальмівні режими ДПС НЗ

Умовами виникнення режиму **рекуперації** є:

$$\begin{aligned}\omega &> \omega_0; \\ E &> U.\end{aligned}\tag{6.1}$$

Рівняння електричної рівноваги в режимі рекуперації:

$$EI = UI + I^2R,\tag{6.2}$$

де EI – потужність, що підведена з боку валу, UI – потужність, що повертається в мережу, I^2R – втрати потужності.

У режимі рекуперації електрична машина виконує функцію генератора, перетворюючи механічну енергію робочого механізму на електричну та повертаючи її в мережу з урахуванням втрат. Однак цей режим малоефективний на низьких швидкостях.

У режимі **противвімкнення** двигун обертається у зворотному напрямку під впливом зовнішніх сил, а баланс потужності в цьому випадку визначається відповідним рівнянням:

$$EI + UI = I^2R,\tag{6.3}$$

де UI – потужність, яку споживає двигун з мережі. Основним недоліком режиму противвімкнення є значні втрати потужності.

У режимі **електродинамічного гальмування** двигун відключається від мережі та продовжує обертатися під впливом зовнішніх сил. Для того, щоб ввести ДПС в режим динамічного гальмування, необхідно від'єднати його від мережі живлення і замкнути якірне коло на реостат. При цьому баланс потужності визначається відповідними втратами та перетворенням енергії:

$$EI = I^2R.\tag{6.4}$$

Електродинамічне гальмування втрачає ефективність на малих швидкостях.

Тема 2.6. Електропривод з ДПС послідовного збудження

Двигуни послідовного збудження характеризуються високою міцністю, значною перевантажувальною здатністю та м'якою характеристикою. Їхня схема представлена на рис. 6.2.

Як і для інших двигунів постійного струму, при живленні якоря від джерела напруги ($U = const$) для них залишаються справедливими раніше розглянуті рівняння. Проте, на відміну від двигунів незалежного збудження, де потік не залежить від струму навантаження, у двигунах послідовного збудження потік змінюється разом із струмом навантаження (струмом якоря), що визначається кривою намагнічування (рис.5.5,б у попередній лекції).

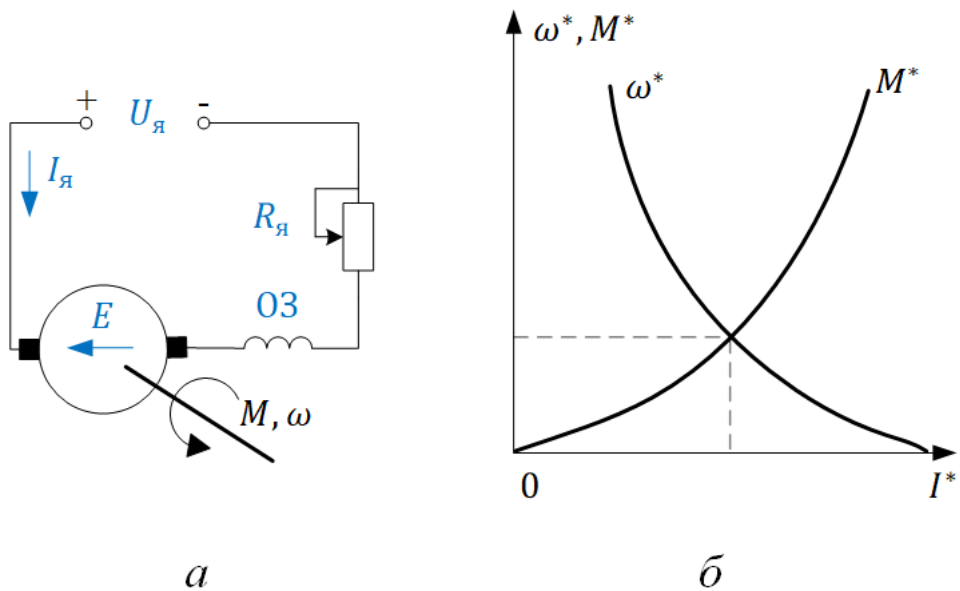


Рис.6.2. ДПС послідовного збудження: а – схема підключення; б – залежності швидкості і моменту від струму збудження.

Рівняння, що описує електромеханічну характеристику двигуна, може бути записане у такій формі:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi(I)} - \frac{IR}{k\Phi(I)}, \quad (6.5)$$

де $\Phi(I)$ – нелінійна функція, що визначається кривою намагнічування; $R = R_{\text{я}} + R_{\text{з}}$ – сумарний опір якірного кола.

Магнітна система двигуна знаходиться у стані насичення, а робоча ділянка кривої намагнічування значно відхиляється від лінійної залежності. Тому на практиці частіше використовують універсальні характеристики для певної серії машин (рис. 6.2,б), які будуються у відносних величинах:

$$\begin{aligned} \omega^* &= \frac{\omega}{\omega_{\text{н}}}; \\ I^* &= \frac{I}{I_{\text{н}}}; \\ M^* &= \frac{M}{M_{\text{н}}}; \\ R_{\text{р}} &= 0. \end{aligned} \quad (6.6)$$

Жорсткість механічної характеристики двигуна послідовного збудження є змінною і зростає зі збільшенням навантаження: $\beta = \frac{dM}{d\omega}$.

Електропривод на основі таких двигунів може працювати в тих самих енергетичних режимах, що й привод з двигунами незалежного збудження, за винятком ідеального холостого ходу та рекуперативного гальмування. При малих навантаженнях магнітний потік зменшується, що призводить до розмагнічування машини та різкого збільшення частоти обертання.

Через механічні втрати в двигуні та залишкове намагнічування полюсів, швидкість двигуна обмежена і не перевищує $(5 \dots 6)\omega_{\text{н}}$. При такій швидкості

двигун може пошкодитися, оскільки не призначений для великих відцентрових навантажень. Тому двигуни послідовного збудження не використовуються в механізмах з холостим ходом або малим навантаженням.

Хоча квадратична залежність моменту від струму якоря в насиченій машині не зберігається, момент залишатиметься пропорційним струму якоря з показником ступеня 1,2...1,4, що є корисним при пусках та перевантаженнях.

На рис. 6.3 показані механічні характеристики двигунів постійного струму послідовного збудження при зміні опору (а) та напруги (б).

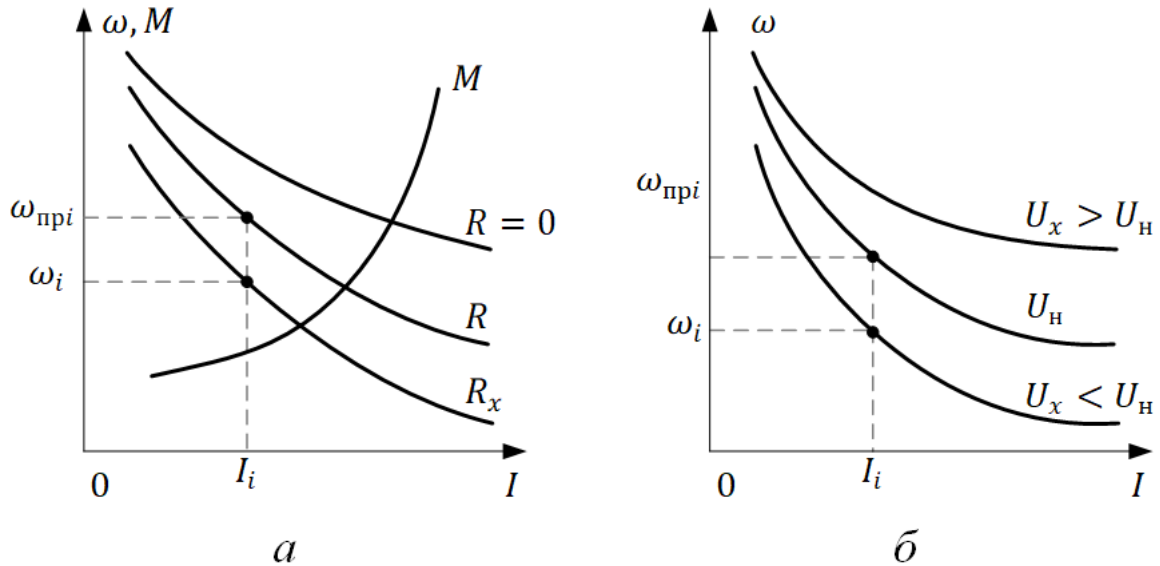


Рис.6.3. Механічні характеристики ДПС послідовного збудження

Існують два методи отримання штучних характеристик: графо-аналітичний та графічний.

Графо-аналітичний спосіб вимагає використання природної характеристики. Рівняння точки на природній характеристиці (рис. 6.3,а) дозволяє описати взаємозв'язок між параметрами системи:

$$\omega_{\text{пр } i} = \frac{U_H - I_i R}{k\Phi_i}. \quad (6.7)$$

Рівняння точки на штучній характеристиці при зміні опору $R_x = R + R_p$:

$$\omega_i = \frac{U_H - I_i R_x}{k\Phi_i}. \quad (6.8)$$

Якщо поділити другу формулу на першу, отримаємо вираз:

$$\omega_i = \omega_{\text{пр } i} \frac{U_H - I_i R_x}{U_H - I_i R}. \quad (6.9)$$

Задавши струм I_i , знаходимо значення $\omega_{\text{пр } i}$ на природній характеристиці, а потім підставляємо це значення в формулу (6.9), щоб визначити ω_i . За отриманими точками можливо побужувати штучну реостатну характеристику. Аналогічно визначаються штучні характеристики при зміні напруги (рис. 6.3, б):

$$\omega_i = \omega_{\text{пр } i} \frac{U_x - I_i R_x}{U_H - I_i R}. \quad (6.10)$$

З виразу для електромеханічної характеристики видно, що існують три основні способи регулювання швидкості двигуна послідовного збудження:

- зміною напруги;
- зміною магнітного потоку;
- зміною опору якірного кола двигуна.

Регулювання напругою може здійснюватися двома методами:

- за допомогою регулятора напруги;
- перемиканням обмоток двигунів.

У першому випадку напруга з мережі подається на регулятор напруги, а потім на двигун. На електричному транспорті та в інших системах часто використовують багатодвигуновий електропривод із двигунами послідовного збудження. У таких системах зміна напруги, підведеної до двигунів, досягається послідовним або паралельним включенням обмоток двигунів. При послідовному з'єднанні кожен двигун отримує половину напруги мережі, що призводить до зниження швидкості вдвічі. Цей метод забезпечує лише ступінчате регулювання швидкості, при цьому перехід з нижчого ступеня на вищий викликає різке збільшення струму (моменту), що є його недоліком.

Регулювання швидкості двигуна **зміною потоку** можна здійснювати трьома способами:

- секціонуванням обмотки збудження;
- поділом обмотки на дві напівобмотки;
- шунтуванням обмотки збудження.

Магнітний потік двигуна визначається намагнічувальною силою. При тому самому струмі можна змінювати кількість витків W , що дозволяє варіювати потік. Перші два способи значно ускладнюють конструкцію двигуна. Схема регулювання швидкості ДПС послідовного збудження за допомогою шунтування обмотки збудження та відповідні електромеханічні характеристики показані на рис. 6.4.

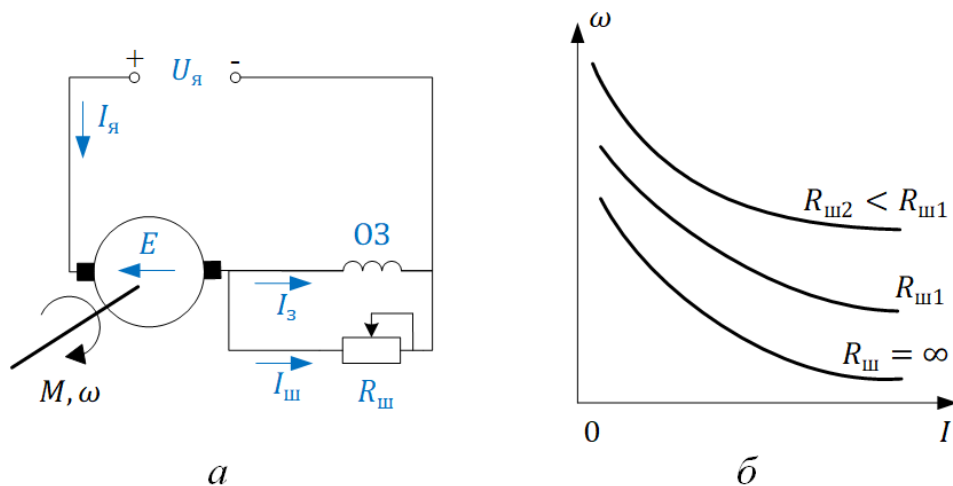


Рис.6.4. Регулювання швидкості ДПС послідовного збудження шунтуванням обмотки збудження: а – схема підключення; б – механічні характеристики

Шунтувальний резистор $R_{ш}$, що ввімкнений паралельно обмотці збудження (ОЗ), дозволяє змінювати струм в обмотці збудження ($I = I_3 - I_{ш}$), а отже й магнітний потік двигуна. Коли $R_{ш} = \infty$, двигун працює за основною схемою з $I = I_3$ на природній характеристиці. При сталому струмі якоря $I = const$, зменшення $R_{ш}$ веде до зниження струму збудження та потоку двигуна, що спричиняє збільшення швидкості. У результаті штучні характеристики розташовуються вище природної. У випадку при $R_{ш} = 0$, струм збудження $I_3 = 0$.

Основним недоліком цього способу регулювання є необхідність вибору шунтувального резистора $R_{ш}$, який має бути розрахований на ту саму потужність, що й двигун.

Регулювання швидкості ДПС послідовного збудження шляхом зміни опору в колі двигуна має свої недоліки:

- діапазон регулювання є обмеженим і залежить від області стабільної роботи;
- потужність втрат, що виділяється на реостаті, визначається діапазоном регулювання швидкості.

Тема 2.7. Гальмівні режими ДПС послідовного збудження

Для двигунів послідовного збудження існують два гальмівні режими:

- противвімкнення;
- електродинамічного гальмування.

У режимі **противвімкнення** вал обертається під впливом зовнішніх сил у напрямку, протилежному своєму ввімкненню. Щоб обмежити струм у колі двигуна, включають додатковий резистор. На рис.6.5 показані електромеханічні характеристики ДПС послідовного збудження для режиму противвімкнення. Цей режим можна застосовувати як для активного, так і для реактивного навантаження, у випадку останнього необхідно виконати реверс шляхом зміни полярності підведеної напруги до якоря.

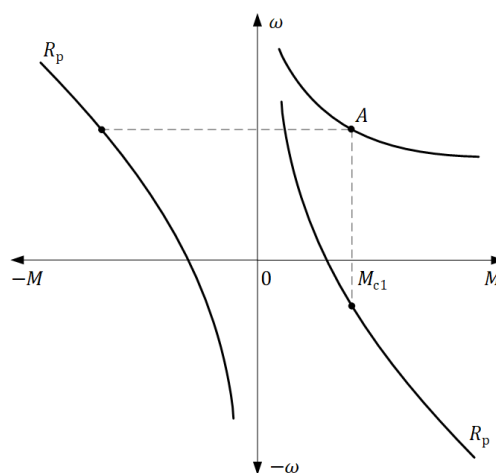


Рис.6.5. Режим противвімкнення ДПС послідовного збудження:
а – схема підключення; б – механічні характеристики

У режимі **електродинамічного гальмування** обмотки двигуна відключають від мережі та замикають на реостат. Залишковий магнетизм у провідниках якоря створює залишкову ЕРС, яка генерує струм у замкнутому колі. Цей струм, протікаючи через обмотку збудження в напрямку, протилежному вихідному (як показано на рис. 6.6,б), розмагнічує машину, внаслідок чого гальмівного моменту не виникає.

Щоб отримати гальмівний момент, струм, створений залишковою ЕРС, повинен протікати в тому самому напрямку, підсилюючи магнітний потік, тобто забезпечуючи самозбудження. Ця умова виконується, якщо під час переходу в режим гальмування перемкнути обмотку збудження, як показано на схемі рис.6.6,в. Струм, що зростає, змінює знак, і момент спрямовується проти руху, ставши гальмівним.

Робота ДПС із самозбудженням можлива лише за певних умов, коли виконано рівняння для швидкості й опору кола якоря $E = IR$.

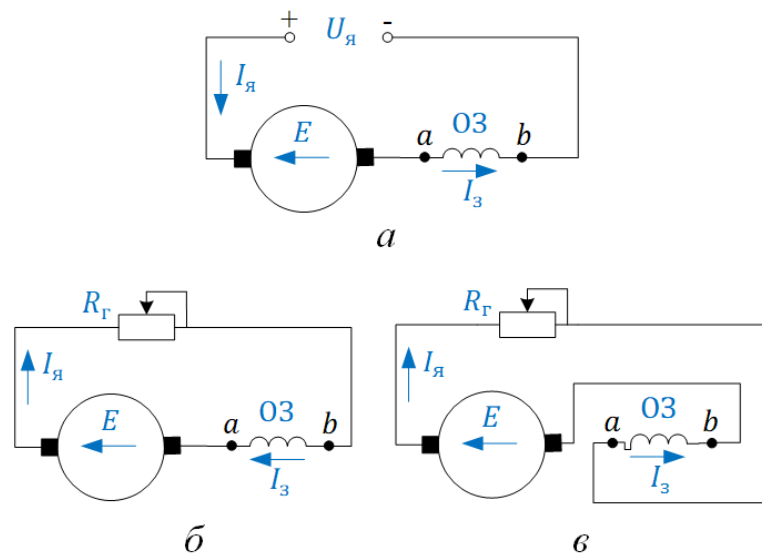


Рис.6.6. Схема підключення ДПС послідовного збудження в режимі електродинамічного гальмування

Існуванню цієї рівності відповідає точка перетину кривих $E = \varphi(I)$ (при даній швидкості) та прямої $IR = f(I)$, як показано на рис.6.7, а. Очевидно, що чим більший опір R , тим на більшій швидкості відбудеться самозбудження машини. Найменша швидкість, при якій машина може самозбуджуватися, буде за умови замкнутого накоротко якорного кола.

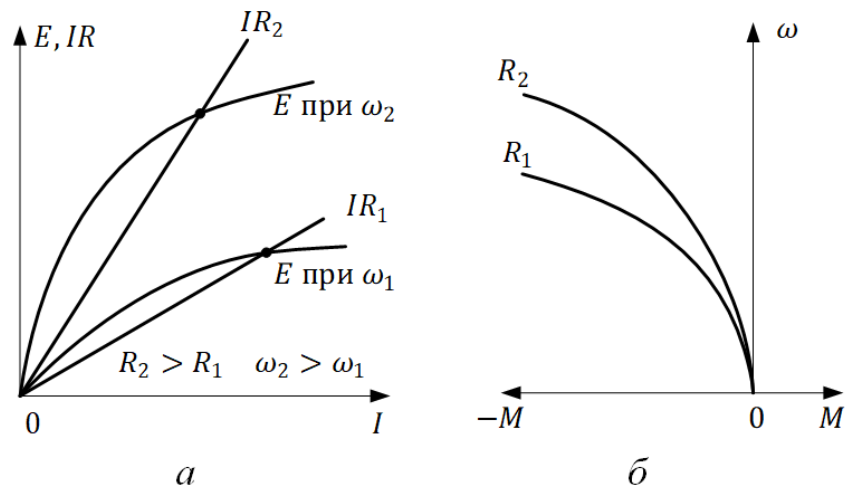


Рис.6.7. Характеристики ДПС послідовного збудження в режимі електродинамічного гальмування

Механічні характеристики в режимі динамічного гальмування при самозбудженні будуються на основі рівняння балансу потужностей. Потужність, що розвивається двигуном у цьому режимі, повністю розсіюється в опорах якірного контуру, тобто:

$$(-I)^2 R = -M\omega, \quad (6.11)$$

звідки

$$\omega = -\frac{I^2 R}{M}. \quad (6.12)$$

Знаючи опір R і задаючи струм I , по універсальній характеристиці визначають відповідний момент M для цього струму, після чого обчислюють швидкість ω . Залежність $\omega(M)$ у гальмівному режимі при самозбудженні показана на рис. 6.7, б.

Тема 2.8. Електропривод з ДПС змішаного збудження

У електроприводах постійного струму іноді застосовуються двигуни змішаного збудження (рис. 6.8, а), що мають дві обмотки збудження: одна з них підключена послідовно до якірного кола (серієсна), а інша має незалежне живлення (шунтова).

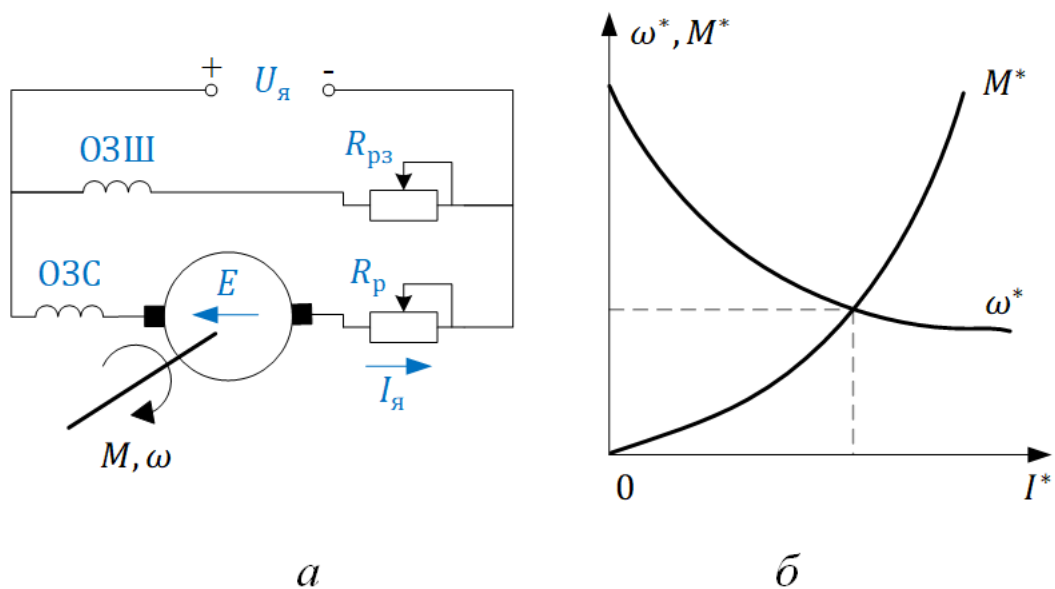


Рис.6.8. ДПС змішаного збудження: а – схема підключення; б – характеристики

Електропривод із двигунами послідовного збудження здатний працювати в тих самих енергетичних режимах, що й привод із двигунами незалежного збудження. Магнітний потік двигуна формується як сума потоків від незалежної та послідовної обмоток. Ампер-витки шунтової обмотки залишаються постійними ($F_{ш} = const$) і не залежать від струму навантаження. Магніторушійна сила серієсної обмотки (F_c) є змінною величиною і визначається струмом навантаження. Якщо струм дорівнює нулю ($I = 0$), то $F_c = 0$. При збільшенні струму, сумарна магніторушійна сила F_{Σ} також зростає.

Характеристики двигунів змішаного збудження мають швидкість ідеального холостого ходу і відзначаються нелінійністю, оскільки магнітний потік залежить від струму навантаження.

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi_{\Sigma}}; \quad (6.13)$$

$$M = k(\Phi_{ш} + \Phi_c)I = k\Phi_{\Sigma}I.$$

З практичної точки зору зазвичай використовуються універсальні характеристики (рис.6.9,а). Нахил характеристики швидкості $\omega(I)$ визначається, зокрема, співвідношенням між витками шунтової та серієсної обмоток. Як правило, при номінальному струмі шунтова обмотка створює 70% магнітного потоку, а серієсна – 30%. Якщо серієсна обмотка має менше витків, то двигун буде недокомпенсований, і його механічна характеристика буде жорсткішою. Якщо витків більше, то машина буде перекомпенсована, що призведе до більшої нелінійності характеристик.

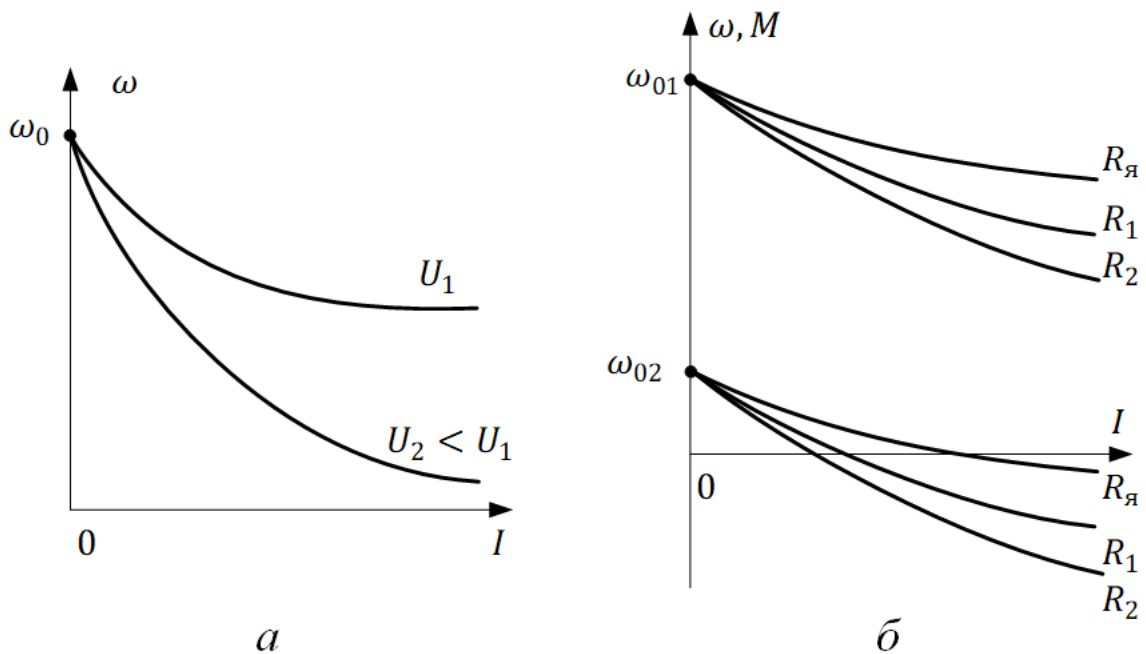


Рис.6.9. Механічні характеристики ДПС змішаного збудження:
 а – при зміні напруги;
 б – при зміні опору в якорному колі

Штучні характеристики двигунів змішаного збудження розраховуються аналогічно характеристикам двигунів послідовного збудження. На рис. 6.9 показані штучні характеристики ДПС змішаного збудження при зміні: а – напруги; б – опору і напруги.

Якщо знизити підведену напругу, наприклад, у два рази, то ω_0 також зменшиться в два рази (при живленні шунтової обмотки від незалежного джерела, як показано на рис. 6.10, а). При живленні обмоток двигуна від двох джерел, зменшення напруги призводить до зменшення ω_0 , але потік при заданому струмі не змінюється, що подібно до роботи двигуна з незалежним збудженням.

При живленні обмоток двигуна від одного джерела зміна напруги не призводить до зміни швидкості ідеального холостого ходу ω_0 , але збільшується перепад швидкості. Внаслідок цього електромеханічна характеристика стає м'якшою (як показано на рис. 6.9, б). У системі, де джерело напруги для шунтуючої та якорної обмоток є одним і тим самим, змінювати підведену напругу недоцільно. У двигуні змішаного збудження магнітний потік, як правило, регулюється за допомогою реостата в шунтовій обмотці. Двигун змішаного збудження підтримує три способи електричного гальмування:

- з віддачею енергії в мережу (рекуперація);
- противвімкнення;
- електродинамічне гальмування.

Однак при переході в гальмівний режим у якорі змінюється напрямок струму.

$$F_{\Sigma} = F_{ш} - F_c \quad (6.14)$$

Щоб уникнути розмагнічуючої дії в режимі рекуперації, у машинах при переході через швидкість холостого ходу ω_0 серієсну обмотку збудження шунтують. Це забезпечує перехід до схеми двигуна незалежного збудження, і його характеристики набувають вигляду прямих. Режими противвімкнення для двигунів змішаного збудження подібні до режимів двигунів послідовного збудження, а режими електродинамічного гальмування – до режимів двигунів незалежного збудження.

Контрольні запитання

1. Які існують гальмівні режими роботи ДПС із незалежним збудженням?
2. Зобразити схему підключення ДПС із послідовною обмоткою збудження.
3. Навести рівняння електромеханічної характеристики ДПС із послідовною обмоткою збудження.
4. Чому ДПС із послідовною обмоткою збудження не слід експлуатувати без навантаження на валу?
5. Які існують способи регулювання координат ДПС із послідовною обмоткою збудження?
6. Які існують гальмівні режими роботи ДПС із послідовною обмоткою збудження?
7. Навести схему підключення ДПС із послідовною обмоткою збудження в режимі електродинамічного гальмування. Чому необхідно змінювати полярність обмотки збудження?
8. Навести схему підключення та механічні характеристики ДПС із змішаним збудженням.
9. Чому для того, щоб перевести ДПС із змішаним збудженням в режим рекуперації необхідно шунтувати серієсну обмотку збудження?

Рекомендована література

[2] – с. 66-78

Лекція 7. Структурна схема ДПС незалежного збудження. Перехідні процеси двигунів з лінійною характеристикою.

Тема 2.9. Структурна схема ДПС незалежного збудження

Тема 2.10. Перехідні процеси двигунів з лінійною характеристикою

Тема 2.9. Структурна схема ДПС незалежного збудження

На рис. 7.1 представлена структурно-логічна схема двигуна постійного струму з незалежним збудженням.

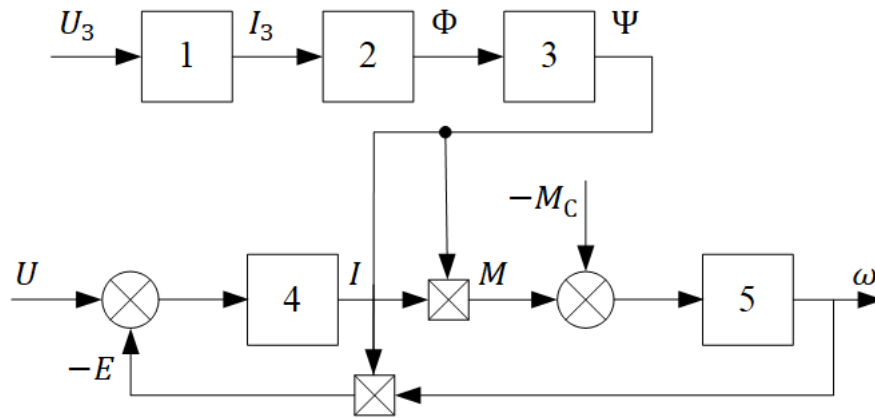


Рис.7.1. Структурна схема ДПС НЗ

Розглянемо передатні функції (ПФ) окремих ланок структурної схеми.

1. Диференціальне рівняння для кола збудження записується у такій формі:

$$U_3 = I_3 R_3 + L_3 \frac{dI_3}{dt}. \quad (7.1)$$

Розділивши обидві частини рівняння на R_3 , отримаємо його запис в операторній формі:

$$T_3 p I_3(p) + I_3(p) = \frac{U_3(p)}{R_3}, \quad (7.2)$$

де $p = \frac{d}{dt}$ – оператор; $T_3 = \frac{L_3}{R_3}$ – електромагнітна стала часу кола збудження.

Передатна функція першої ланки має наступний вигляд:

$$W_1(p) = \frac{I_3(p)}{U_3(p)} = \frac{1}{R_3(T_3 p + 1)}. \quad (7.3)$$

На рис. 7.2,а представлена динамічна характеристика аперіодичної ланки першого порядку.

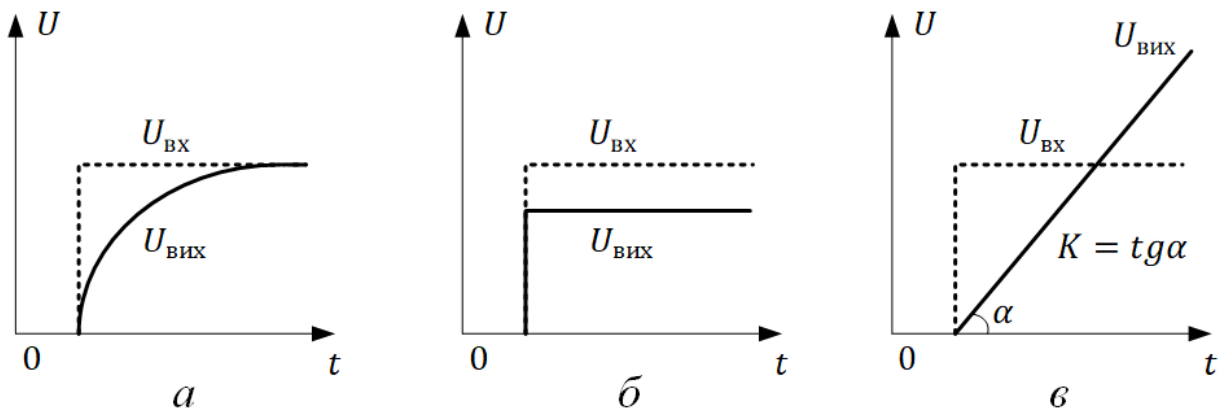


Рис.7.2. Динамічні характеристики типових ланок:
а – аперіодичної; б – пропорційної; в – інтегруючої

2. Взаємозв'язок між струмом збудження та магнітним потоком визначається кривою намагнічування двигуна. При струмах, що не перевищують номінального значення, магнітний потік змінюється пропорційно до струму збудження:

$$\Phi(p) = k_3 I_3(p), \quad (7.4)$$

де k_3 – коефіцієнт збудження двигуна.

Передаточна функція другої ланки має вигляд?

$$W_2(p) = k_3 = \frac{\Phi(p)}{I_3(p)}. \quad (7.5)$$

Графічне представлення динамічної характеристики пропорційної ланки наведено на рис. 7.2,б.

3. Взаємозв'язок між потоком і потокозчепленням описується відповідним математичним виразом:

$$\psi = \frac{pN\Phi}{2\pi a} = k\Phi. \quad (7.6)$$

Передаточна функція третьої ланки має вигляд:

$$W_3(p) = \frac{\psi(p)}{\Phi(p)} = k. \quad (7.7)$$

4. Диференціальне рівняння, що описує якірне коло двигуна, можна подати у такій формі.

$$U = IR + L \frac{dI}{dt} + \psi\omega. \quad (7.8)$$

Розділимо обидві частини рівняння на R і виразимо його в операторній формі:

$$(T_{\text{я}}p + 1)I(p) = \frac{U(p) - \psi\omega(p)}{R}. \quad (7.9)$$

Визначимо передаточну функцію четвертої ланки:

$$W_4(p) = \frac{I(p)}{U(p) - \psi\omega(p)} = \frac{1}{R(T_{\text{я}}p + 1)}. \quad (7.10)$$

5. Рівняння руху електропривода в операторній формі можна записати таким чином:

$$M(p) - M_c(p) = Jp\omega(p). \quad (7.11)$$

Передаточна функція п'ятої ланки:

$$W_5(p) = \frac{\omega(p)}{M(p) - M_c(p)} = \frac{1}{Jp}, \quad (7.12)$$

де $M = k\Phi I = \psi I$.

Інтегруюча ланка представлена характеристикою, показаною на рис. 7.2,в. Структурно-логічна схема ДПС з передавальними функціями ланок представлена на рис. 7.3.

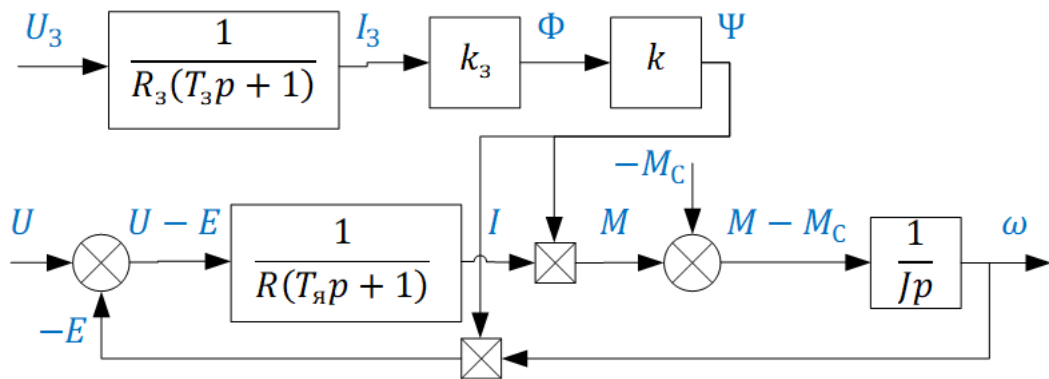


Рис.7.3. Структурна схема ДПС НЗ з передаточними функціями ланок

При сталому потоці збудження ($\Phi = const$) потік зчеплення залишається сталою величиною, що дорівнює постійній для двигуна, тобто $\psi = k\Phi = C_d$. Структурні схеми ДПС представлені на рис. 7.4.

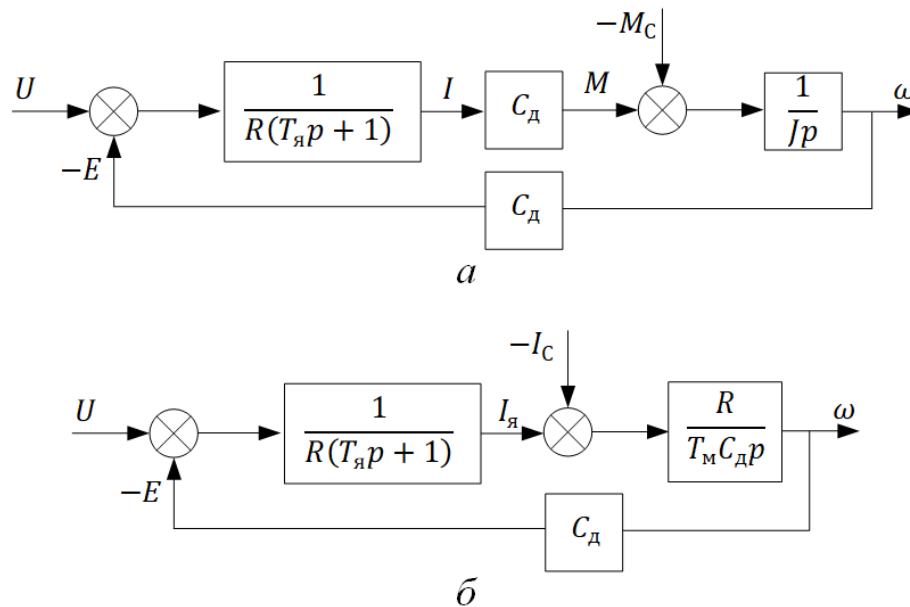


Рис.7.4. Структурні схеми ДПС НЗ а – із врахуванням моменту навантаження; б – із врахуванням струму навантаження

Тема 2.10. Перехідні процеси двигунів з лінійною характеристикою

Під час експлуатації електропривода відбуваються перехідні процеси:

- **механічні**, які пов'язані зі зміною кінетичної та потенційної енергії системи, вони характеризуються механічною сталою часу, що зазвичай становить $T_m = 0,1 \dots 10$ с;

- **електромагнітні** перехідні процеси виникають при зміні електромагнітної енергії системи і характеризуються сталою часу $T_\alpha = 0,01 \dots 0,1$ с;

- **електромеханічні** перехідні процеси, що поєднують вплив механічних і електромагнітних процесів ($T_m; T_\alpha$);

– **теплові** процеси, що зумовлені зміною запасу теплової енергії і викликають зміну активного опору обмоток, впливаючи на електромеханічні процеси, однак відбуваються набагато повільніше, з сталою часу $T_H = 10^3$ с.

Із загального диференціального рівняння для ДПС при сталому струмі збудження $I_c = const$, а також при рівності $\frac{U}{C_d} = \omega_0$, отримаємо вираз:

$$T_M T_J \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_c, \quad (7.13)$$

де $\omega_0 - \Delta\omega_c = \omega_c$.

2.10.1. Механічні перехідні процеси

При аналізі механічних перехідних процесів враховують тільки механічну інерційність системи, оскільки механічна стала часу значно більша за електромагнітну сталу часу $T_M \gg T_J$. Тому можна знехтувати впливом T_J , що дозволяє спростити рівняння для опису процесів:

$$T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_c. \quad (7.14)$$

Розв'язок рівняння (7.14):

$$\omega = \omega_{уст} + A e^{-\frac{t}{T_M}}, \quad (7.15)$$

де $\omega_{уст} = \omega_c$; $T_M p + 1 = 0$.

Стала інтегрування A визначається з початкових умов перехідного процесу. В загальному випадку, при $t = 0$, $\omega = \omega_{поч}$, початкове значення сталої $A = \omega_{поч} - \omega_{уст}$ дає вигляд рішення диференційного рівняння (рис. 7.5, а):

$$\omega = \omega_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}\right) + \omega_{поч} e^{-\frac{t}{T_M}}. \quad (7.16)$$

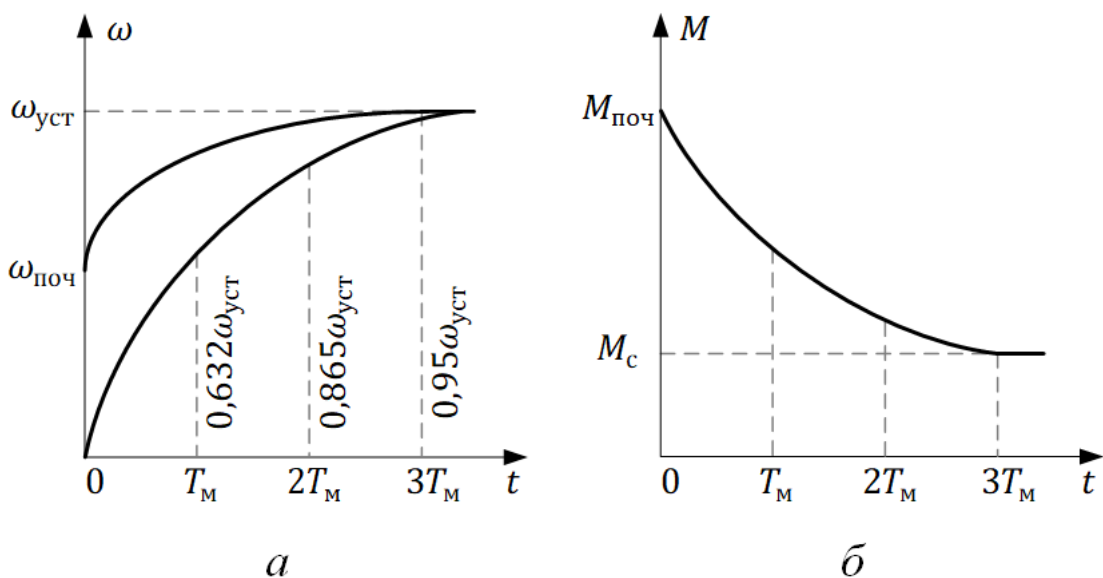


Рис.7.5. Динамічні характеристики ДПС: а – залежність кутової швидкості від часу; б – моменту від часу перехідного процесу

У випадку, при $\omega_{\text{поч}} = 0$, отримаємо:

$$\omega = \omega_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right). \quad (7.17)$$

Якщо в рівняння підставити час t у частках від T_M , то можна скласти таблицю з розрахунковими даними для побудови динамічних характеристик ДПС (табл.7.1).

Таблиця 7.1 – Розрахункові дані для побудови динамічних характеристик ДПС

t	0	T_M	$2T_M$	$3T_M$	$4T_M$	$5T_M$
$e^{-\frac{t}{T_M}}$	1,0	0,368	0,135	0,0498	0,0183	0,00674
$1 - e^{-\frac{t}{T_M}}$	0	0,632	0,865	0,95	0,983	0,984

З цих даних видно, що при часі $t = 3T_M$ швидкість обертання двигуна відрізняється від усталеного значення на 5%, а при $t = 4T_M$ – на 2%. Тому перехідний процес вважається завершеним при $t = (3 \dots 4)T_M$.

Аналогічно зміна моменту й струму в часі (рис. 7.5, б) визначається відповідним виразом:

$$M = M_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) + M_{\text{поч}} e^{-\frac{t}{T_M}}; \quad (7.18)$$

$$I = I_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) + I_{\text{поч}} e^{-\frac{t}{T_M}}.$$

Для визначення T_M необхідно знати наведений момент інерції J . Його можна знайти експериментально за допомогою режиму вільного вибігу. До відімкнення двигун працював у статичному режимі з моментом $M_c = \frac{P_c}{\omega_{\text{поч}}} = \frac{UI}{\omega_n}$. Після вимикання двигуна, якщо припустити, що момент на валу $M_c = \text{const}$, поведінка електропривода описується рівнянням:

$$J \frac{d\omega}{dt} = -M_c. \quad (7.19)$$

Якщо виміряти час до повної зупинки обертання валу двигуна, можна розрахувати момент інерції за виразом:

$$J = M_c \frac{t}{\omega_{\text{поч}}}. \quad (7.20)$$

2.10.2. Електромагнітні перехідні процеси

Електромагнітні перехідні процеси виникають через зміну запасу електромагнітної енергії в електричних машинах, що пропорційно залежить від індуктивності їх кіл та квадрату струму, який протікає через них. Тривалість цього процесу визначається індуктивністю обмоток.

Якщо до затискачів обмотки, яка має індуктивність L_3 та омичний опір R_3 , прикласти постійну напругу U_3 , то рівняння для електрорушійної сили (ЕРС) в колі обмотки збудження ДПС можна записати наступним чином:

$$L_3 = \frac{dI_3}{dt} + R_3 I_3 = U_3 . \quad (7.21)$$

Поділивши праву й ліву частини рівняння на R_3 , одержимо диференціальне рівняння першого порядку:

$$T_3 \frac{dI_3}{dt} + I_3 = I_{3\text{уст}} , \quad (7.22)$$

де $I_{3\text{уст}} = \frac{U_3}{R_3}$; $T_3 p + 1 = 0$.

Розв'язок диференціального рівняння для загального випадку, коли при $t = 0$ початкове значення струму $I = I_{\text{поч}}$:

$$I_3 = I_{3\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_3}} \right) + I_{3\text{поч}} e^{-\frac{t}{T_3}} . \quad (7.23)$$

Тривалість перехідного процесу сягає $(3 \dots 4)T_3$, див. рис.7.6.

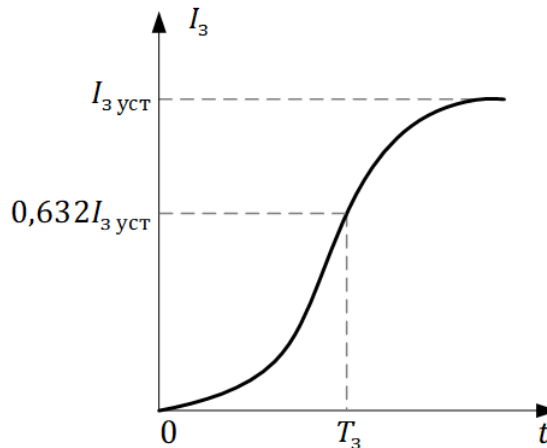


Рис.7.6. Залежність струму збудження від часу при перехідному процесі

Значення сталої збудження для електроприводів постійного струму в залежності від потужності наведені в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Залежність сталої часу збудження від потужності двигуна

P , кВт	T_3 , с
1 ... 100	0,1 ... 1
100 ... 1000	1 ... 2
1000 ... 3000	2 ... 4

Тривалість наростання струму може бути значною, становлячи $(3 \dots 4)T_3$, що знижує швидкість системи. Для скорочення часу перехідного процесу використовують форсування збудження, застосовуючи різні методи для прискорення наростання струму збудження.

2.10.3. Електромеханічні перехідні процеси

Розв'язок загального диференціального рівняння

$$T_M T_J \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U}{C_d} - \frac{I_c R}{C_d} - \frac{R}{C_d} T_J \frac{dI_c}{dt} \quad (7.24)$$

залежить від коренів його характеристичного рівняння

$$T_M T_J p^2 + T_M p + 1 = 0, \quad (7.25)$$

які розраховуються за виразом:

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2T_J} \left(1 \mp \sqrt{1 - 4 \frac{T_J}{T_M}} \right). \quad (7.26)$$

Залежно від співвідношення сталих часу, корені характеристичного рівняння, а отже, і характер протікання перехідного процесу, можуть змінюватися.

1. Якщо $T_M > 4T_J$, то корені будуть дійсними та від'ємними:

$$p_1 = -\frac{1}{2T_J} \left(1 - \sqrt{1 - 4 \frac{T_J}{T_M}} \right) = -\frac{1}{T_1}; \quad |p_1| < |p_2|; \quad (7.27)$$

$$p_2 = -\frac{1}{2T_J} \left(1 + \sqrt{1 - 4 \frac{T_J}{T_M}} \right) = -\frac{1}{T_2}; \quad T_1 > T_2;$$

де T_1, T_2 – фіктивні сталі часу.

Повне розв'язання рівняння в цьому випадку може бути представлено як:

$$\omega = A_1 e^{-\frac{t}{T_1}} + A_2 e^{-\frac{t}{T_2}} + \omega_c, \quad (7.28)$$

де A_1, A_2 – сталі інтегрування.

Диференціюючи вираз для швидкості за часом, можна знайти закон зміни прискорення, що описує динаміку змін швидкості в процесі:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{A_1}{T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{A_2}{T_2} e^{-\frac{t}{T_2}}. \quad (7.29)$$

Струм якоря можна отримати з рівняння руху електропривода?

$$I = I_c + J \frac{1}{C_d} \frac{d\omega}{dt}. \quad (7.30)$$

Підставивши вираз для прискорення в рівняння руху електропривода, можна визначити закон зміни струму якоря:

$$I = I_c + J \frac{1}{C_d} \left(\frac{A_1}{T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{A_2}{T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right). \quad (7.31)$$

У загальному випадку початкові умови процесу при $t = 0$ для електропривода наступні $\omega = \omega_{\text{поч}}$ і $\frac{d\omega}{dt} = \dot{\omega} = \dot{\omega}_{\text{поч}}$.

Підставляючи початкові умови у відповідні вирази, отримаємо:

$$\omega_{\text{поч}} = A_1 + A_2 + \omega_c;$$

$$\dot{\omega}_{\text{поч}} = -\frac{A_1}{T_1} - \frac{A_2}{T_2}. \quad (7.32)$$

Коефіцієнти A_1 та A_2 можна визначити за виразом:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{(\omega_{\text{поч}} - \omega_c)T_1 + \omega_{\text{поч}}T_1T_2}{T_1 - T_2}; \\ A_2 &= \frac{(\omega_{\text{поч}} - \omega_c)T_2 + \omega_{\text{поч}}T_1T_2}{T_1 - T_2}. \end{aligned} \quad (7.33)$$

Початкові значення швидкості та струму, а також їх сталі величини, визначаються за допомогою статичних характеристик системи. Під час пуску вхолосту можна прийняти, що початкові значення як струму, так і швидкості дорівнюють нулю. У випадку пуску під навантаженням швидкість на початку $\omega_{\text{поч}} = 0$ буде дорівнювати нулю, а струм $I_{\text{поч}} = I_c$ – номінальному струму збудження.

Зміна швидкості й струму в часі при пуску вхолосту ілюструється на графіках, зокрема на рисунку 7.7,а, перехідний процес **апериодичний**.

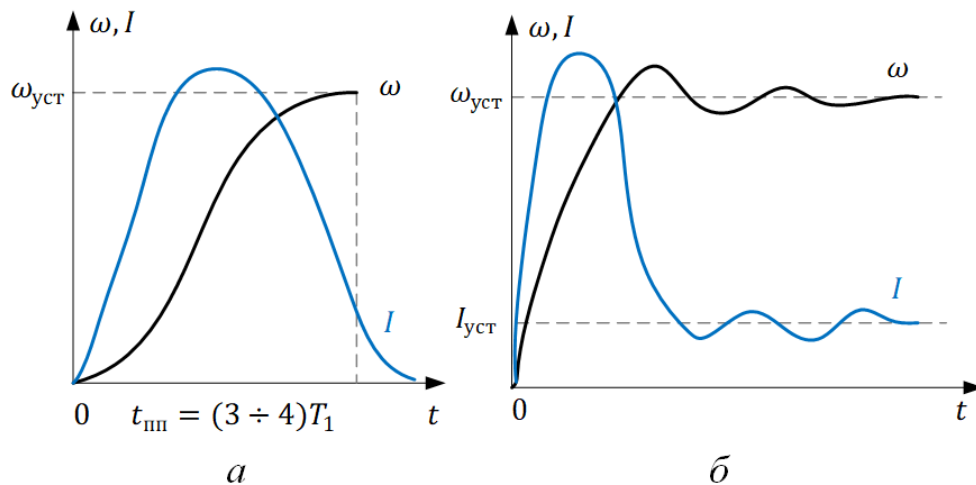


Рис.7.7. Графіки зміни швидкості та струму в часі:
а – пуск вхолосту $T_m > 4T_{я}$; б – із навантаженням $T_m < 4T_{я}$

Тривалість перехідного процесу залежить від більшої з двох сталих часу.

2. За умови $T_m = 4T_{я}$ корені характеристичного рівняння будуть кратними та рівними:

$$p_1 = p_2 = -\frac{1}{2T_{я}} = \frac{-1}{T}. \quad (7.34)$$

Рішення диференціального рівняння буде мати вигляд:

$$\omega = (A_1 + A_2 t)e^{-\frac{t}{T}} + \omega_c. \quad (7.35)$$

Коефіцієнти A_1 та A_2 визначаються за аналогією з першим випадком. Перехідні процеси мають **апериодичний** характер, і їх **тривалість $t_{\text{пп}} = (3 \dots 4)T$ є меншою**, ніж у першому випадку (при $T < T_1$).

3. При $T_m < 4T_{я}$ корені стають комплексними і рівними:

$$\begin{aligned} p_1 &= -\alpha + jq; \\ p_2 &= -\alpha - jq; \end{aligned} \quad (7.36)$$

$$q = \frac{1}{2T_{\text{я}}} \sqrt{4 \frac{T_{\text{я}}}{T_{\text{м}}} - 1} = \frac{1}{T} \sqrt{4 \frac{T_{\text{я}}}{T_{\text{м}}} - 1};$$

де $\alpha = \frac{1}{2T_{\text{я}}} = \frac{1}{T}$.

Перехідний процес буде **коливальним** з частотою q . Розв'язок рівняння має такий вигляд:

$$\omega = e^{-\frac{t}{T}}(A_1 \sin(qt) + A_2 \cos(qt)) + \omega_c = e^{-\frac{t}{T}}A \sin(qt + \psi) + \omega_c, \quad (7.37)$$

де $A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}$; $\psi = \arctg \frac{A_2}{A_1}$.

Перехідний процес буде загасаючим і завершиться за час $t_{\text{пп}} \approx (3 \dots 4)T$ (рис. 7.7, б).

Контрольні запитання

1. Навести диференційне рівняння кола збудження ДПС.
2. Накреслити динамічні характеристики аперіодичної, інтегруючої і пропорційної ланок.
3. Записати диференційне рівняння якірного кола двигуна постійного струму.
4. Навести рівняння руху електропривода в операторній формі.
5. Накреслити структурну схему електропривода ДПС із передаточними функціями ланок при змінному магнітному потоці.
6. Накреслити структурні схеми електропривода ДПС із передаточними функціями ланок при сталому магнітному потоці.
7. Які існують перехідні процеси в електроприводі і якими параметрами вони характеризуються?
8. Як визначається час механічного перехідного процесу в електроприводі? Накреслити залежності $\omega(t)$ та $M(t)$.
9. Чим обумовлені електромагнітні перехідні процеси в ДПС? Записати рівняння ЕРС для кола обмотки збудження.
10. Які типи електромеханічних перехідних процесів можливі і від чого вони залежать?

Рекомендована література

- [2] – с. 189-200;
 [3] – с. 22-27;

Розділ 3. ЕЛЕКТРОПРИВОД ЗМІННОГО СТРУМУ

Лекція 8. Електропривод з асинхронними двигунами. Регулювання координат АД КЗР

Тема 3.1. Електропривод із асинхронними двигунами

3.1.1. Схеми, основні рівняння

3.1.2. Регулювання координат асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором

Тема 3.1. Електропривод із асинхронними двигунами

3.1.1. Схеми, основні рівняння

Принцип роботи асинхронної машини полягає в наступному. Нерухома частина – статор – створює магнітне поле, яке обертається із синхронною швидкістю. У замкнених провідних контурах ротора, що є рухомою частиною, індукується ЕРС, яка спричиняє протікання струмів і виникнення силових впливів (моментів) внаслідок їхньої взаємодії з магнітним полем. Усі ці процеси відбуваються за умови, що ротор рухається не синхронно з полем, що й зумовило назву таких машин – асинхронні двигуни (АД).

Статор зазвичай складається з кількох котушок, розміщених у пазах, тоді як ротор може мати два основні типи конструкції. Перший варіант – короткозамкнений ротор, який має вигляд так званої “білячої клітки” (рис. 8.1,а). Другий варіант – фазний ротор, що складається з декількох котушок, кінці яких виведено на контактні кільця, розташовані на валу. Через ці кільця й щітки, ротор може підключатися до зовнішніх резисторів для регулювання його характеристик (рис. 8.1,б).

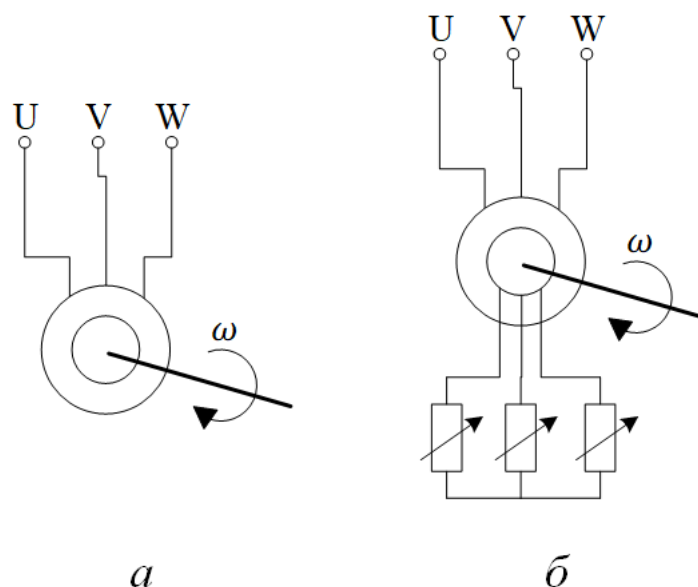


Рис.8.1. Схеми АД: а – з короткозамкненим ротором;
б – з фазним ротором

Попри видиму простоту фізичних процесів, повний математичний опис роботи асинхронної машини є досить складним. Це пов'язано з тим, що всі електричні величини, такі як напруги, струми та потокозчеплення, є змінними та характеризуються частотою, амплітудою, фазою або відповідними векторними параметрами. Крім того, взаємне розташування магнітних полів статора та ротора змінюється в просторі. Також слід враховувати, що магнітний потік має нелінійну залежність від струму намагнічування через насичення магнітної системи, активний опір роторного кола змінюється з частотою через ефект витіснення струму, а загальний опір усіх кіл залежить від температурних змін.

Для електричної машини, яка має p пар полюсів ($p = 1, 2, 3 \dots$), синхронна кутова швидкість ω_0 , виражена в радіанах за секунду, тобто швидкість обертання магнітного поля, визначається формулою:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}, \quad (8.1)$$

а для частоти обертання в обертах за хвилину:

$$n_0 = \frac{60f}{p}. \quad (8.2)$$

При живленні машини від мережі з частотою $f = 50$ Гц синхронна частота обертання залежить від конструкції і може становити 3000, 1500, 1000, 750, 600... об/хв. Якщо ротор обертається із синхронною швидкістю $\omega = \omega_0$, то силові лінії магнітного поля статора не перетинають його обмотки, а отже, ЕРС і струм у роторі відсутні. У такому випадку фазна напруга статора \dot{U} компенсується ЕРС самоіндукції \dot{E} :

$$E = 4.44\Phi f W k_{об}, \quad (8.3)$$

де W – число витків обмотки статора; $k_{об}$ – коефіцієнт, що залежить від виконання обмотки.

Магнітний потік можна вважати залежним від прикладеної напруги, частоти та характеристик обмотки:

$$\Phi \approx \frac{U}{4.44fWk_{об}} \equiv \frac{U}{f}. \quad (8.4)$$

Струм, що протікає в обмотці (фазі) статора, тобто струм намагнічування, залежить від величини магнітного потоку та характеристик намагнічування електричної машини:

$$I_1 = I_{10} = I_\mu. \quad (8.5)$$

У серійних машинах при номінальних значеннях напруги $U = U_H$ та частоти $f = f_H$, тобто при номінальному магнітному потоці, струм холостого ходу I_{10} може досягати 50% від номінального струму статора I_H .

У випадках, коли вал машини знаходиться під навантаженням, швидкість обертання ротора відрізняється від синхронної швидкості ($\omega \neq \omega_0$), це відхилення швидкостей характеризується ковзанням:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (8.6)$$

Тепер у роторному колі з'явиться наведена ЕРС E'_2 , яка виникає відповідно до закону електромагнітної індукції. Вона дорівнює:

$$E'_2 = E \cdot s. \quad (8.7)$$

Штрихом відмічені приведені величини, які враховують неоднаковість обмоток статора і ротора. Частота наведеної ЕРС визначається як:

$$f_2 = f \cdot s. \quad (8.8)$$

Якщо швидкість ротора дорівнює нулю ($\omega = 0$), то наведена ЕРС у роторі досягає максимального значення, тобто $E_2 = E_{2н}$.

Струм I'_2 у роторному колі, що має опір R'_2 і індуктивність L'_2 , можна визначити за законом Ома для індуктивного кола:

$$I'_2 = \frac{E'_2}{\sqrt{(R'_2)^2 + (2\pi f_2 L'_2)^2}}. \quad (8.9)$$

Провівши перетворення, отримаємо:

$$I'_2 = \frac{U}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X'_2)^2}}, \quad (8.10)$$

де X'_2 – індуктивний опір розсіювання вторинного кола при частоті f .

Приведені параметри ротора двигуна визначаються за наступними формулами:

$$\begin{aligned} X'_2 &= k^2 X_2; \\ R'_2 &= k^2 R_2; \end{aligned} \quad (8.11)$$

де $k = \frac{U}{E_2}$ – коефіцієнт трансформації.

Отримані рівняння відповідають еквівалентній схемі фази асинхронного двигуна (рис. 8.2), у якій враховано також параметри статора R_1 і X_1

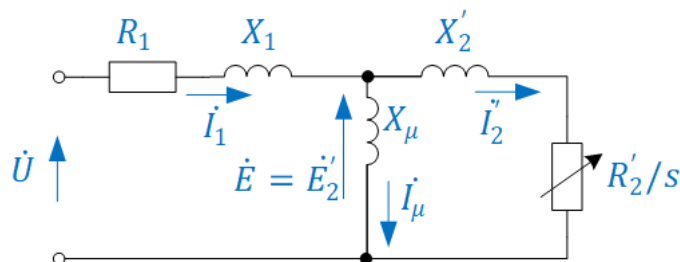


Рис.8.2. Схема заміщення фази АД

Залежність моменту асинхронного двигуна від ковзання виражається спрощеною формулою Клосса:

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}, \quad (8.12)$$

Де $M_K = 0.04 \cdot \frac{U^2 P}{f^2 L_K}$ – критичний момент двигуна;

$s_K = s_H (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})$ – критичне ковзання; $\Delta\omega_K = \frac{R'_2}{pL_K}$ – перепад швидкості, що відповідає критичному моменту; L_K – індуктивність короткого замикання.

Проаналізуємо рівняння механічної характеристики. У робочій області, де ковзання S значно менше за критичне значення S_k , тобто $S < S_k$, залежність моменту від ковзання $M = f(s)$ має лінійний характер:

$$M = \frac{2M_k}{S_k} S. \quad (8.13)$$

У області, де значення ковзання перевищує критичне, тобто $S > S_k$ та $\frac{S_k}{S} \ll \frac{S}{S_k}$ залежність моменту від ковзання набуває гіперболічного характеру:

$$M = \frac{2M_k}{S} S_k. \quad (8.14)$$

На рисунку 8.3 представлені природні механічна та електромеханічна характеристики асинхронного двигуна.

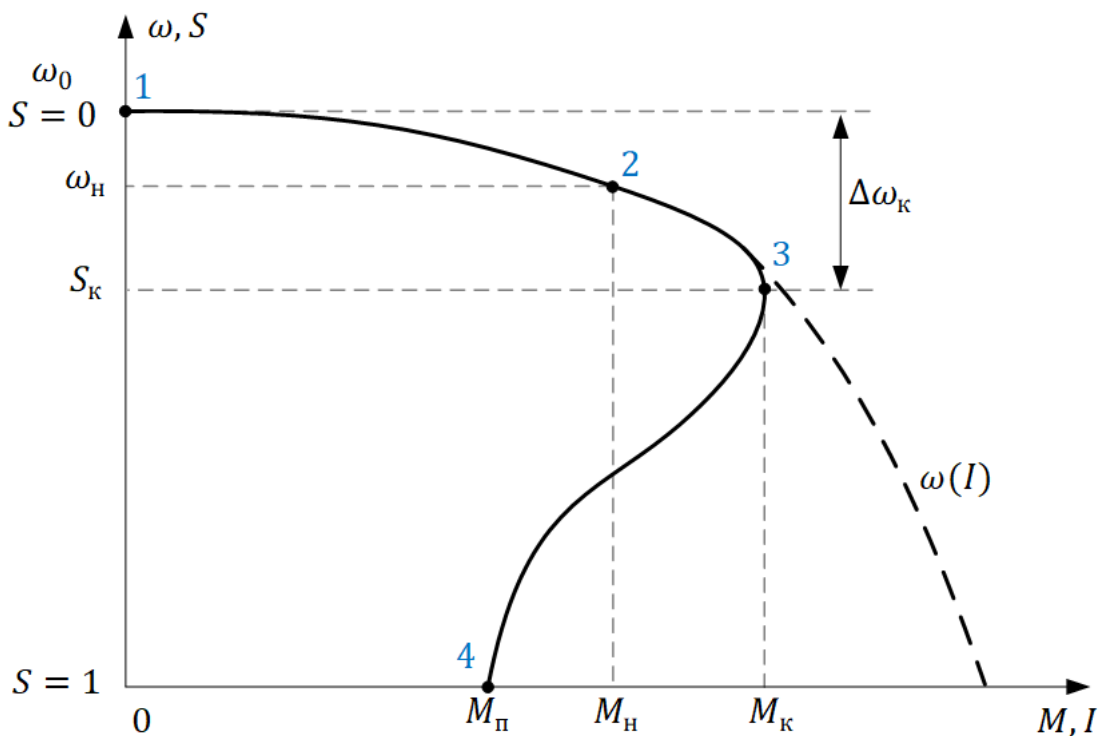


Рис.8.3. Природні механічна та електромеханічна характеристики асинхронного двигуна

У каталозі асинхронного двигуна вказуються номінальні лінійні напруги для з'єднання обмоток в зірку або трикутник $\frac{U_{н\lambda}}{U_{н\Delta}}$, струми $\frac{I_{н\lambda}}{I_{н\Delta}}$, номінальна частота f_n , потужність на валу P_n , номінальна частота обертання n_n , коефіцієнт корисної дії η_n і коефіцієнт потужності $\cos\varphi_n$.

Для двигунів з короткозамкненим ротором також вказуються кратності пускового струму $k_I = \frac{I_{1п}}{I_{1н}}$, пускового моменту $k_M = \frac{M_{п}}{M_{н}}$, критичного моменту $\lambda = \frac{M_k}{M_n}$, а іноді також наведені типові природні характеристики цих двигунів.

Для двигунів з фазним ротором вказується ЕРС на розімкнутих кільцях загальмованого ротора $E_{2н}$ при номінальній напрузі U_n і номінальному струмі ротора $I_{2н}$.

Наведених у каталозі даних недостатньо для точного визначення параметрів схеми заміщення, однак на основі паспортних даних можна побудувати природні електромеханічну та механічну характеристики, використовуючи кілька опорних точок (рис. 8.3).

Точка 1 – режим холостого ходу, тобто робота двигуна без навантаження ($\omega = \omega_0$; $M = 0$; $I_1 = I_{xx} \approx 0.35I_{1н}$; $\omega_0 = \frac{2\pi f}{p} = \frac{\pi n_0}{30}$). Для цієї точки швидкість обертання n_0 наближається до однієї з таких значень: 3000, 1500, 1000 об/хв, що є найближчою більшою до номінальної швидкості n_n .

Точка 2 – із номінальними параметрами ($M_n = \frac{P_n}{\omega_n}$).

Точка 3 – критичний момент і швидкість ($M = M_k$; $\omega = \omega_k$), момент визначається із паспортних даних $M_k = \lambda M_n$, а швидкість пов'язана із критичним ковзанням S_k .

Точка 4 – пусковий момент ($\omega = 0$; $M = M_p$; $I_1 = I_{1п}$) розраховується за паспортними даними двигуна.

Штучні характеристики асинхронних двигунів визначаються за тими ж точками аналогічним чином.

Використовуючи вирази ω_0 , $\Delta\omega_k$ та M_k , сформуємо таблицю 8.1, де U і f є параметрами мережі, а p , L_k та R'_2 – параметрами двигуна.

Таблиця 8.1 – Вплив параметрів асинхронного двигуна та електромережі на його штучні характеристики.

	U	f	p	L_k	R'_2
ω_0	-	f	$1/p$	-	-
S_k	-	$1/f$	-	$1/L_k$	R'_2
$\Delta\omega_k$	-	-	$1/p$	$1/L_k$	R'_2
M_k	U^2	$1/f^2$	P	$1/L_k$	-

3.1.2. Регулювання координат асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором зміною параметрів напруги живлення

Існують такі методи регулювання координат двигунів із короткозамкненим ротором:

- зміна параметрів мережі, зокрема напруги та частоти,
- зміна параметрів самого двигуна, таких як кількість пар полюсів і індуктивність статорного кола.

Параметричне регулювання напруги передбачає використання регулятора напруги РН (рис. 8.4, а).

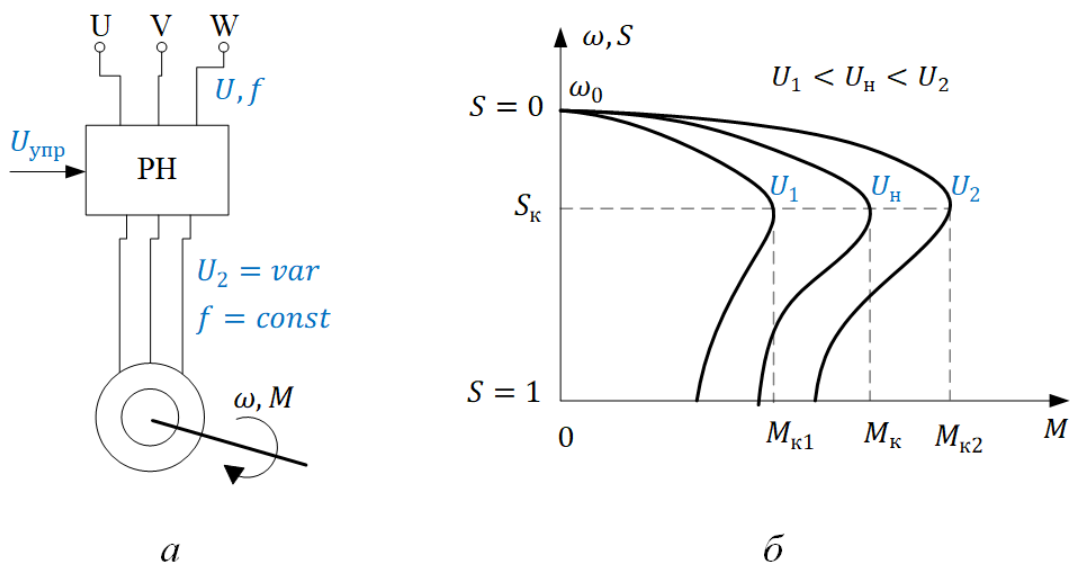


Рис.8.4. Регулювання координат АД КЗР зміною амплітуди напруги:
 а – схема підключення; б – механічні характеристики

Зі зміною амплітуди напруги живлення синхронна швидкість і перепад швидкості залишаються незмінними, проте змінюються критичний і пусковий моменти двигуна:

$$\begin{aligned}
 \omega_0 &= const; \\
 S_k &= const; \\
 \Delta\omega_k &= const; \\
 M_k &\equiv U^2; \\
 M_{\Pi} &\equiv U^2.
 \end{aligned}
 \tag{8.15}$$

Наприклад, при зниженні напруги на 10% ($U = 0,9U_H$) критичний момент зменшується пропорційно U^2 , тоді як критичне ковзання залишається незмінним. Це призводить до погіршення електромеханічних характеристик двигуна, зокрема до зниження пускового моменту та перевантажувальної здатності.

Якщо підвищити напругу на 10%, то критичний момент збільшиться на 21%, але при цьому зросте струм холостого ходу, магнітна система двигуна насичується, що призводить до підвищеного нагрівання обмоток статора та втрат у кабельній мережі. Регулювання можливе лише в обмеженому діапазоні, оскільки при цьому зменшується критичний момент і жорсткість механічної характеристики.

Механічні характеристики при регулюванні частоти підведеної напруги до статора двигуна з короткозамкненим ротором представлені на рис. 8.5.

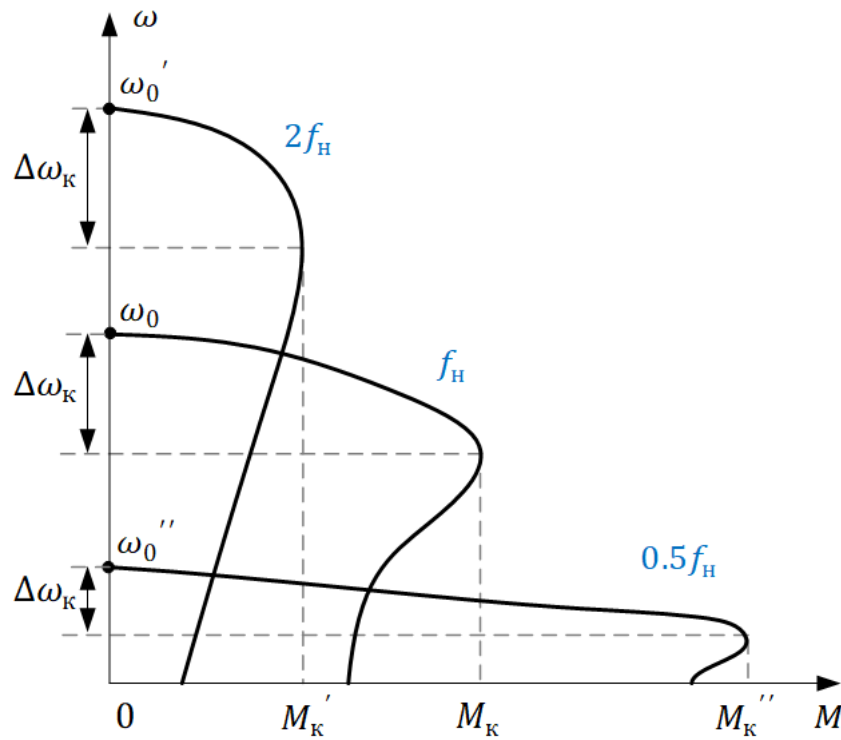


Рис.8.5. Механічні характеристики АД КЗР при зміні частоти напруги

Зі збільшенням частоти напруги живлення двигуна синхронна швидкість ω_0 зростає, S_K зменшується, а $\Delta\omega_K$ залишається незмінним. Однак підвищення частоти призводить до зменшення критичного моменту M_K , а отже, і до зниження перевантажувальної здатності двигуна:

$$\begin{aligned} \omega_0 &\equiv f; \\ S_K &\equiv \frac{1}{f}; \\ \Delta\omega_K &= const; \\ M_K &\equiv \frac{1}{f^2}. \end{aligned} \quad (8.16)$$

Зменшення частоти призводить до зниження синхронної швидкості ω_0 , при цьому перепад швидкості залишається постійним ($\Delta\omega_K = const$). Однак це викликає збільшення критичного моменту M_K та підвищення нагрівання двигуна.

Зміна частоти і амплітуди напруги, поданої на статорні обмотки, дає змогу ефективно регулювати швидкість двигуна. Однак при зменшенні частоти f для підтримання магнітного потоку на номінальному рівні необхідно коригувати напругу $E \approx U$ таким чином, щоб

$$\frac{U}{f} = const. \quad (8.17)$$

При збільшенні частоти від номінальної при $U = U_H$ потік буде зменшуватися. Якщо знехтувати R_1 , приймаючи $E \approx U$, то критичний момент буде пропорційний відношенню U/f , тоді як критичне ковзання S_K буде обернено пропорційне частоті f :

$$\begin{aligned}
 \omega_0 &\equiv f; \\
 S_k &\equiv \frac{1}{f}; \\
 \Delta\omega_k &= \text{const}; \\
 M_k &\equiv \frac{U^2}{f^2} = \text{const}; \\
 \frac{U}{f} &= A\Phi;
 \end{aligned}
 \tag{8.18}$$

де $A = 4.44\pi W k_{об} = \text{const}$.

Регулювання швидкості асинхронних двигунів зміною частоти та напруги вимагає наявності перетворювача частоти (ПЧ) (рис. 8.6, а). Механічні характеристики при такому регулюванні мають вигляд, наведений на рис. 8.6, б.

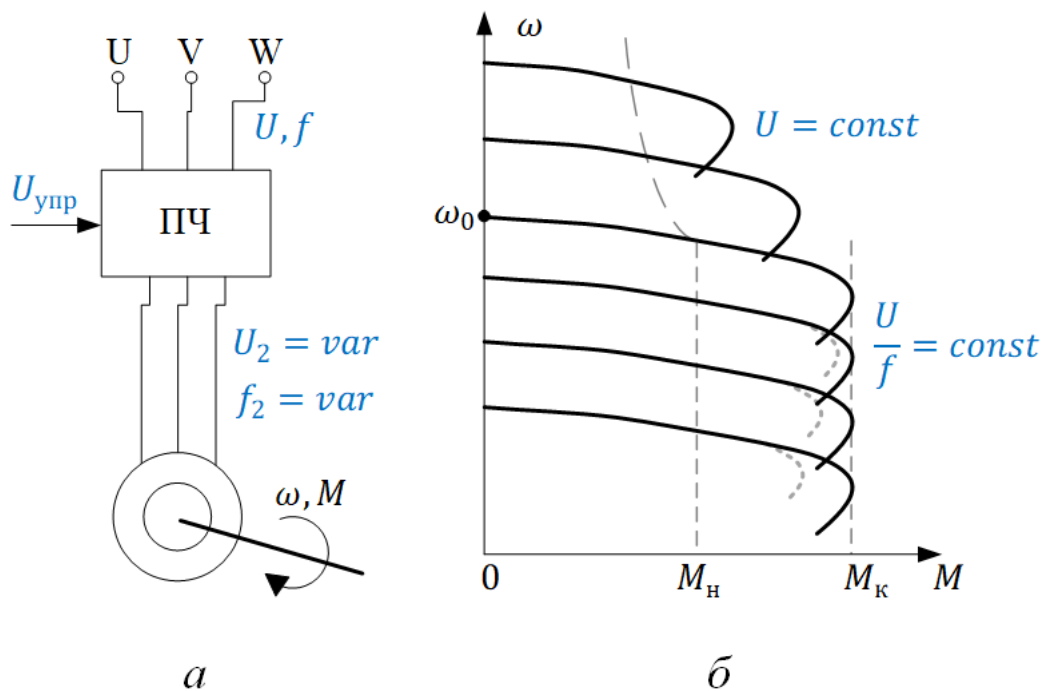


Рис.8.6. Регулювання координат АД КЗР зміною напруги і частоти:
а – схема підключення; б – механічні характеристики

Активний опір кола статора на низьких швидкостях зменшує величину критичного моменту. Для компенсації цього ефекту збільшують напругу при низьких частотах.

Контрольні запитання

1. На чому засновано принцип роботи асинхронного двигуна?
2. В чому полягає різниця між двигунами із короткозамкненим і фазним ротором?
3. Навести рівняння залежності швидкості обертання валу від частоти напруги живлення.
4. Навести рівняння для визначення магнітного потоку асинхронного двигуна.

5. Що таке ковзання асинхронного двигуна?
6. Від чого залежить струм в роторному колі? Навести рівняння струму ротора приведенного до обмотки статора.
7. Навести спрощене рівняння Клосса для побудови механічної характеристики АД.
8. Як побудувати природню механічну характеристику АД користуючись опорними точками?
9. Як змінюються механічні характеристики АД при регулюванні амплітуди напруги, підведеної до статора?
10. Як змінюються механічні характеристики АД при регулюванні частоти напруги, підведеної до статора?
11. Як змінюються механічні характеристики АД при регулюванні амплітуди і частоти напруги, підведеної до статора?

Рекомендована література

[2] – с. 25-34;

Леція 9. Регулювання координат АД КЗР зміною пар полюсів. Зміна індуктивності статорного кола. Регулювання координат АД ФР. Гальмівні режими АД.

3.1.3. Регулювання координат асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором зміною параметрів двигуна

3.1.4. Регулювання координат асинхронних двигунів із фазним ротором

3.1.5. Гальмівні режими асинхронних двигунів

3.1.6. Характерні риси асинхронного електроприводу

3.1.3. Регулювання координат асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором зміною параметрів двигуна

Для ступінчатого регулювання координат двигунів з короткозамкненим ротором також використовують двигуни з перемиканням обмоток статора, що дозволяє змінювати кількість пар полюсів.

Кількість пар полюсів змінюють у статорних обмотках, оскільки взаємодія намагнічувальних сил статора та ротора можлива лише за умови їх однакової кількості. Тому цей спосіб регулювання застосовується виключно до двигунів із короткозамкненим ротором. У двигунах із двома незалежними статорними обмотками співвідношення кількості пар полюсів може відрізнятись.

$$\begin{aligned}
 \omega_0 &\equiv \frac{1}{p}; \\
 S_k &= const; \\
 \Delta\omega_k &\equiv \frac{1}{p};
 \end{aligned}
 \tag{9.1}$$

$$M_K \equiv p;$$

$$M_{\Pi} \equiv p.$$

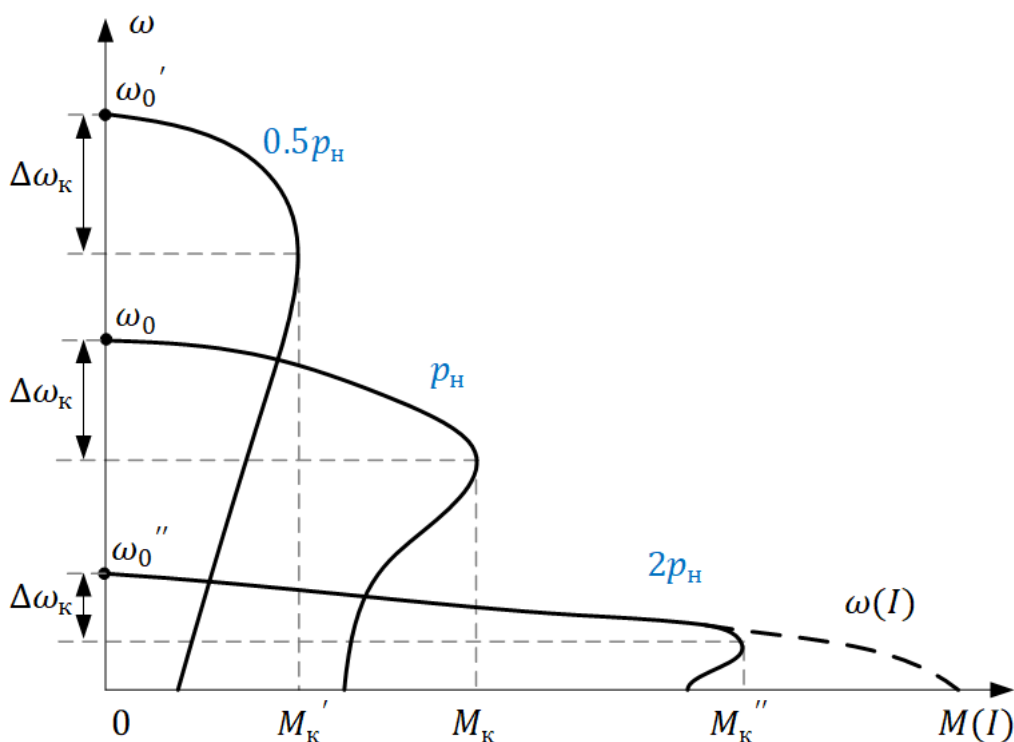


Рис.9.1. Механічні характеристики АД КЗР при регулювання швидкості зміною числа пар полюсів

Якщо $p = 2p_n$, то синхронна швидкість ω_0 і перепад швидкості $\Delta\omega_K$ зменшуються вдвічі, тоді як критичний момент M_K подвоюється (рис. 9.1). У разі $p = 0.5p_n$, навпаки, ω_0 і $\Delta\omega_K$ зростають удвічі, а M_K зменшується вдвічі. На низьких швидкостях двигун споживає більше струму, що спричиняє його перегрівання. Перехід із вищої швидкості на нижчу супроводжується значним стрибком струму.

Недоліками є збільшені габарити (через дві обмотки статора), низький $\cos\varphi$, низький ККД (0,70...0,75) та велика кількість невикористаної міді (оскільки працює лише одна обмотка).

Двошвидкісні двигуни також виготовляються як однообмоткові, з можливістю перемикавання на різну кількість пар полюсів за допомогою секціонування обмоток.

Найпростішим способом перемикають число пар полюсів у співвідношенні 1:2. Для цього обмотка кожної фази статора складається з двох секцій (рис. 9.2). При зміні напрямку струму в одній з секцій змінюється кількість пар полюсів. Зазвичай обмотки статора перемикають із зірки на подвійну зірку або з трикутника на подвійну зірку. Перехід на подвійну зірку призводить до зменшення кількості пар полюсів удвічі і збільшення швидкості вдвічі.

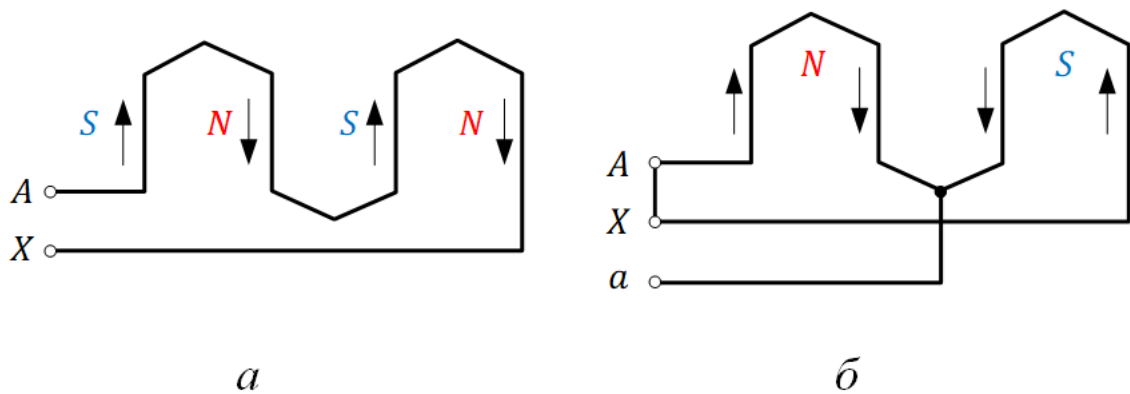


Рис.9.2. Схеми з'єднань секцій обмоток статора

Умовно зобразимо обмотку, розміщену в пазах (рис. 9.2). Стрілкою позначений напрямок струму. Там, де струми і потоки мають різний напрямок, утворюється полюсний розподіл. У вихідному положенні кількість пар полюсів $2p = 4, p = 2$. Якщо з'єднати виводи A і X та додати новий вивід a посередині, то кількість пар полюсів зменшиться вдвічі $2p = 2, p = 1$, що призведе до подвоєння швидкості.

Нехай обмотка статора виконана у вигляді зірки, при цьому кожна фаза секціонована, а двигун має додаткові виводи U, V, W (рис. 9.3). З'єднаємо початок і кінці всіх обмоток (A і X, B і Y, C і Z), а до виводів U, V, W підведемо напругу. Такий підхід дає схему “подвійна зірка”. У результаті число пар полюсів зменшується, а швидкість зростає з ω_0 до $2\omega_0$.

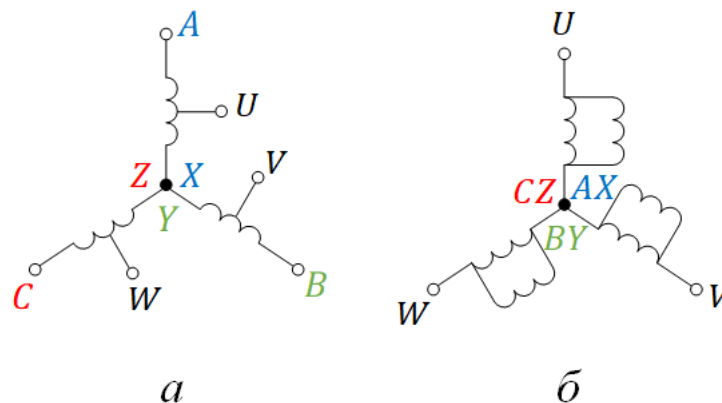


Рис.9.3. Схеми з'єднань обмоток статора:
а – “зірка”; б – “подвійна зірка”

Потужності при з'єднанні “зіркою” та “подвійною зіркою” визначаються за формулами:

$$\begin{aligned}
 P_{\lambda} &= \sqrt{3}U_{\phi}I_{\lambda}\cos\varphi_{\lambda} = 3U_{\phi}I_{\phi}\cos\varphi_{\lambda}; \\
 P_{\lambda\lambda} &= \sqrt{3}U_{\phi}2I_{\phi}\cos\varphi_{\lambda\lambda}.
 \end{aligned}
 \tag{9.2}$$

Співвідношення потужностей при з'єднанні “зіркою” та “подвійною зіркою”:

$$\frac{P_{\lambda\lambda}}{P_{\lambda}} \approx 2. \quad (9.3)$$

При такому перемиканні швидкість і потужність збільшуються вдвічі. Отже, регулювання відбувається при постійному моменті $M = const$, і характеристики виглядають відповідно до цього (рис. 2.10).

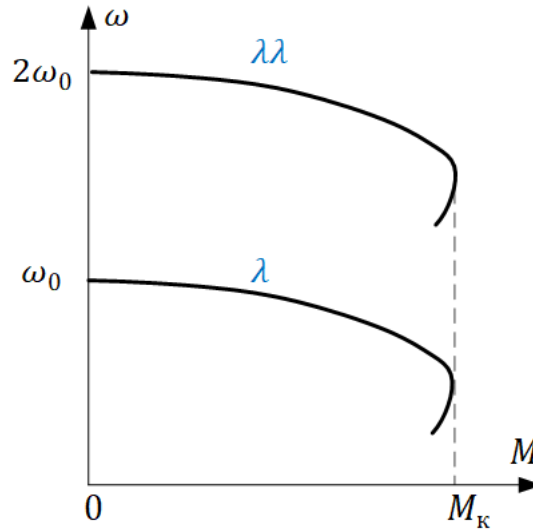


Рис.9.4. Механічні характеристики АД КЗР при з'єднанні обмоток “зіркою” та “подвійною зіркою”

Двошвидкісні двигуни мають великі габарити, високу вартість, потребують додаткової перемикаючої апаратури та поступаються сучасним електроприводам за ефективністю.

Регулювання швидкості за допомогою ввімкнення додаткової індуктивності $L_{\text{дд}}$ застосовується рідко (рис. 9.5). При збільшенні індуктивності

$L = L_1 + L'_2 + L_{\text{дд}} = L_{\text{к}} + L_{\text{дд}}$ синхронна швидкість залишається незмінною, але зменшуються критичний момент і перепад швидкості:

$$\begin{aligned} S_{\text{к}} &\equiv \frac{1}{L_{\text{к}}}; \\ \Delta\omega_{\text{к}} &\equiv \frac{1}{L_{\text{к}}}; \\ M_{\text{к}} &\equiv \frac{1}{L_{\text{к}}}; \\ \omega_0 &= const. \end{aligned} \quad (9.4)$$

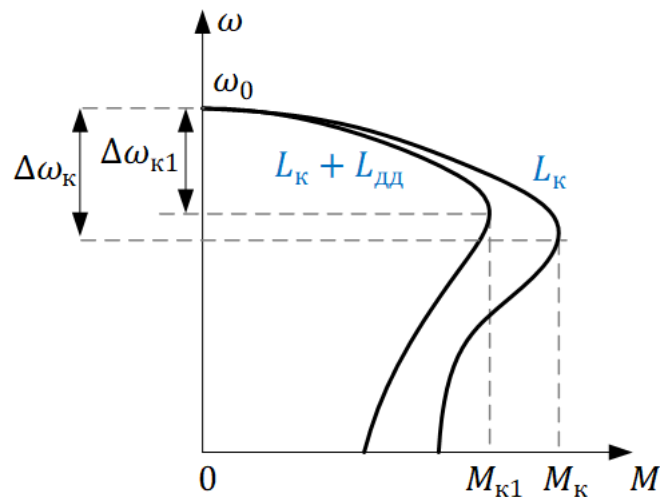


Рис.9.5. Механічні характеристики АД при вмиканні додаткової індуктивності до обмоток статора

3.1.4. Регулювання координат асинхронних двигунів із фазним ротором

Додаткові можливості управління координатами асинхронного двигуна з'являються в машинах з фазним ротором (ФР). Обмотка такого двигуна складається з котушок, з'єднаних між собою і виведених на кільця, по яких ковзають щітки, пов'язані з зовнішніми пристроями (рис. 8.1, б). Фазний ротор забезпечує додатковий канал впливу на двигун, але це призводить до ускладнення конструкції та збільшення вартості. Тому в загальному обсязі виробництва асинхронні двигуни з фазним ротором складають лише невелику частку.

У коло ротора можна вмикати як пасивні елементи, такі як резистори (реостатне регулювання), так і активні елементи, що містять джерела енергії (каскадні схеми – асинхронно вентильний каскад, машина подвійного живлення).

Реостатне регулювання є найпростішим методом, коли в кожен фазу ротора включають резистори з опором R_p . Тоді загальний активний опір фази ротора дорівнює $R = R_p + R'_2$ і штучні характеристики виглядають так, як показано на рис. 9.6. При цьому критичний момент M_k і синхронна швидкість ω_0 не змінюються, а критичне ковзання S_k і перепад швидкості $\Delta\omega_k$ зростають пропорційно до опору R :

$$\begin{aligned}
 S_k &\equiv R; \\
 \Delta\omega_k &\equiv R; \\
 \omega_0 &= \text{const}; \\
 M_k &\equiv \text{const}.
 \end{aligned}
 \tag{9.5}$$

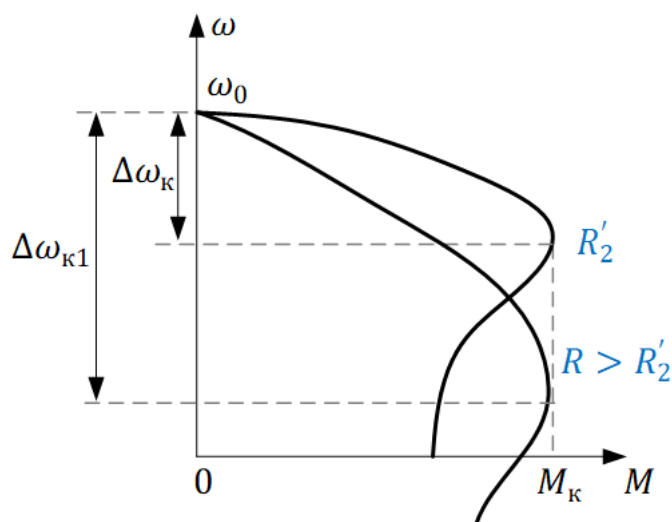


Рис.9.6. Механічні характеристики АД ФР при зміні опору в колі ротора

З енергетичної точки зору реостатне регулювання в асинхронному електроприводі є неефективним. Втрати в роторному колі при постійному моменті $M = const$ пропорційні ковзанню s , що призводить до додаткових втрат енергії, оскільки частина енергії перетворюється в тепло через опір резисторів. Це знижує загальну ефективність системи:

$$\Delta P = P_1 - P_2 \approx M\omega_0 - M\omega = M\omega_0 s = P_1 s. \quad (9.6)$$

Розподіл втрат потужності визначається співвідношенням опорів. В роторній обмотці розсіюється потужність $\Delta P = P_1 s \frac{R'_2}{R_p + R'_2}$, а в додаткових резисторах розсіюється потужність $\Delta P_p = P_1 s \frac{R_p}{R_p + R'_2}$.

При потужності електропривода в кілька сотень кВт і більше втрати, зумовлені ковзанням, стають значними за абсолютним значенням. Ступінь погіршення коефіцієнта корисної дії (ККД) можна оцінити, якщо не брати до уваги втрати в обмотках статора та в сталі асинхронного двигуна:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{M\omega}{M\omega_0} = \frac{\omega_0(1-s)}{\omega_0} = 1 - s = \frac{\omega}{\omega_0} = \omega^*. \quad (9.7)$$

Таким чином, ККД знижується пропорційно швидкості. Наприклад, при швидкості, яка дорівнює половині синхронної, ефективність $\eta = 0.5$. Це означає, що використання такого способу регулювання швидкості призводить до суттєвого збільшення витрат енергії, оскільки частина потужності витрачається на перетворення енергії в тепло через додаткові втрати в роторі та резисторах.

3.1.5. Гальмівні режими асинхронних двигунів

Асинхронний електропривод може працювати в рушійному режимі та трьох режимах гальмування.

Рекуперативне гальмування відбувається, коли ротор двигуна обертається під дією зовнішніх сил зі швидкістю $\omega > \omega_0$ (тобто, ковзання $s < 0$). Механічні характеристики цього режиму при зміні опору в колі ротора

наведені на рис. 9.7. Цей режим можна також досягти, якщо ротор обертається зі швидкістю ω , при цьому необхідно зменшити швидкість обертання поля ω_0 . У цьому випадку активним моментом буде момент інерційних мас обертового ротора.

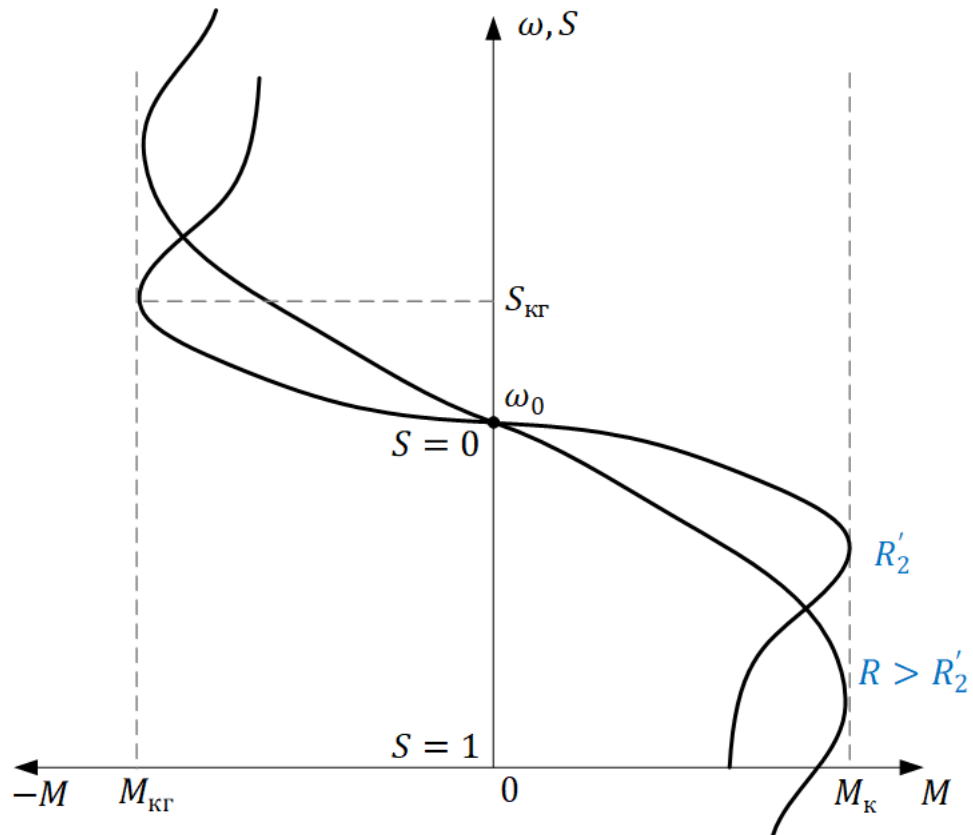


Рис.9.7. Механічні характеристики АД ФР в режимі рекуперації при зміні опору в колі ротора

Для здійснення гальмування **протіввімкненням** асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором потрібно поміняти місцями дві фази статора (як показано на рис. 9.8, а). Це призводить до зміни напрямку обертання магнітного поля, що викликає гальмування машини в режимі протіввімкнення, після чого двигун реверсується.

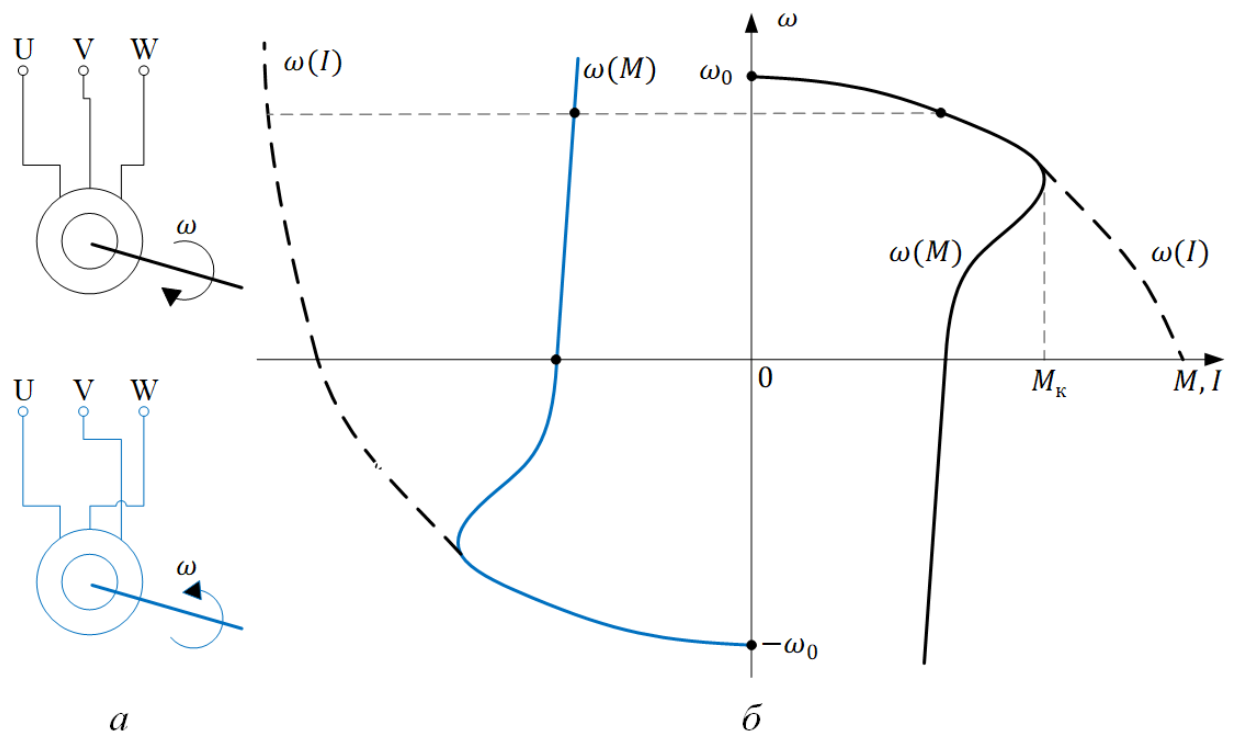


Рис.9.8. Режим протипвiмкнення АД КЗР: а – схема пiдключення; б – механiчні характеристики

Для двигуна з фазним ротором необхідно значно збiльшити опiр кола ротора при наявностi активного моменту. У разi реактивного моменту необхідно здiйснити реверс i також ввести в коло ротора додатковий реостат, як показано на рис. 9.9.

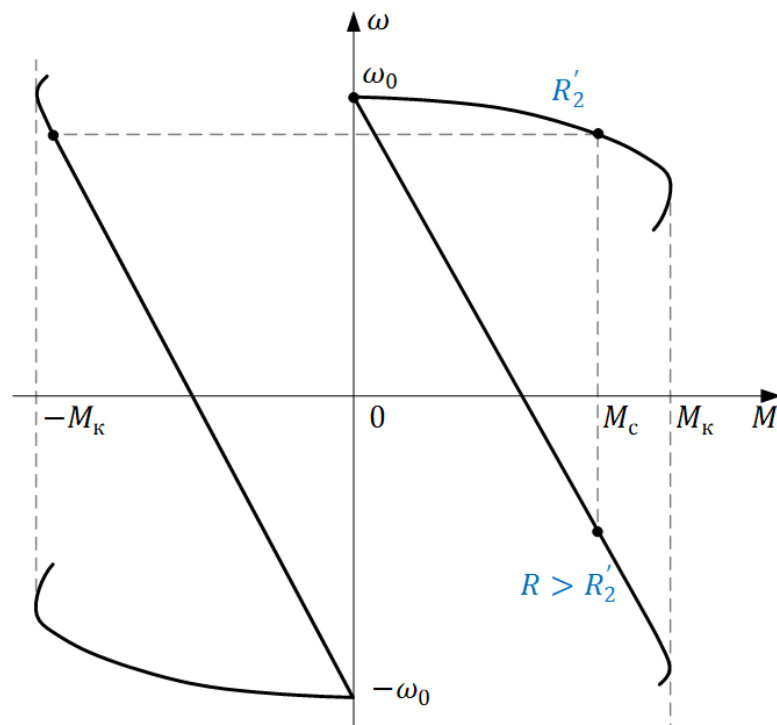


Рис.9.9. Режим протипвiмкнення АД ФР: а – схема пiдключення; б – механiчні характеристики

Режим електродинамічного гальмування є генераторним режимом для асинхронного двигуна, який відключений від мережі, при цьому до двох фаз статора підведено постійний струм I_{Π} . Цей режим використовується в тих випадках, коли після відключення двигуна від мережі необхідно швидко зупинити його без реверсу.

Постійний струм, що подається до обмотки статора, створює нерухоме поле в просторі. При обертанні ротора в його обмотці наводиться змінна електрорушійна сила, що викликає струм, який, у свою чергу, генерує своє магнітне поле. При складанні полів статора і ротора утворюється результуюче поле, яке взаємодіє з струмом ротора, генеруючи гальмівний момент. Енергія, що надходить з вала двигуна, розсіюється в опорах роторного кола. У режимі динамічного гальмування поле статора залишається нерухомим, а ковзання можна виразити через відповідне рівняння:

$$s = \frac{\omega}{\omega_0}. \quad (9.8)$$

Рівняння механічної характеристики аналогічне рушійному режиму:

$$M = \frac{2M_{\text{кг}}}{\frac{S}{S_{\text{кг}}} + \frac{S_{\text{кг}}}{S}}; \quad (9.9)$$

$$M_{\text{кг}} = \frac{3I_{\text{екв}}^2 X_{\mu}^2}{2\omega_0(X_{\mu} + X_2')};$$

де $I_{\text{екв}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{\Pi}$ – струм при з'єднанні обмоток статора в “зірку”;

$I_{\text{екв}} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_{\Pi}$ – при з'єднання обмоток статора в “трикутник”;

$S_{\text{кг}} = \frac{R_2'}{X_{\mu} + X_2'}$ – критичне ковзання гальмування.

У випадку ненасиченої машини (при $X_{\mu} \gg X_2'$) критичне ковзання в режимі динамічного гальмування $s_{\text{кг}}$ значно менше, ніж критичне ковзання $s_{\text{к}}$. Гальмівний момент досягає максимального значення при малих швидкостях.

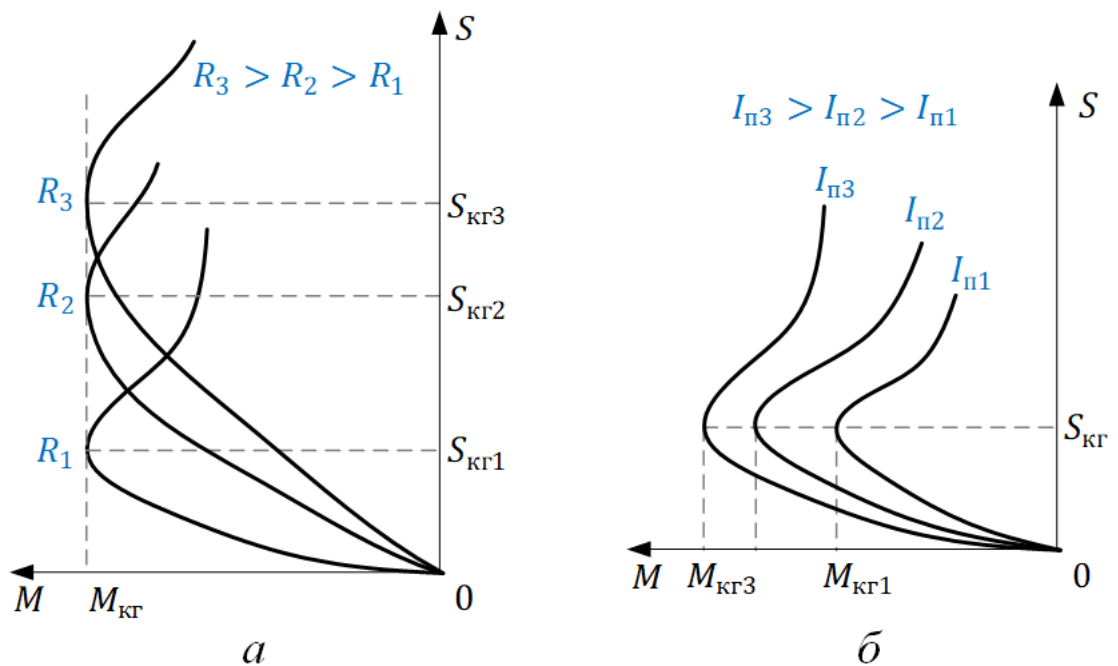


Рис.9.10. Механічні характеристики АД ФР у режимі електродинамічного гальмування при зміні:
 а – опору в колі ротора;
 б – величини постійного струму в колі статора

На рис. 9.10 показані механічні характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором у режимі електродинамічного гальмування при зміні опору в колі ротора (а) та величини постійного струму (б).

3.1.6. Характерні риси асинхронного електроприводу

Асинхронні двигуни мають такі властивості:

- Фіксований діапазон швидкостей, обумовлений кількістю пар полюсів. При живленні від мережі з частотою $f = 50$ Гц синхронна частота обертання може бути 3000, 1500, 1000, 750, 600... об/хв, залежно від конструкції машини.
- Збільшений струм холостого ходу статора. У серійних машинах при номінальних напрузі та частоті мережі, тобто при номінальному магнітному потоці, струм холостого ходу може досягати 50% від номінального струму статора.
- Нелінійну залежність струму статора від величини навантаження (рис.9.11).

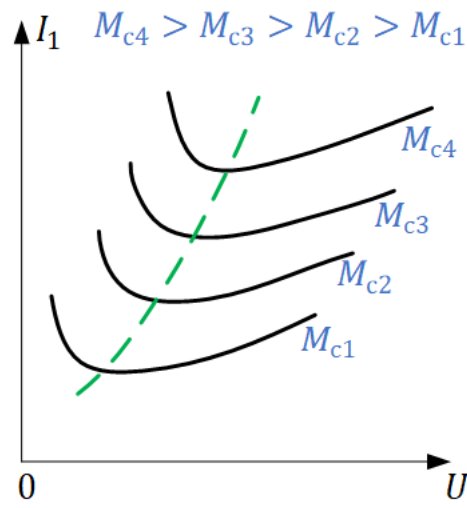


Рис.9.11. Залежність струму статора від навантаження на валу

Як показано на рис. 9.11, для кожного навантаження є така напруга, за якої споживаний двигуном струм мінімальний. Штрихова лінія, що проходить через точки мінімумів струму для різних навантажень, визначає закон регулювання напруги залежно від струму. При застосуванні такого енергозберігаючого закону при будь-якому навантаженні з мережі споживається мінімальний струм.

- Зменшений пусковий момент (для АД КЗР).
- Нижчі енергетичні характеристики (ККД і коефіцієнт потужності) порівняно із синхронним приводом через збільшений струм статора.
- Обмежену перевантажувальну здатність, що визначається величиною критичного моменту двигуна.
- Квадратичну залежність моменту двигуна від величини напруги живлення. Наприклад, при зниженні напруги на 10% критичний момент зменшиться на 19%. Зниження напруги на 20% і більше є небезпечним, оскільки може спричинити зупинку двигуна та робочого механізму.
- Малий повітряний зазор, що знижує надійність асинхронного двигуна порівняно з синхронним.
- Регулювання координат можливе шляхом зміни параметрів мережі (напруга та частота) і характеристик двигуна (число пар полюсів та індуктивність у колі статора), а також через вмикання пасивних і активних елементів у коло ротора (реостати, каскадні схеми).
- Регулювання швидкості шляхом зміни частоти та величини живлячої напруги за частотним законом $U/f = const$ здійснюється при постійному магнітному потоці (моменті) і є практично єдиним ефективним способом регулювання координат асинхронних двигунів.
- Двигуни з короткозамкненим ротором є найпоширенішими електричними машинами.

Деякі характеристики сучасних АД КЗР можна оцінити за такими даними: $s_H = 0.01 \dots 0.05$ (менші значення у двигунів більшої потужності); $k_I = 5 \dots 7$; $k_M = 1.3 \dots 1.6$; $\lambda = 1.8 \dots 2.5$. Як видно з цих даних, природні

характеристики АД є досить несприятливими: малий пусковий момент, великий пусковий струм і обмежені можливості для регулювання координат.

Контрольні запитання

1. Як змінюються механічні характеристики АД КЗР при зміні кількості пар полюсів?
2. Навести механічні характеристики і рівняння потужностей при з'єднанні обмоток статора “зіркою” та “подвійною зіркою”.
3. Як змінюються механічні характеристики АД КЗР при регулюванні швидкості за допомогою ввімкнення додаткової індуктивності в коло статора?
4. Реостатне регулювання АД ФР: механічні характеристики.
5. Втрати потужності та ККД при реостатному регулюванні швидкості АД ФР.
6. Навести схему підключення та механічні характеристики АД в режимі рекуперації.
7. Навести схему підключення та механічні характеристики АД в режимі противвімкнення.
8. Навести схему підключення та механічні характеристики АД в режимі електродинамічного гальмування.

Рекомендована література

[2] – с. 34-44

Лекція 10. Електропривод з синхронними двигунами. Схеми, основні рівняння і характеристики. СД як компенсатор реактивної потужності.

Тема 3.2. Електропривод із синхронними двигунами

3.2.1. Схеми, основні рівняння

3.2.2. Синхронна машина як компенсатор реактивної потужності

Тема 3.2. Електропривод із синхронними двигунами

3.2.1. Схеми, основні рівняння

Статор синхронного двигуна (СД) за конструкцією схожий на статор асинхронної машини (рис. 10.1,а) і створює магнітне поле, що обертається. Ротор може мати явнополюсну або неявнополюсну конструкцію і живиться від джерела постійної напруги через контактні кільця, або ж бути виконаним із застосуванням постійних магнітів. Він утворює магнітний зв'язок із полем статора і обертається синхронно з ним, при цьому в рушійному режимі відстає, а в гальмівному — випереджає на кут навантаження θ , який визначається величиною статичного моменту. Механічна характеристика синхронної машини наведена на рис. 10.1,б. Синхронну швидкість можна визначити за формулою (8.1).

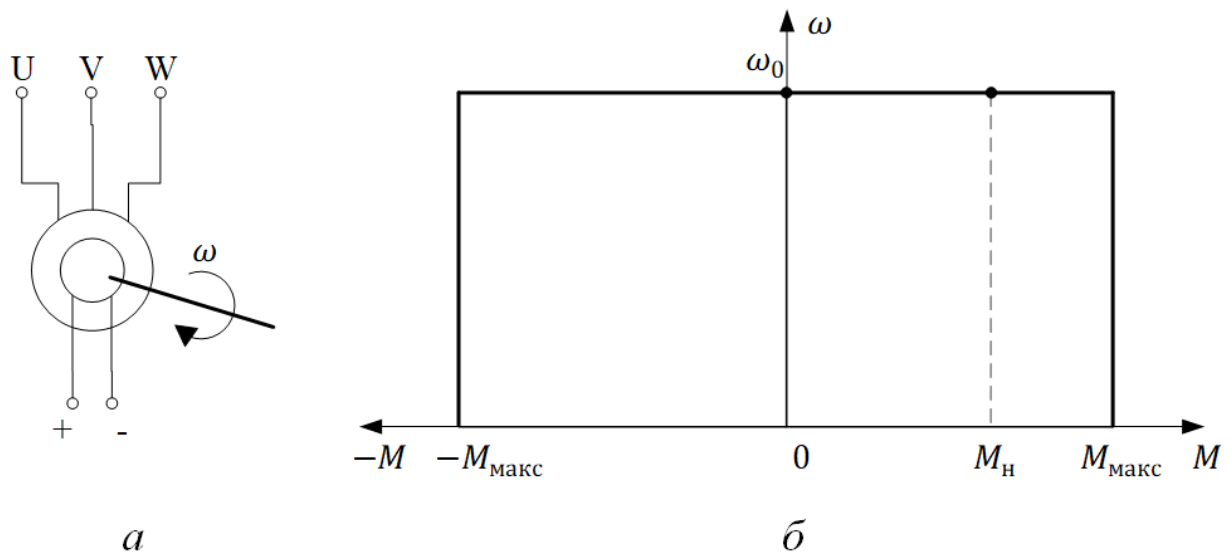


Рис.10.1 Синхронний двигун:
а – схема підключення; б – механічні характеристики

Для запуску синхронного двигуна використовується асинхронний спосіб, для чого його ротор оснащується пусковою обмоткою у вигляді білячої клітки. На рис. 10.2 представлені пускові характеристики: 1 – обмотка білячої клітки, 2 – обмотка збудження, 3 – результуюча характеристика.

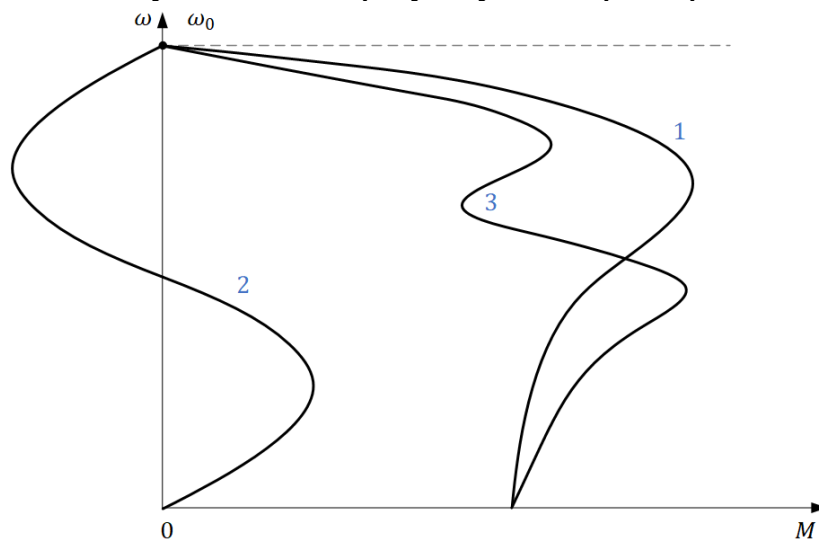


Рис.10.2 Пускові механічні характеристики СД

Під час пуску, коли ротор нерухомий, в обмотці збудження індукуються висока ЕРС, яка може досягати кількох кіловольт через значну різницю в числі витків обмоток статора і збудження ($W_3/W_c \gg 1$). Це спричиняє великі перенапруги, що можуть пошкодити ізоляцію обмоток. Щоб цього уникнути, під час розгону обмотка збудження відключається від джерела постійного струму та шунтується гальмівним опором, який у 8–10 разів перевищує опір обмотки збудження ($R_r = (8 \dots 10)R_3$). Коли швидкість досягає 95% синхронної, подається живлення на обмотку збудження, і машина переходить у синхронний режим, при цьому струм може зрости в 7–8 разів.

Фаза статора неявнополюсної синхронної машини з однією парою полюсів $p = 1$, за умови нехтування активним опором обмотки, може бути описана схемою заміщення, наведеною на рис. 10.3,а. Синусоїдальна напруга джерела живлення U компенсується ЕРС E , яка індукується в нерухомій обмотці під дією обертання ротора, а також падінням напруги на реактивному синхронному опорі X_c при протіканні струму I . Відповідна векторна діаграма, що ілюструє ці процеси, представлена на рис. 10.3,б.

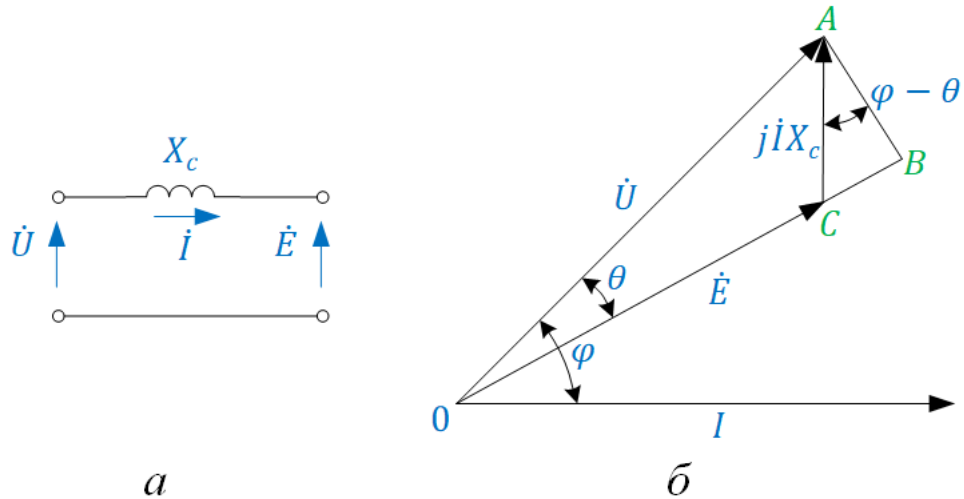


Рис.10.3 Схема заміщення фази статора (а) та векторна діаграма СД (б)

Електромагнітна потужність синхронної машини визначається за відповідним виразом.

$$P_1 \approx mUI \cos \varphi = M \cdot \omega_0. \quad (10.1)$$

Використовуючи векторну діаграму, наведену на рис. 10.3,б, можна визначити параметри неявнополюсної машини:

$$U \cos \varphi = E \cos(\varphi - \theta). \quad (10.2)$$

Використавши трикутник ABC , визначимо:

$$\cos(\varphi - \theta) = \frac{AB}{AC} = U \frac{\sin \theta}{IX_c}; \quad (10.3)$$

$$U \cos \varphi = EU \frac{\sin \theta}{IX_c}.$$

Вираз для визначення електромагнітного моменту двигуна:

$$M = \frac{P_1}{\omega_0} = \frac{3UE}{\omega_0 X_c} \sin \theta = M_{max} \sin \theta. \quad (10.4)$$

Отже, електромагнітний момент синхронної машини залежить від кута навантаження θ , а її максимальний момент M_{max} при фіксованих напрузі та частоті пропорційний ЕРС, тобто струму збудження. Зазвичай кут навантаження становить приблизно $\theta = 20 \dots 30^\circ$, тому перевантажувальна здатність синхронної машини визначається відповідним співвідношенням:

$$\lambda = \frac{\sin \theta_{max}}{\sin \theta_H} = \frac{1}{\sin \theta_H} \quad (10.5)$$

і досягає значень 3...4.

У разі явнополюсного ротора до основного моменту (рис. 10.4, а, крива 1) додається реактивна складова, пропорційна $\sin 2\theta$ (крива 2), яка змінюється з подвійною частотою і вираз для розрахунку електромагнітного моменту визначається:

$$M = \frac{mU^2}{2\omega_0} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta, \quad (10.6)$$

де X_q та X_d – синхронні індуктивні опори по поперечній і повздовжній вісях. У разі, якщо ротор має неявнополюсну конструкцію, $X_q = X_d = X_c$.

Характеристика залежності моменту від кута навантаження для явнополюсної машини $M = f(\theta)$ має дещо спотворену форму, але залишається наближено синусоїдальною (крива 3) і описується виразом:

$$M = \frac{m}{\omega_0} \left[\frac{UE}{X_d} \sin \theta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \right]. \quad (10.7)$$

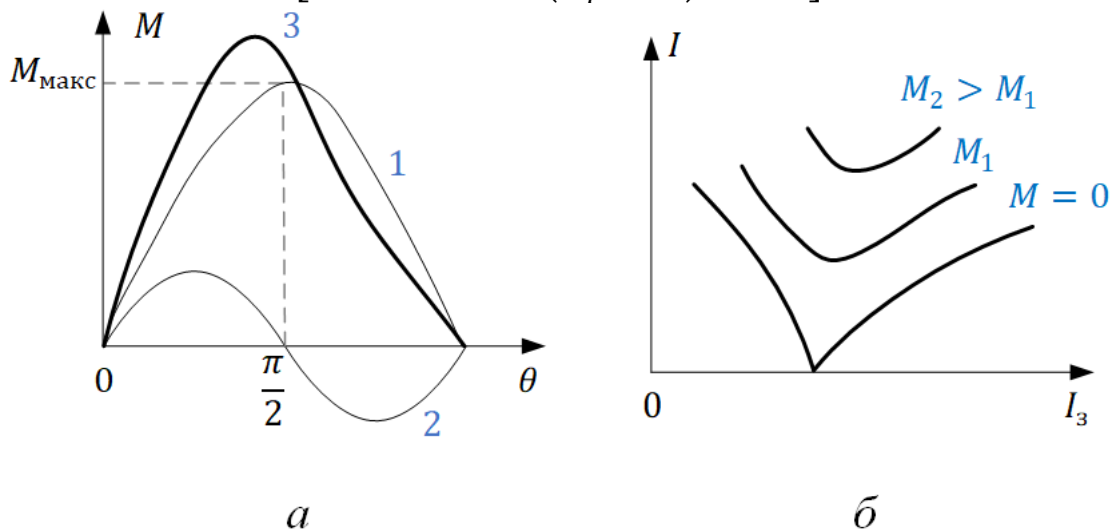


Рис.10.4 Характеристики явнополюсної машини (а); залежність струму статора від струму збудження (б)

Перевищення навантаження $M > M_{max}$ призводить до перекидання синхронної машини, тобто вона випадає із синхронізму, внаслідок чого синхронна машина переходить на пускову характеристику.

Синхронна машина має залежність струму статора I від струму збудження I_f , що має вигляд V-подібної кривої (рис. 10.4, б). Така форма пояснюється тим, що при зміні струму збудження змінюється реактивна складова струму статора і її знак.

Якщо двигун працює з відстаючим струмом, то збільшення збудження може підвищити $\cos \varphi$, а реактивну потужність зменшити. При $\cos \varphi = 1$, тобто при $\varphi = 0$, реактивна потужність дорівнює нулю. Подальше збільшення струму призводить до того, що кут зсуву стає випереджаючим, і двигун, окрім основної функції, виконує роль синхронного компенсатора.

Синхронний двигун має два **режими гальмування**: рекуперації та динамічного гальмування. Рекуперація для СД – це режим пригальмовування. При зменшенні швидкості двигун випадає із синхронізму і працює як

асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, але з більшим пусковим струмом. Тому зазвичай СД гальмується в режимі вільного вибігу, тобто просто відключається від мережі.

У режимі динамічного гальмування обмотка статора відключається від мережі та замикається на реостат. Режим роботи та характеристики при цьому подібні до роботи асинхронного двигуна в режимі динамічного гальмування.

Електропривод на основі синхронного двигуна має такі **особливості**:

– Фіксована кількість швидкостей, що визначається числом пар полюсів двигуна. При живленні від мережі з частотою $f = 50$ Гц синхронна швидкість може бути 3000, 1500, 1000, 750, 600... об/хв, залежно від конструкції машини.

– Абсолютно жорсткі характеристики – робота з постійною синхронною швидкістю.

– Високі енергетичні характеристики (ККД і $\cos \varphi$).

– Можливість змінювати величину реактивної потужності, яку споживає СД, та її знак завдяки обмотці збудження, що дозволяє використовувати машину як керований компенсатор реактивної потужності.

– Найвища перевантажувальна здатність серед всіх електричних машин, обумовлена величиною кута навантаження.

– Лінійна залежність моменту від величини напруги живлення.

– Висока надійність, що забезпечується більшим повітряним зазором, особливо у безконтактних синхронних машинах (з постійними магнітами – PMSM Permanent Magnet Synchronous Motor).

До розвитку напівпровідникових силових ключів СД використовувалися переважно в потужних установках, де не було потреби в регулюванні швидкості, або в малопотужних установках систем автоматики.

Однак завдяки новітнім матеріалам (постійним магнітам на основі неодиму, кобальту) і засобам керування (високовольтні ключі, що здатні комутувати значні струми) електроприводи з СД стали керованими, що значно розширило їхній діапазон потужностей і дозволило зайняти лідируючі позиції в верстатобудуванні, робототехніці, гнучких виробничих системах, сучасному тяговому електротранспорті, потужних насосних установках тощо.

3.2.2. Синхронна машина як компенсатор реактивної потужності

Функціонування системи електропостачання супроводжується споживанням електроприймачами реактивної потужності, що призводить до додаткових енергетичних втрат, зниження рівня напруги та потреби у збільшенні пропускної здатності підстанцій і розподільних мереж, що негативно впливає на економічну ефективність системи.

Для усунення негативних наслідків споживання реактивної потужності необхідно здійснювати її компенсацію. Один із ефективних методів – використання синхронної машини, яка шляхом регулювання струму збудження може генерувати реактивну потужність у мережу. У такому режимі синхронний двигун працює з випереджаючим коефіцієнтом потужності.

Здатність СД виконувати функцію джерела або компенсатора реактивної потужності ілюструють V-подібні характеристики (рис.10.5, а), що показують залежність струму статора та коефіцієнта потужності від струму збудження ($I_1(I_3)$ та $\cos \varphi(I_3)$) за незмінних значень напруги, частоти та активної потужності

($U = const; f = const; P_1 = const$). Мінімальне значення струму статора відповідає максимальному коефіцієнту потужності, який дорівнює одиниці, що пояснюється векторною діаграмою синхронного двигуна.

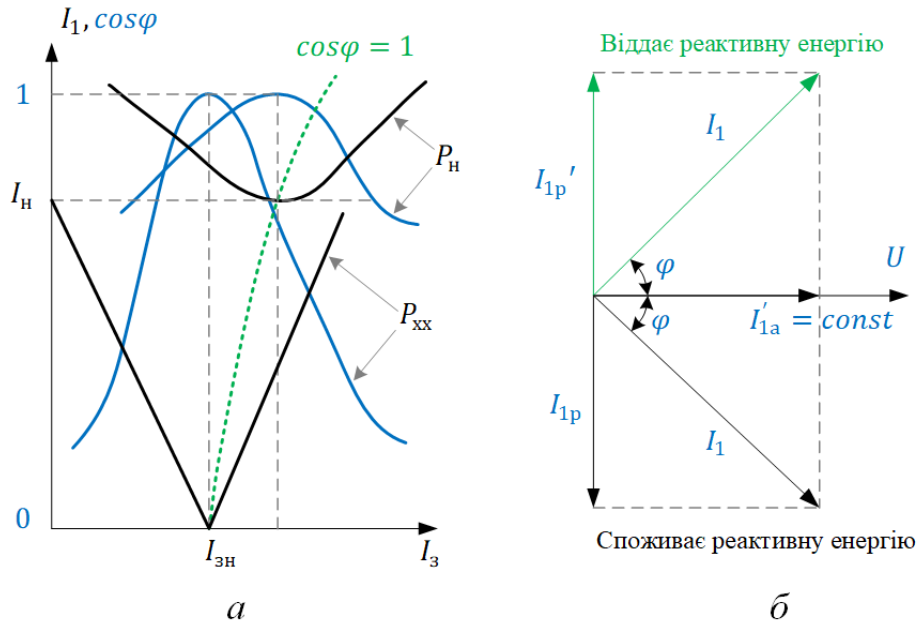


Рис.10.5 Залежність струму статора і $\cos \varphi$ від струму збудження (а); векторна діаграма (б)

При малих струмах збудження струм статора I_1 відстає від напруги U на кут φ , що означає роботу синхронного двигуна з відстаючим коефіцієнтом потужності та споживанням реактивної потужності з мережі. Активна складова струму $I_{1a} = I_1 \cos \varphi$ має той самий напрямок, що й напруга мережі U , тоді як реактивна складова I_{1p} відстає від неї на 90° , що і зумовлює споживання реактивної потужності.

У більшості випадків синхронний двигун працює при стабільному навантаженні, отримуючи активну потужність із мережі:

$$P_1 = mUI_1 \cos \varphi = mUI_{1a} . \quad (10.8)$$

З цього виразу випливає, що при постійній активній потужності $P_1 = const$ і незмінному значенні струму $I_{1a} = const$ зі збільшенням струму збудження синхронного двигуна кінець вектора повного струму I_1 буде підніматися вздовж штрихової вертикальної лінії (рис. 10.5,б). Це свідчить про зменшення реактивної складової струму. При певному значенні струму збудження, наближеному до номінального, реактивна складова зникає, тобто струм статора стає рівним активній складовій I_{1a} . У цьому режимі досягається мінімальне значення кривих $I_1(I_3)$ і максимальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 1$.

При подальшому збільшенні струму збудження (перезбудженні синхронного двигуна) знову виникає реактивна складова струму I_{1p}' , але тепер вона випереджає напругу мережі на 90° . Струм статора I_1' також випереджатиме напругу, і синхронний двигун працюватиме з випереджаючим коефіцієнтом потужності, віддаючи реактивну енергію в електромережу.

На рисунку 10.5,а зображені залежності для двох рівнів навантаження – номінального (P_H) і холостого ходу (P_X). Область характеристик праворуч від штрих-пунктирної лінії $\cos \varphi = 1$ відповідає роботі синхронного двигуна з випереджаючим коефіцієнтом потужності, а ліворуч – з відстаючим. Із графіка видно, що зі збільшенням потужності навантаження зона генерації реактивної потужності (випереджаючого $\cos \varphi$) зміщується в область вищих струмів збудження. Отже, якщо двигун працює при змінному навантаженні, для максимальної ефективності його компенсаційних властивостей необхідне регулювання струму збудження, що, у свою чергу, збільшує габаритну потужність машини, оскільки:

$$\frac{S}{P} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{P} = \sqrt{1 + \left(\frac{Q}{P}\right)^2}. \quad (10.9)$$

Якщо необхідно забезпечити випереджальну реактивну потужність, яка становить 40% від активної потужності ($Q/P = 0,4$), то розрахунки показують, що відношення повної потужності до активної $S/P = 1,08$. Це означає, що для генерації такої реактивної потужності потрібно лише на 8% більше габаритної потужності. Визначення величини споживаної реактивної потужності синхронного двигуна здійснюється за формулою:

$$Q = mUI_1 \sin \varphi. \quad (10.10)$$

Для явнополюсного СД вираз набуває вигляду:

$$Q = mU \left[\frac{E \cos \theta}{X_d} - U \left(\frac{\cos^2 \theta}{X_d} + \frac{\sin^2 \theta}{X_q} \right) \right], \quad (10.11)$$

де X_d та X_q – індуктивні опори синхронного двигуна за поздовжньою та поперечною осями.

У випадку неявнополюсного двигуна ці опори рівні, що спрощує його аналіз та розрахунок параметрів:

$$Q = \frac{mU}{X_c} (E \cos \theta - U). \quad (10.12)$$

Вищезазначені вирази підтверджують, що зі збільшенням струму збудження та, відповідно, ЕРС, зростає генерована реактивна потужність двигуном. Це значення залежить від навантаження, що визначає кут навантаження θ .

Контрольні запитання

1. Чим конструктивно СД відрізняється від асинхронних двигунів? Навести вираз для визначення синхронної швидкості СД. Накреслити природню механічну характеристику для СД.

2. Для чого в синхронних двигунах у роторі встановлюють додаткову обмотку типу біляча клітина? Накреслити пускові характеристики СД.

3. Від чого залежить електромагнітний та максимальний моменти СД? Записати вираз для визначення електромагнітного моменту двигуна і його перевантажувальної здатності.

4. Що відбудеться із СД, якщо момент навантаження перевищить максимальний момент СД?

5. В яких гальмівних режимах може працювати СД?

6. Чому в СД більший повітряний зазор, ніж у асинхронних двигунів?

7. Що таке V-подібні характеристики СД? Накреслити V-подібні характеристики та залежність коефіцієнту потужності від струму збудження для холостого ходу і номінального навантаження.

8. За якої умови СД може генерувати реактивну потужність у мережу? Накреслити векторну діаграму.

9. Чому при роботі СД в якості компенсатора реактивної потужності необхідно збільшувати габаритну потужність? Записати відношення повної потужності до активної.

Рекомендована література

[2] – с. 44-52

Розділ 4. ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ В СТАТИЧНОМУ РЕЖИМІ

Лекція 11. Енергетичні характеристики електропривода в статичному режимі. Втрати потужності в електроприводі.

Тема 4.1. Втрати потужності в нерегульованому електроприводі

Тема 4.2. Коефіцієнт потужності електропривода

Тема 4.3. Енергетичні характеристики регульованих електроприводів у статичному режимі, енергетичні характеристики механічних перетворювачів у статичних режимах.

4.3.1 Регульований електропривод із ДПС незалежного збудження

4.3.2. Регульований електропривод з асинхронним двигуном

4.3.3. Енергетичні показники механічних перетворювачів у статичних режимах.

Тема 4.1. Втрати потужності в нерегульованому електроприводі

Втрати потужності в електричній машині можна розділити на постійні та змінні:

$$\Delta P = K + V. \quad (11.1)$$

Постійні втрати потужності не залежать від струму двигуна чи навантаження і включають втрати:

– у сталі (K_c);

– механічні втрати через тертя в підшипниках і вентиляцію (K_m);

– втрати від струму збудження (K_3).

Втрати в сталі залежать від амплітуди та частоти зміни магнітного потоку:

$$K_c = K_{cH} \left(\frac{f}{f_H} \right)^\beta \left(\frac{\Phi}{\Phi_H} \right)^2, \quad (11.2)$$

де K_{cH} – втрати при номінальній частоті обертання двигуна; $\beta = 1,2 \div 1,5$ – коефіцієнт, який залежить від марки електротехнічної сталі.

Механічні втрати визначаються кутовою швидкістю обертання двигуна:

$$K_m = K_{mH} \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^n, \quad (11.3)$$

де $n = 1 \div 2$.

Втрати в колі збудження:

$$K_3 = I_3^2 r_3. \quad (11.4)$$

Втрати потужності від струму збудження для двигуна постійного струму з незалежним збудженням визначаються через опір і струм обмотки збудження:

$$K_B = 3I_\mu^2 r_1, \quad (11.5)$$

де r_1 – активний опір обмотки статора.

Постійні втрати в асинхронному двигуні включають механічні втрати K_m , втрати в сталі статора K_{c1} та ротора K_{c2} , а також втрати в міді обмотки статора, які спричинені струмом намагнічування I_μ :

$$K = K_m + K_{c1} + K_{c2} + 3I_\mu^2 r_1. \quad (11.6)$$

Змінні втрати обумовлені втратами в міді обмоток двигуна, що виникають через струм навантаження, який змінюється. **Для двигунів постійного струму** ці втрати залежать від величини струму навантаження:

$$V = I^2 r_\gamma = I_H^2 r_\gamma \left(\frac{I}{I_H}\right)^2 = V_H \left(\frac{I}{I_H}\right)^2, \quad (11.7)$$

де $V_H = I_H^2 r_\gamma$ - номінальні змінні втрати.

Для асинхронних двигунів змінні втрати включають втрати в обмотках статора та ротора, за винятком втрат, що виникають через струм намагнічування.

$$V = V_1 + V_2 = 3I_1^2 r_1 + 3(I_2')^2 r_2' = 3(I_2')^2 \left(r_2' + \frac{r_1}{\sigma^2}\right), \quad (11.8)$$

де V_1, V_2 - втрати в міді статора і ротора; I_2', r_2' - струм і опір ротора, приведені до обмотки статора; $\sigma = \frac{I_2'}{I_1}$.

В такому випадку:

$$V = 3(I_{2H}')^2 \left(r_2' + \frac{r_1}{\sigma_H^2}\right) \left(\frac{I_2'}{I_{2H}'}\right)^2 = V_H \left(\frac{I_2'}{I_{2H}'}\right)^2, \quad (11.9)$$

де $V_H = 3(I_{2H}')^2 \left(r_2' + \frac{r_1}{\sigma_H^2}\right)$ - номінальні змінні втрати; $\sigma_H = \frac{I_{2H}'}{I_{1H}} \approx 0,85 \div 0,95$.

Змінні втрати потужності **для синхронних двигунів**:

$$V = 3I_1^2 r_1 = 3I_{1H}^2 r_1 \left(\frac{I_1}{I_H}\right)^2 = V_H \left(\frac{I_1}{I_H}\right)^2. \quad (11.10)$$

Якщо позначити кратність струму двигунів через X , то змінні втрати потужності для різних двигунів можна визначити як пропорційні квадрату цієї кратності:

$$V = V_H X^2. \quad (11.11)$$

Можна виразити **повні втрати потужності** в електромеханічному перетворювачі за допомогою коефіцієнта втрат $a = K/V_H$, для двигунів загальнопромислового виконання $a \approx 0,5 \div 2$:

$$\Delta P = K + V_H X^2 = V_H (a + X^2). \quad (11.12)$$

Втрати потужності в номінальному режимі роботи ($X = 1$) визначаються згідно з паспортними даними двигуна:

$$\Delta P_H = P_H \frac{1 - \eta_H}{\eta_H}. \quad (11.13)$$

Постійні втрати потужності в номінальному режимі роботи:

$$K = \Delta P_H - V_H. \quad (11.14)$$

Аналіз енерговикористання двигуна як електромеханічного перетворювача енергії показує, що рівень енергетичних втрат залежить як від режиму споживання енергії, так і від якості електроенергії, яка до нього

підведена. Втрати потужності в електричній машині постійного струму становлять:

$$\Delta P = K_M + K_C + K_3 + V. \quad (11.15)$$

Окрім першої складової, ці втрати можна віднести до категорії втрат, що спричиняють нагрів, визначаючи тепловий режим електричної машини. Оскільки струм якоря залежить від статичного моменту і магнітного потоку, для кожного статичного навантаження існує струм збудження, при якому сумарні втрати є мінімальними. Однак пошук мінімуму сумарних втрат призводить до перерозподілу втрат між активними частинами електричної машини, в результаті чого деякі з них виявляються в більшому температурному полі, ніж без оптимізації, що впливає на працездатність двигуна. Це особливо помітно для машин, які були відремонтовані з частковою або повною заміною обмотки якоря.

Ремонтні роботи, підготовка до ремонту та експлуатація призводять до зниження результуючої індукції після кожного ремонту. Це супроводжується зростанням складових втрат, викликаних вихровими струмами. Дослідження показали, що кожен наступний ремонт збільшує втрати в сталі на 5–13%. Зростання втрат в основному спостерігається в місцях локальних або розподілених дефектів у верхній частині зубців, що призводить до значного збільшення теплової напруженості та швидкого порушення ізоляції. У електричних машинах змінного струму причина збільшення втрат залишається незмінною, але їх перерозподіл значною мірою залежить від зміни характеристик електротехнічної сталі та режиму напруги живлення. Встановлено, що ремонт асинхронних двигунів масових серій призводить до зниження їх надійності.

У високовольтних електричних машинах, коли виникає несправність, відключається частина секцій обмотки статора, що змінює режим роботи двигуна, роблячи його несиметричним за конструкцією. Встановлено, що неякісна напруга живлення та несиметричність конструкції є основними причинами виникнення вібрацій обмотки й інших частин двигуна. Вібрації призводять до передчасного зношування механічної частини, зокрема підшипників.

Втрати енергії під час роботи двигуна з постійним навантаженням визначаються як добуток потужності втрат на час роботи:

$$\Delta W = \Delta P t_p. \quad (11.16)$$

Під час роботи двигуна з циклічним навантаженням втрати енергії визначаються:

$$\Delta W = \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P(t) dt \approx \sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i, \quad (11.17)$$

де $\Delta P_i t_i$ – втрати потужності і час роботи при навантаженні $X_i = I_i / I_N$; n – число значень навантаження на окремих ділянках; $\sum_{i=1}^n t_i = t_{\text{ц}}$ – час циклу.

Тема 4.2. Коефіцієнт потужності електропривода

Електропривод змінного струму споживає активну потужність P і реактивну потужність Q з мережі. Активна потужність витрачається на виконання корисної роботи та покриття втрат в електроприводі, в той час як реактивна потужність використовується для створення обертового магнітного поля двигуна і не бере участі безпосередньо в корисній роботі.

Коефіцієнт потужності електропривода визначається:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \quad (11.18)$$

де S – повна; P – активна; Q – реактивна потужності.

Кут φ визначає фазовий зсув між напругою мережі та струмом електропривода. Коли електропривод споживає реактивну потужність, це додатково навантажує систему електропостачання, спричиняючи додаткові втрати напруги та енергії в її компонентах. Якщо електропривод працює в циклі при різних навантаженнях чи швидкостях, він характеризується середньозваженим або цикловим коефіцієнтом потужності, який обчислюється як відношення спожитої активної енергії за цикл W_a до загальної спожитої енергії W :

$$\cos\varphi = \frac{W_a}{W} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i \sqrt{P_i^2 + Q_i^2}}. \quad (11.19)$$

Активна і реактивна потужність асинхронного двигуна:

$$\begin{aligned} P &= M\omega_0 + 3I_1^2 r_1; \\ Q &= 3I_\mu^2 x_\mu + 3I_1^2 x_1 + 3(I_2')^2 x_2'. \end{aligned} \quad (11.20)$$

Для більшості асинхронних двигунів $\cos\varphi_n \approx 0,8 \div 0,9$. У таких випадках реактивна потужність становить від 0,5 до 0,75 від активної потужності, тобто на кожен кіловат активної потужності АД споживає від 0,5 до 0,75 квар реактивної потужності. Чим нижчий $\cos\varphi$, тим більше реактивної потужності споживає двигун, що призводить до додаткового навантаження на мережу, збільшуючи струм і втрати в ній.

Коефіцієнт потужності асинхронного двигуна значною мірою залежить від його навантаження. При відсутності навантаження коефіцієнт потужності є низьким, оскільки реактивна потужність переважає над активною. З підвищенням навантаження зростає також і $\cos\varphi$, досягаючи свого максимального значення при наближенні до номінального навантаження. Залежність $\cos\varphi$ від кратності механічного навантаження для двигунів серії 4А при різних рівнях номінального коефіцієнта потужності $\cos\varphi_n$ показана на рисунку 11.1

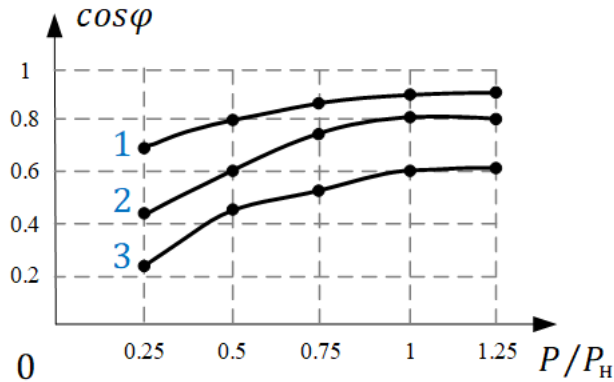


Рис.11.1. Залежність коефіцієнту потужності від навантаження АД ($1 - \cos \varphi_n = 0,9$; $2 - \cos \varphi_n = 0,8$; $3 - \cos \varphi_n = 0,7$).

Асинхронні двигуни є головними споживачами реактивної потужності в електричних мережах.

Для зменшення споживання реактивної потужності асинхронними двигунами та підвищення коефіцієнта потужності необхідно виконати наступне:

- Замінити малозавантажені асинхронні двигуни на двигуни меншої потужності. Така заміна дозволить новому двигуну працювати при більших навантаженнях і з вищим значенням коефіцієнта потужності. Крім того, ККД повністю завантаженого двигуна буде вищим.

- Знизити напругу в асинхронному двигуні, що працює із малим навантаженням. Це призведе до зменшення споживаного струму та реактивної потужності, а також підвищить коефіцієнт потужності. Такий ефект можна досягти за допомогою регулятора напруги або перемикачів обмотки статора з схеми трикутника на зірку, що зменшує напругу на кожній фазі в 1,73 рази.

- Обмежити час роботи двигуна без навантаження.

- Застосувати синхронні двигуни замість асинхронних.

- Використовувати компенсаційні пристрої, такі як конденсаторні батареї та синхронні двигуни.

Тема 4.3. Енергетичні характеристики регульованих електроприводів у статичному режимі, енергетичні характеристики механічних перетворювачів у статичних режимах.

4.3.1 Регульований електропривод із ДПС незалежного збудження

При визначенні енергетичних показників регульованих приводів слід враховувати, що:

- зміна швидкості двигуна призводить до зміни постійних втрат у двигуні, особливо при регулюванні струму збудження в двигунах постійного струму;

– наявність силового перетворювача додає додаткові втрати потужності в перетворювачі та двигуні;

– перетворювач споживає реактивну потужність і може викликати спотворення синусоїдальної форми кривої напруги і струму.

За критерієм втрат потужності способи регулювання швидкості можуть бути економічними (із низькими втратами) та неекономічними. До економічних відноситься регулювання швидкості двигунів постійного струму за допомогою керованих перетворювачів.

Постійні втрати двигуна постійного струму:

$$K = K_c + K_{\text{MH}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{H}}} \right)^2 + K_3. \quad (11.21)$$

Змінні втрати в якірному колі:

$$V = I^2 r_{\text{я}} = M(\omega_{0p} - \omega), \quad (11.22)$$

де ω_{0p} – швидкість ідеального неробочого ходу при роботі двигуна на регулювальній (штучній) характеристиці.

При регулюванні швидкості реостатним способом змінні втрати збільшуються пропорційно відносному змінюванню швидкості:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (11.23)$$

Сумарні втрати потужності в двигуні визначаються, як:

$$\Delta P = K_c + K_{\text{MH}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{H}}} \right)^2 + K_3 + M(\omega_{0p} - \omega). \quad (11.24)$$

При регулюванні швидкості за допомогою перетворювача необхідно враховувати втрати в перетворювачі. Постійні втрати $K_{\text{п}}$ включають втрати в сталі силового трансформатора та реакторів. Змінні втрати перетворювача визначаються втратами в міді обмоток трансформатора, реактора та силових ключів:

$$V_{\text{п}} = 3I_1^2 r_1 + 3I_2^2 r_2 + \Delta P_p + \Delta P_{\text{BH}}, \quad (11.25)$$

де I_1 та I_2 – первинний і вторинний струми трансформатора.

При регулюванні швидкості ДПС змінюванням струму збудження змінюються постійні втрати, зокрема втрати від струму збудження та втрати в сталі:

$$\Delta P = I_3^2 r_3 + K_{\text{CH}} \left(\frac{f}{f_{\text{H}}} \right)^{\beta} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{H}}} \right)^2 + K_{\text{MH}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{H}}} \right)^2 + M(\omega_{0p} - \omega). \quad (11.25)$$

4.3.2. Регульований електропривод з асинхронним двигуном

При реостатному регулюванні втрати в магнітопроводі змінюються в залежності від ковзання:

$$K_c \approx K_{c1\text{H}} (1 - s^{1,3}). \quad (11.26)$$

Зі зменшенням швидкості збільшення втрат у сталі компенсується зменшенням механічних втрат, тому постійні втрати залишаються майже незмінними.

Змінні втрати потужності можна визначити за виразом:

$$V = V_1 + V_2 = M\omega_0 s + M\omega_0 s \frac{r_1}{r_2}. \quad (11.27)$$

При частотному регулюванні швидкості АД робоче ковзання двигуна залишається малим протягом всього діапазону регулювання. Тому втрати в сталі ротора через низьку частоту можна ігнорувати, а регулювання здійснюється за законом $U/f = const$, тому втрати в сталі можна визначити:

$$K_c \approx K_{c1H} \left(\frac{f}{f_H} \right)^{3,3}. \quad (11.28)$$

Експериментальні дослідження показали, що при живленні АД від перетворювача частоти з несинусоїдальною напругою виникають додаткові втрати, які впливають на нагрівання, припустиме навантаження, робочі характеристики та інші параметри двигунів. Наприклад, при частоті $f = 50$ Гц втрати в сталі статора збільшуються на 30%, струм неробочого ходу – на 32%, ККД знижується на 1,5%, коефіцієнт потужності – на 0,05, струм у обмотці статора в робочому режимі зростає на 8%, а ковзання – на 3%. На рис.11.2 наведено гранично припустиме навантаження двигуна, рекомендоване заводом ХЕМЗ.

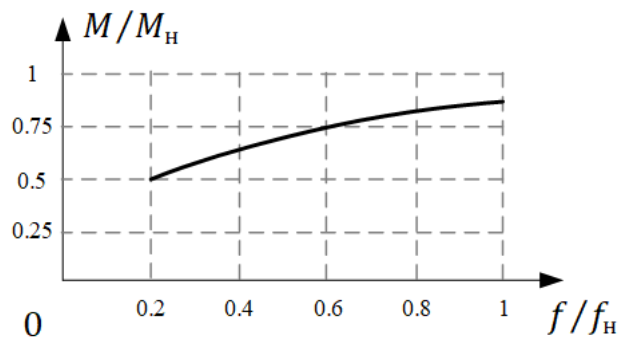


Рис.11.2. Гранично припустиме навантаження двигуна, рекомендоване заводом виробником

З графіка видно, що в номінальному режимі двигун розвиває потужність на 15% меншу, ніж при живленні від мережі із синусоїдальною напругою. При частоті 10 Гц момент, що розвивається двигуном, складає половину від номінального, а потужність – лише 10% від номінальної. ККД становить лише 72% від ККД при $f = 50$ Гц. Також спостерігається зниження максимального моменту на 10-20% при $f > 25$ Гц.

4.3.3. Енергетичні показники механічних перетворювачів у статичних режимах.

Енергетичні втрати в механічній частині електропривода виникають через тертя між елементами, що взаємно переміщуються, а також через передатні та виконавчі механізми. Існує два типи тертя:

- ковзання;
- кочення.

Тертя ковзання виникає через взаємодію нерівностей елементів, які ковзають один відносно одного в механізмах (рис.11.3, а).

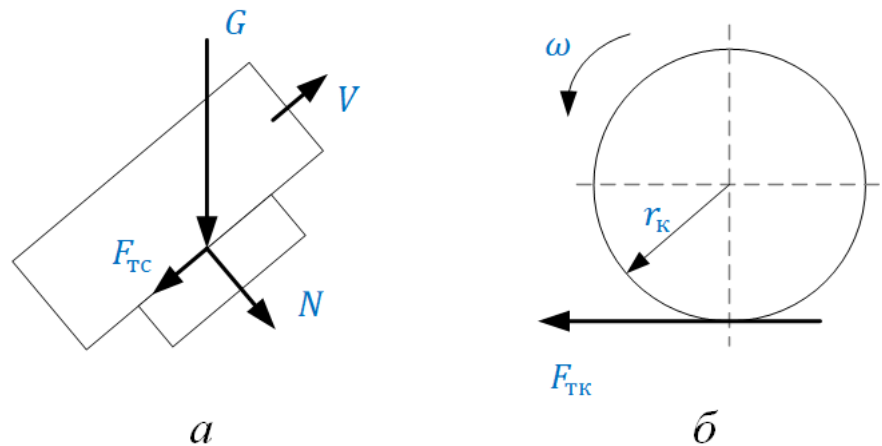


Рис.11.3. Сили тертя при ковзанні (а) та коченні (б)

Сили тертя, які виникають як реакція на взаємний рух, залежать від матеріалів, з яких виготовлені взаємодіючі деталі, а також від сили, що діє перпендикулярно лінії взаємодії – сили нормального тиску N . Тертя ковзання характерне для підшипників ковзання, направляючих ліфтових установок та інших механізмів.

Коефіцієнт тертя ковзання визначається відношенням:

$$\mu = \frac{F_{Тс}}{N}, \quad (11.29)$$

де $F_{Тс}$, N – відповідно сили тертя ковзання і нормального тиску.

Тертя кочення виникає при коченні круглих тіл по поверхнях. При цьому утворюється сила, дотична до твірної тіла, що котиться, яка визначає момент опору щодо осі обертання (рис. 11.3, б).

Тертя кочення виникає в підшипниках кочення, механізмах переміщення на колісному ході, кулькових і роликів опорках. Великою, що характеризує опір при коченні, є момент тертя щодо осі обертання тіла, яке котиться. Діаметр тіла, що котиться (плече моменту тертя кочення), при заданій силі визначає момент – чим більше плече, тим більший момент. З іншого боку, при більшому діаметрі зменшується крутизна змінання, що перешкоджає коченню. Тому момент тертя залежить у першому наближенні лише від матеріалів взаємодіючих тіл і нормального тиску між ними:

$$f_{Тк} = \frac{M_{Тк}}{N}, \quad (11.30)$$

де $M_{Тк}$ – момент тертя кочення, $M_{Тк} = F_{Тк} r_{Тк}$.

Сили, що виникають від тертя, визначають втрати енергії під час взаємного переміщення дотичних деталей механізму. Втрати потужності при цьому залежать також від відносної швидкості переміщення цих деталей:

$$\begin{aligned} \Delta P &= F_{Тс} V'; \\ \Delta P &= M_{Тк} \omega'; \end{aligned} \quad (11.31)$$

де V' , ω' – відносні лінійна і кутова швидкості поверхонь тертя.

У будь-якому механізмі, навіть без передачі чи перетворення енергії, діють внутрішні сили (сили ваги, сили конструктивних з'єднань деталей тощо), що призводить до тертя і втрат енергії навіть при неробочому русі. Під час передачі і перетворення енергії нормальні зусилля збільшуються, що, у свою чергу, призводить до зростання сил і моментів тертя, а отже, й втрат. Тому моменти тертя можна описати лінійною залежністю від корисних моментів:

$$M_{\text{тр}} = M_x + bM_{\text{кор}}, \quad (11.32)$$

де M_x – момент, що виникає внаслідок сил тертя при неробочому ході; b – коефіцієнт пропорційності, який визначає збільшення втрат на тертя при корисному навантаженні для цього механізму.

При розрахунку втрат у механічній частині електропривода використовують не значення сил тертя та моментів в окремих елементах механізму, а інтегральну оцінку співвідношення між корисними моментами і відповідними втратами на тертя:

$$\eta = \frac{M_{\text{кор}}}{M_{\text{кор}} + M_{\text{тр}}}. \quad (11.33)$$

Для даного класу механізмів конструктори-механіки визначають залежність ККД від навантаження, за допомогою якої розраховуються значення M_0 та b . Номінальні значення ККД деяких механічних передач представлені в таблиці 11.1.

Таблиця 11.1 – Номінальні значення ККД для механічних передач

Вид передачі	Тип передачі		ККД
Зубчасті колеса на підшипниках кочення	Закрита з рідким мастилом	Циліндрична	0,97 ÷ 0,99
		Конічна	0,96 ÷ 0,98
	Відкрита з консистентним змащенням	Циліндрична	0,95 ÷ 0,97
		Конічна	0,94 ÷ 0,95

Контрольні запитання

1. На які складові поділяються втрати в електричній машині? Що включають в себе постійні втрати в двигуні?
2. Навести вирази змінних втрат в ДПС, АД та СД.
3. Що таке коефіцієнт потужності електропривода? Навести вирази для розрахунку коефіцієнту потужності в загальному вигляді та при роботі електропривода в циклічному режимі.
4. Які існують рекомендації для асинхронних електроприводів для зменшення споживання реактивної потужності?
5. Чим визначаються сумарні втрати потужності в ДПС?
6. Навести вираз для постійних втрат в магнітопроводі АД при реостатному регулюванні та скалярному частотному регулюванні.
7. Які існують типи тертя? Навести вирази для коефіцієнтів тертя ковзання і кочення.
8. Як в першому наближенні визначають момент тертя в залежності від моменту навантаження?

Рекомендована література

[1] – с. 108-112; 114-122

Лекція 12. Розрахунок потужності електропривода. Розрахунок потужності і вибір електродвигунів.

Тема 4.4. Розрахунок потужності і вибір електродвигунів

Тема 4.5. Перевірка двигунів по нагріванню прямим методом

Тема 4.6. Перевірка двигунів по нагріванню непрямими методами

4.6.1. Метод середніх втрат

4.6.2. Методи еквівалентних величин

Тема 4.4. Розрахунок потужності і вибір електродвигунів

Основною вимогою при виборі електродвигуна є відповідність його потужності вимогам технологічного процесу робочої машини. Використання двигуна із недостатньою потужністю може спричинити порушення технологічного режиму, зниження продуктивності, надмірне нагрівання, швидке старіння ізоляції та вихід двигуна з ладу.

Так само неприпустимим є вибір двигуна із завищеною потужністю, оскільки це призводить до збільшення вартості привода, зростання втрат електроенергії через зниження ККД двигуна, а для асинхронного електропривода ще й до зменшення коефіцієнта потужності.

Коефіцієнт завантаження двигуна визначається за формулою:

$$k_3 = \frac{P_\phi}{P_H} \approx \frac{P_M}{P_{HM}}, \quad (12.1)$$

де P_ϕ – фактична потужність, яку розвиває привод; P_M – потужність, споживана з мережі при заданому навантаженні (визначається за показниками приладів протягом періоду роботи).

Номінальною вважається потужність, яку двигун споживає з мережі при номінальному навантаженні:

$$P_{HM} = \frac{P_H}{\eta}, \quad (12.2)$$

де η – коефіцієнт корисної дії системи електропривода.

Нормативні документи Міністерства енергетики України рекомендують:

- при $0 < k_3 < (0,4 \dots 0,5)$ слід замінити двигун на менш потужний;
- при $(0,4 \dots 0,5) < k_3 < (0,7 \dots 0,75)$ необхідність зменшення потужності привода повинна бути обґрунтована розрахунками;
- при $(0,7 \dots 0,75) < k_3 < 0,9$ потужність привода вибрана правильно.

Обмеження максимального значення k_3 на рівні 0,9 дозволяє уникнути можливого перевантаження двигуна при зниженні напруги живлення.

На рис. 12.1 представлена усереднена залежність ККД від коефіцієнта завантаження, що демонструє низьку ефективність роботи привода при малих значеннях k_3 .

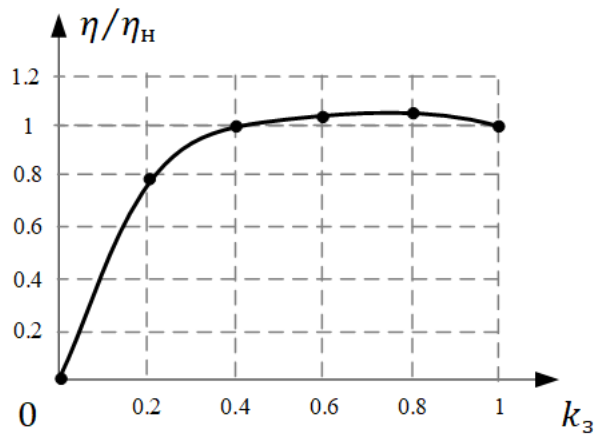


Рис.12.1. Усереднена залежність ККД від коефіцієнта завантаження

Величину зекономленої електроенергії, досягнуту завдяки збільшенню завантаження машин, можна визначити за допомогою рис. 12.2. У цьому випадку k_W – коефіцієнт зростання питомої витрати електроенергії:

$$k_W = \frac{W_\phi}{W_0}, \quad (12.3)$$

де W_ϕ – фактична питома витрата електроенергії за заданий період часу (кВт·год/год, доба тощо); W_0 – питома витрата електроенергії за умови відсутності холостого ходу та завантаження $k_z = 1$.

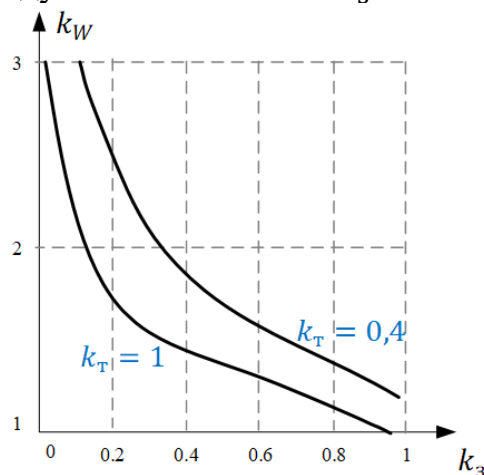


Рис.12.2. Залежність коефіцієнта зростання питомої витрати електроенергії від коефіцієнта завантаження двигуна

Коефіцієнт використання двигуна розраховується за виразом:

$$k_T = \frac{t_H}{t_H + t_X}, \quad (12.4)$$

де t_H – час роботи під навантаженням, год; t_X – час холостого ходу, год.

Якщо заміна малозавантажених двигунів неможлива, слід оцінити доцільність зниження напруги на їх затискачах. Зменшення напруги живлення АД сприяє зниженню споживання реактивної потужності (через зменшення струму намагнічування), що призводить до підвищення $\cos\phi$. Одночасно з цим

зменшуються витрати активної потужності, що сприяє підвищенню ККД двигуна.

Можливі способи зниження напруги малозавантажених АД:

- перемикання статорної обмотки з «трикутника» на «зірку»;
- секціонування статорних обмоток;
- зниження напруги в силових колах підприємства шляхом перемикання відгалужень понижуючих трансформаторів;
- використання регульованого електропривода, що дозволяє змінювати напругу на статорі АД залежно від навантаження (ЧРП, АД із фазовим керуванням).

Зменшення напруги також впливає на тепловий режим АД. Так, при номінальному навантаженні та номінальній частоті живлення зниження напруги на 10% викликає збільшення перегріву двигуна на ті ж 10%. Водночас при завантаженні двигуна на 90% допустиме зниження напруги на 13%, а при $k_3 = 0,8$ напругу можна знизити до 22% без ризику перевищення допустимого рівня перегріву.

Вибір електродвигунів здійснюється з урахуванням таких параметрів:

- Вид струму – двигун повинен відповідати типу та рівню напруги в мережі змінного або постійного струму підприємства.
- Швидкість обертання – номінальна швидкість двигуна вибирається з урахуванням передатного числа редуктора та необхідної швидкості виконавчого органа.
- Конструктивне виконання – конструкція двигуна повинна відповідати умовам його монтажу та взаємодії з виконавчим механізмом.
- Спосіб вентиляції та захисту від впливу навколишнього середовища – за ступенем захисту двигуни поділяють на відкриті, захищені та герметичні; за способом вентиляції – на двигуни з природною, самовентильацією та примусовим охолодженням.

Процес вибору двигуна здійснюється в такій послідовності:

- розрахунок необхідної потужності та попередній підбір двигуна;
- перевірка відповідності вибраного двигуна вимогам пуску та перевантаження;
- оцінка теплових характеристик двигуна для перевірки нагріву.

Основою для розрахунку потужності та вибору двигуна є **навантажувальні діаграми** виконавчого органа робочої машини, що включають:

- діаграму швидкості (тахограму) $V(t)$ або $\omega(t)$;
- залежність прискорення від часу $a(t)$ або $\varepsilon(t)$;
- навантажувальну діаграму виконавчого органа (залежність статичного моменту, приведенного до вала двигуна, від часу $M_c(t)$);
- залежність моменту (струму) і потужності від часу $M(t)$, $I(t)$, $P(t)$.

Навантажувальні діаграми пов'язують режим роботи двигуна з технологічним процесом і можна поділити на **дві групи**:

– діаграми, де статичний момент змінюється випадковим чином за невідомим законом;

– діаграми, де статичний момент змінюється за відомим законом.

У першому випадку експериментально вимірюється залежність струму двигуна від часу, яка потім розбивається на кілька ділянок. Для кожної ділянки за середнім значенням струму зі статичних характеристик визначаються значення швидкості і моменту. Прискорення обчислюється як тангенс кута нахилу кривої швидкості до осі часу.

У другому випадку, припускаючи, що на механічній стороні привода не відбувається перетворень, механічні характеристики можна поділити на чотири основні категорії (рис. 12.3).

Момент залишається постійним, тобто не залежить від швидкості (рис. 12.3,а). Типовим прикладом є підйомний кран. Незмінна вага піднятого вантажу створює силу і відповідно момент двигуна. У цьому випадку потужність на валу, яка є добутком моменту і швидкості, лінійно залежить від швидкості.

В деяких випадках, наприклад, при перемішуванні речовин на низьких частотах обертання, момент пропорційний швидкості (рис. 12.3,б). Потужність, що є добутком моменту і швидкості, пропорційна квадрату швидкості. Таким чином, при швидкості, що дорівнює половині номінальної, необхідний момент також буде вдвічі меншим від номінального, а потужність – чвертю від номінального значення.

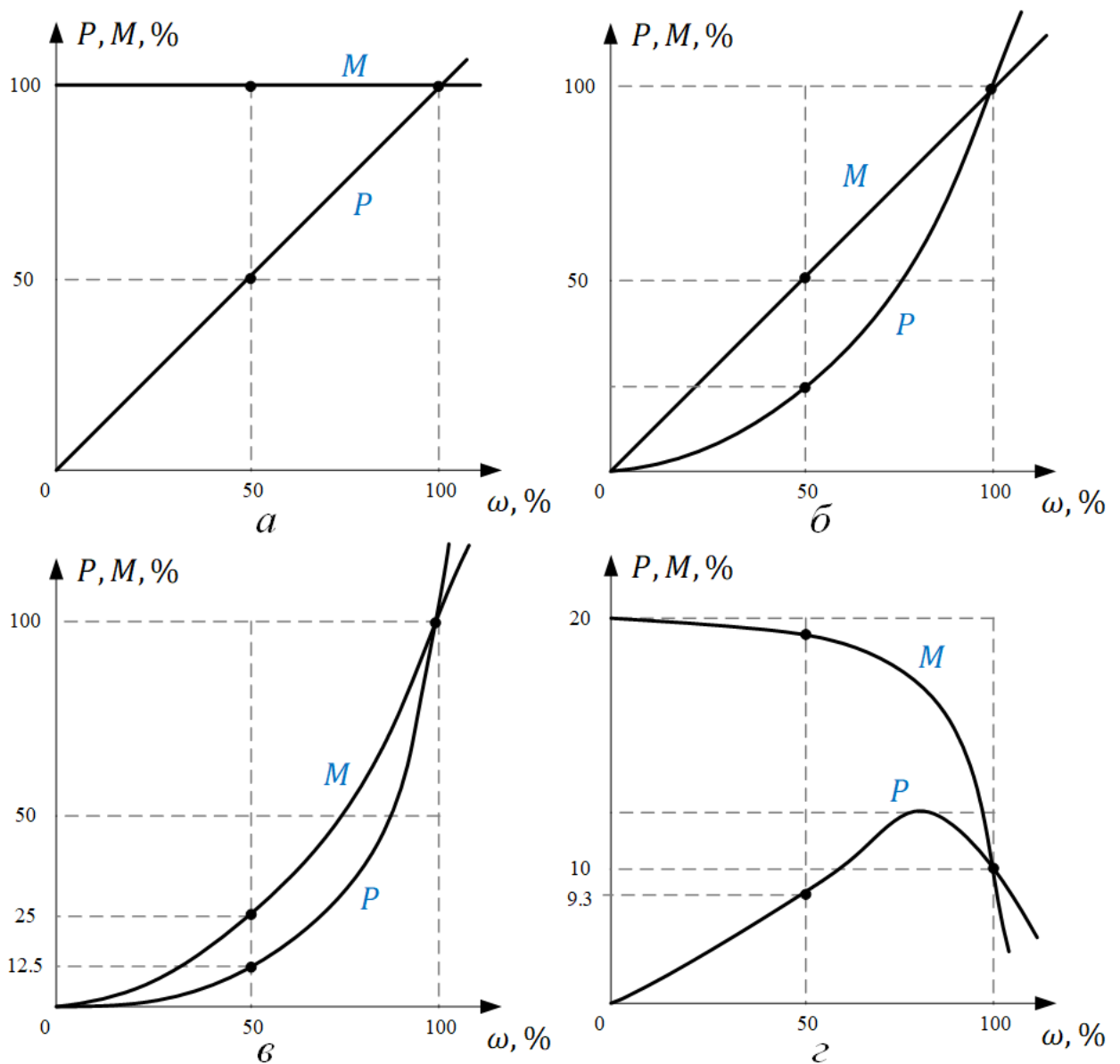


Рис.12.3. Залежності потужності і моменту від кутової швидкості для:
 а – підйомних механізмів; б – мішалок; в – турбомеханізмів;
 г – мішалок густих речовин;

Для переміщення рідин і газів необхідний тиск, пропорційний квадрату швидкості (тобто переміщуваному об'єму). Оскільки відцентровий насос переміщує об'єм, пропорційний швидкості, тиск і момент двигуна будуть пропорційні квадрату швидкості (рис. 12.3,в). Отже, потужність буде пропорційна кубу швидкості. У цьому випадку, при зменшенні потоку вдвічі, для його переміщення буде потрібно лише 12,5% потужності, що споживається при повному потоці.

Існують деякі дуже густі речовини (наприклад, хлібне тісто), які стають менш густими при збільшенні швидкості перемішування. Ці типи навантажень мають характеристики моменту і потужності, як показано на рис. 12.3,г. У таких випадках момент при пуску може бути значно вищим, якщо, наприклад, речовина стала більш густою після тривалого простою. Цей тип навантаження

може мати цікаву особливість – максимальна потужність може споживатися при швидкості, меншій за номінальну.

На рис. 12.4 представлені типові навантажувальні діаграми електроприводу підйому. Кількість періодів (ділянок) у таких діаграмах може коливатися від трьох до семи. Залежно від величини та знака гальмівного моменту (ділянка t_5) можливі три режими гальмування:

$M_{9-10} > 0$ – у рушійному режимі;

$M_{9-10} \approx 0$ – вільним вибігом;

$M_{9-10} < 0$ – електричне гальмування з від'ємним моментом.

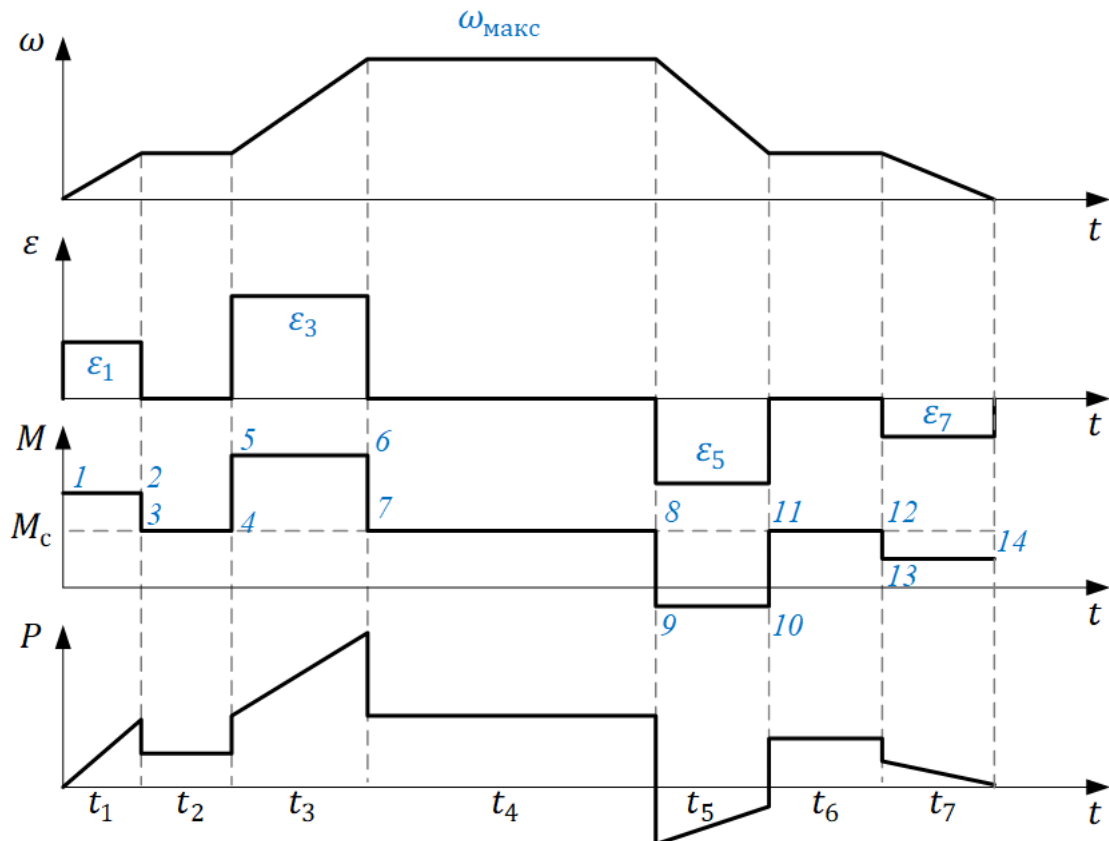


Рис.12.4. Навантажувальні діаграми електроприводу підйому:
 ω – кутова швидкість, рад/с; ε – кутове прискорення, рад/с²;
 M – момент сили, Нм; P – потужність на валу, Вт)

Моменти опору деяких машин і механізмів визначаються за такими формулами.

Механізми підйому лебідки:

$$M_c = \frac{FR}{i\eta}, \quad (12.5)$$

де F – сила ваги вантажу, що піднімається, Н; R – радіус барабана лебідки, м;
 η – передаточне число та ККД редуктора.

Механізми пересування підйомних кранів (мостових або козлових):

$$M_c = \frac{k_1 F(\mu R + f)}{i\eta}, \quad (12.6)$$

де F – сила ваги переміщуваної маси, Н; $f = (5 \dots 12) \cdot 10^{-4}$ – коефіцієнт тертя кочення ходових коліс по рейках; $k_1 = 1,8 \dots 2,5$ – коефіцієнт, що враховує збільшення опору руху через тертя реборд ходових коліс об рейки; $\mu = 0,015 \dots 0,15$ – коефіцієнт тертя в опорах ходових коліс; R – радіус шийки осі ходового колеса, м.

Вентилятори:

$$M_c = \frac{kQH}{\omega\eta}, \quad (12.7)$$

де Q – продуктивність вентилятора, $\text{м}^3/\text{с}$; H – напір (тиск) газу, Па; $\eta = 0,4 \dots 0,85$ – ККД вентилятора; ω – частота обертання робочого колеса вентилятора, с^{-1} ; $k = 1,1 \dots 1,5$ – коефіцієнт запасу.

Насоси:

$$M_c = \frac{kg\rho Q(H + \Delta H)}{\omega\eta}, \quad (12.8)$$

де Q – продуктивність насоса, $\text{м}^3/\text{с}$; H – статичний напір, м; ΔH – втрати напору в трубопроводі, м; $g = 9,81$ – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; ρ – густина рідини, що перекачується, $\text{кг}/\text{м}^3$; $k = 1,1 \dots 1,3$ – коефіцієнт запасу; $\eta = 0,45 \dots 0,75$ – ККД насоса; ω – частота обертання насоса, $\text{рад}/\text{с}$.

По навантажувальній діаграмі визначаємо:

у разі незначних змін статичного моменту – його середнє значення:

$$M_{c \text{ ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{ci} t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}; \quad (12.9)$$

у разі значної зміни статичного моменту – його еквівалентне значення;

$$M_{c \text{ екв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_{ci}^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}. \quad (12.10)$$

Наступним кроком визначається розрахункова потужність привода з урахуванням максимальної швидкості:

$$P_p = M_c \omega_{\text{макс}} k 10^{-3}, \quad \text{кВт} \quad (12.11)$$

де $k = 1,1 \dots 1,3$ – коефіцієнт запасу, який враховує динамічні режими роботи двигуна.

Двигун вибирається з каталогу відповідно до умов:

$$\begin{aligned} P_n &\geq P_p; \\ \omega_n &\approx \omega_{\text{макс}}; \\ U_n &\geq U. \end{aligned} \quad (12.12)$$

Далі будується залежність моменту двигуна від часу за рівнянням механічного руху з урахуванням приведенного моменту інерції привода. Для перевірки перевантажувальної спроможності вибраного двигуна порівнюється максимальний момент двигуна з паспортних даних $M_{\text{макс}}$ з максимальним моментом, визначеним із залежності $M(t)$. Наприклад, $M_{\text{макс}} \geq M_{5-6}$ (рис. 12.4). Якщо це співвідношення не виконується, двигун не зможе забезпечити необхідне прискорення на ділянці основного розгону.

Для двигуна постійного струму зазвичай використовують момент, пропорційний припустимому струму, що визначається з умов комутації колектора:

$$M_{\text{макс}} = M_{\text{пр}} = (2 \dots 2,5)M_{\text{н}}. \quad (12.13)$$

Для АД з фазним ротором максимальний момент приймають рівним критичному:

$$M_{\text{макс}} = M_{\text{кр}} = (1,8 \dots 2,2)M_{\text{н}} = \frac{mU^2}{2\omega_0 X_k} \quad (12.14)$$

Для синхронних двигунів:

$$M_{\text{макс}} = \frac{mUE}{\omega_0 X_c} = (2 \dots 3)M_{\text{н}} \quad (12.15)$$

АД із короткозамкненим ротором слід перевіряти за пусковими умовами, порівнюючи його пусковий момент $M_{\text{п}}$ із моментом навантаження $M_{\text{с0}}$ при $\omega = 0$.

$$M_{\text{п}} \geq M_{\text{с0}} \quad (12.16)$$

Якщо обраний двигун відповідає зазначеним умовам, далі виконується його перевірка по нагріванню.

Тема 4.5. Перевірка двигунів по нагріванню прямим методом

Під час роботи електродвигун може нагріватися лише до певної допустимої температури, яка визначається термостійкістю ізоляційних матеріалів. Дотримання встановленої виробником максимальної температури нагрівання гарантує нормативний термін служби двигуна від 15 до 20 років. Перевищення допустимої температури призводить до передчасного руйнування ізоляції обмоток і скорочення терміну експлуатації. Наприклад, для ізоляції класу А підвищення температури на 8...10 °С зменшує термін служби вдвічі. У сучасних електродвигунах використовуються такі класи ізоляції (табл. 12.1):

Таблиця 12.1 – Класи ізоляції двигунів

Клас ізоляції	A	E	B	F	H	C
Гранично припустима температура, °С	105	120	130	155	180	>180

Перевірка двигуна по нагріванню полягає у порівнянні допустимої для нього температури з температурою, яку він досягає під час роботи. Очевидно, що якщо робоча температура не перевищує допустиму, то двигун функціонує в допустимому тепловому режимі, і навпаки. Зазвичай оцінюється не абсолютна температура, а перегрівання, тобто перевищення температури τ , яке визначається як різниця між температурою двигуна $\theta_{\text{д}}$ і температурою навколишнього середовища $\theta_{\text{с}}$:

$$\tau = \theta_{\text{д}} - \theta_{\text{с}}. \quad (12.17)$$

Під час теплових розрахунків приймається стандартна температура навколишнього середовища 40 °С. Двигун працюватиме в допустимому тепловому режимі за умови виконання наступної залежності:

$$\tau_{\max} \leq \tau_{\text{пр}}, \quad (12.18)$$

де τ_{\max} – максимальний нагрів під час роботи двигуна; $\tau_{\text{пр}}$ – допустиме нагрівання двигуна, визначене класом ізоляції.

Перевірку цієї умови можна виконати прямим методом, що передбачає побудову кривої нагрівання $\tau(t)$ протягом робочого циклу двигуна. Оскільки точне дослідження теплового режиму роботи неможливе, зазвичай приймають такі припущення:

– двигун вважається однорідним тілом з нескінченно великою теплопровідністю та однаковою температурою в усіх точках;

– тепловіддача у навколишнє середовище пропорційна різниці температур двигуна і середовища;

– навколишнє середовище має нескінченно велику теплоємність, тобто його температура не змінюється під час нагрівання двигуна;

– теплоємність двигуна та його тепловіддача не залежать від його температури.

Складемо рівняння теплового балансу:

$$\tau_{\text{уст}} dt = A\tau dt + C d\tau, \quad (12.19)$$

де ΔP – втрати потужності або кількість тепла, що виділяється в двигуні за 1 с; $\Delta P dt$ – кількість теплоти, що виділяється в двигуні за час dt ; $A\tau dt$ – кількість теплоти, що віддається в навколишнє середовище; $C d\tau$ – кількість теплоти, що поглинається двигуном; A – тепловіддача двигуна, тобто кількість теплоти, що віддається в навколишнє середовище за 1 с при різниці температур двигуна і навколишнього середовища на 10°C ($\text{Дж}/(\text{с} \cdot ^\circ\text{C})$); C – теплоємність двигуна, що визначає кількість теплоти, необхідну для підвищення його температури на 10°C ($\text{Дж}/^\circ\text{C}$).

Поділимо обидві частини рівняння теплового балансу на $A dt$:

$$T_{\text{н}} \frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_{\text{уст}}, \quad (12.20)$$

де $T_{\text{н}} = C/A$ – стала часу нагрівання двигуна; $\tau_{\text{уст}} = \Delta P/A$ – усталене перевищення температури двигуна.

Фізичний зміст сталої часу нагрівання полягає в тому, що це час, за який двигун нагріється до усталеного перевищення температури за умови відсутності тепловіддачі в навколишнє середовище.

Теплові процеси двигуна, враховуючи прийняті припущення, описуються лінійним диференціальним рівнянням першого порядку. За постійних втрат $\Delta P = \text{const}$ його розв'язок має вигляд:

$$\tau = \tau_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}} \right) + \tau_{\text{поч}} e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}}. \quad (12.21)$$

Рівняння нагрівання можна застосовувати як для процесу нагрівання, так і для охолодження.

Кількісне погіршення тепловіддачі визначається коефіцієнтом погіршення тепловіддачі при нерухомому роторі:

$$\beta_0 = \frac{A_0}{A}, \quad (12.22)$$

де A_0 і A – тепловіддача відповідно при нерухомому двигуні та номінальній швидкості. Орієнтовні значення коефіцієнта β_0 наведені в табл. 12.2.

Таблиця 12.2 – Орієнтовні значення коефіцієнта β_0 для двигунів із різними системами охолодження

Виконання двигуна	β_0
закритий з незалежною вентиляцією	1
закритий без примусового охолодження	0,95 ... 0,98
закритий самовентильований	0,45 ... 0,55
захищений самовентильований	0,25 ... 0,35

Стала часу охолодження для нерухомого двигуна:

$$T_0 = \frac{T_H}{\beta_0}. \quad (12.23)$$

Оскільки $\beta_0 \leq 1$, то $T_0 \geq T_H$, що означає, що охолодження нерухомого двигуна відбувається повільніше, ніж його нагрівання.

На рис. 12.5а зображені криві нагрівання двигуна для різних значень $\tau_{\text{поч}}$ і ΔP .

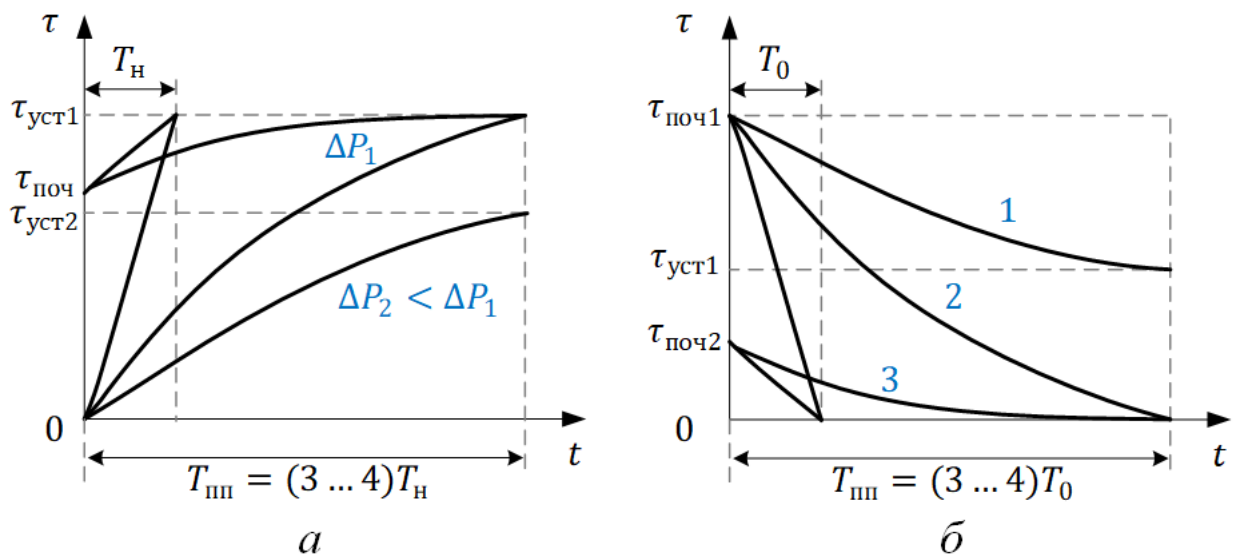


Рис.12.5. Криві нагрівання двигуна для різних значень $\tau_{\text{поч}}$ і ΔP

Великим втратам потужності в двигуні відповідає більше значення усталеного перевищення температури. Час досягнення перегрівом свого усталеного значення залежить від сталої часу нагрівання двигуна. Оскільки теплоємність двигуна пропорційна його об'єму, а тепловіддача – площі, двигуни більшої потужності, що мають великі габарити, мають і велику сталу часу нагрівання (її величина варіюється від кількох хвилин до декількох годин).

Охолодження двигуна (рис. 12.5,б) супроводжується зниженням перегріву по кривій 1 при зменшенні навантаження та по кривих 2 і 3 при відключенні двигуна від мережі.

Порядок перевірки двигуна по нагріванню прямим методом полягає в наступному:

1. За графіком навантаження двигуна визначаються втрати потужності на окремих ділянках циклу, і за їх допомогою знаходяться значення усталеного перегріву на кожній ділянці за формулою:

$$\tau_{уст\ i} = \frac{\Delta P_i}{A_i}. \quad (12.24)$$

2. Далі для ділянок роботи (нагрівання) та паузи (охолодження) визначаються сталі часу нагрівання й охолодження:

$$T_0 = \frac{C}{A_0} = \frac{C}{\beta_0 A} = \frac{T_H}{\beta_0}. \quad (12.25)$$

3. Потім за рівнянням нагрівання будується крива $\tau(t)$, при цьому початковим значенням $\tau_{поч\ i}$ на кожній наступній ділянці є його кінцеве значення $\tau_{кін\ i-1}$ на попередній ділянці.

4. З побудованої таким чином кривої перегрівання $\tau(t)$ визначається її максимальне значення, і перевіряється виконання умови:

$$\tau_{макс} \leq \tau_{пр}. \quad (12.26)$$

Тема 4.6. Перевірка двигунів по нагріванню непрямыми методами

4.6.1. Метод середніх втрат

Прямий метод перевірки двигунів по нагріванню дає найточнішу оцінку нагрівання двигуна, але має істотний недолік – необхідно знати значення тепловіддачі і теплоємності, які відсутні в каталогах і довідниках. Тому в більшості випадків перевірка двигунів по нагріванню здійснюється непрямыми методами, які не потребують побудови графіка $\tau(t)$.

Суть методу полягає у визначенні середніх втрат потужності $\Delta P_{ср}$ за цикл роботи двигуна і порівнянні їх з номінальними втратами ΔP_H . При цьому розглядається досить тривалий цикл роботи двигуна, у якому середній перегрів не змінюється. У цьому випадку кількість теплоти Cdt , акумульованої двигуном за цикл, дорівнює нулю, і рівняння теплового балансу набуває вигляду:

$$\tau_{ср} = \int_0^{T_{ц}} \frac{\Delta P dt}{A t_{ц}} = \frac{\Delta P_{ср}}{A}, \quad (12.27)$$

де $\int_0^{T_{ц}} \frac{\Delta P dt}{t_{ц}}$ – середні втрати потужності за цикл.

Відповідно до рівняння середні втрати за цикл визначають середній перегрів двигуна. Аналогічно, номінальні втрати потужності в двигуні визначають його припустиме нагрівання:

$$\tau_{пр} = \frac{\Delta P_H}{A}. \quad (12.28)$$

Припустиме нагрівання двигуна буде за умови, що середні втрати потужності не перевищують значення, яке забезпечує стабільний тепловий

режим без перевищення максимально допустимої температури, визначеної класом ізоляції двигуна

$$\Delta P_{\text{cp}} \leq \Delta P_{\text{H}}. \quad (12.29)$$

У випадку, коли на окремих ділянках циклу навантаження стали, середні втрати визначаються за формулою:

$$\Delta P_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \dots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}. \quad (12.30)$$

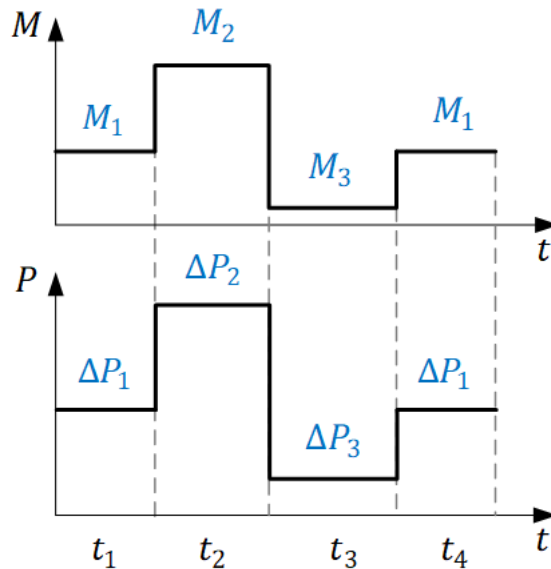


Рис.12.6. Графік роботи двигуна із циклічним навантаженням

Номінальні втрати потужності двигуна визначаються за паспортними даними:

$$\Delta P_{\text{H}} = P_{\text{H}} \left(\frac{1}{\eta_{\text{H}}} - 1 \right). \quad (12.31)$$

Метод середніх втрат є найточнішим і універсальним серед непрямих методів. Точність методу тим вища, чим більше стала нагрівання двигуна перевищує значення $t_{\text{макс}}$ найбільш тривалої ділянки циклу, тобто коли виконується нерівність $t_{\text{макс}} \ll T_{\text{H}}$. При цьому $\tau_{\text{cp}} \approx \tau_{\text{макс}}$.

4.6.2. Методи еквівалентних величин

Метод еквівалентних величин базується на принципі, що дійсну величину замінюють еквівалентною, яка за робочий цикл викликає ті ж самі втрати в двигуні, що й дійсна.

Метод еквівалентного (середньоквадратичного) струму доцільно застосовувати, коли відомий графік зміни струму двигуна в часі. Еквівалентний струм визначається за формулою:

$$I_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_i}{t_{\text{ц}}}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + \dots + I_5^2 t_5}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}}. \quad (12.32)$$

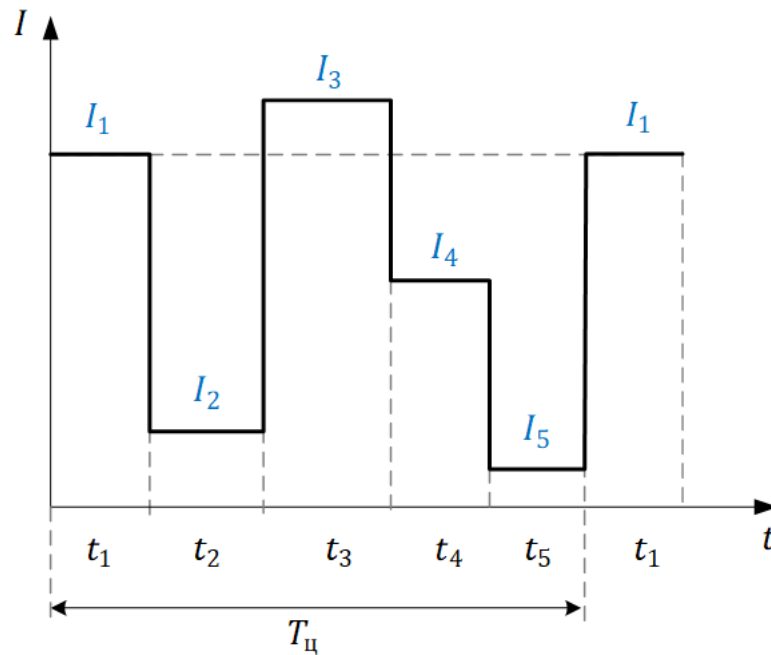


Рис.12.7. Графік зміни струму двигуна при циклічному навантаженні

Нагрівання двигуна не перевищить припустимий рівень, якщо еквівалентний струм за цикл його роботи не перевищуватиме величину номінального струму:

$$I_{\text{екв}} \leq I_{\text{н}}. \quad (12.33)$$

Метод є справедливим, якщо постійні втрати та опори головних кіл двигуна залишаються незмінними за цикл роботи. Цей метод незастосовний для короткозамкнених двигунів з глибокими пазами або подвійною кліткою, оскільки їх опори значною мірою змінюються в динамічних режимах.

Метод еквівалентного моменту зручно застосовувати, коли відомий графік зміни моменту двигуна в часі. При використанні цього методу магнітний потік має бути постійним. Тоді

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}{t_{\text{ц}}}} = M_{\text{екв}} \leq M_{\text{н}}. \quad (12.34)$$

Метод еквівалентної потужності застосовується, якщо відомий графік зміни потужності в часі, а також при виконанні умов застосовності методу еквівалентного моменту і сталої швидкості двигуна на всіх ділянках робочого циклу:

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{t_{\text{ц}}}} = M_{\text{екв}} \omega_{\text{н}} \leq P_{\text{н}}. \quad (12.35)$$

Якщо виконуються ці умови, то нагрівання двигуна не перевищить припустимий рівень.

Контрольні запитання

1. Що таке коефіцієнт завантаження двигуна і як його чисельне значення визначає рекомендації по вибору потужності двигуна?

2. Які існують способи зниження напруги недовантажених АД?
3. В якій послідовності відбувається процес вибору двигуна?
4. Що таке навантажувальна діаграма і для чого її будують?
5. В чому полягає перевірка двигуна по нагріванню прямим методом?
6. Навести порядок перевірки двигуна по нагріванню прямим методом.
7. Які існують непрямі методи перевірки двигунів по нагріванню?
8. В чому полягає суть методу середніх втрат?
9. В чому полягає суть методу еквівалентних величин?
10. Навести рівняння для розрахунку еквівалентних струму, моменту та потужності.

Рекомендована література

[1] – с. 131-148

Лекція 13. Особливості вибору двигунів в залежності від теплового режиму роботи.

Тема 4.7. Особливості вибору двигунів в залежності від теплового режиму роботи

4.7.1. Тривалий режим роботи S1

4.7.2. Короткочасний режим роботи S2

4.7.3. Повторно-короткочасний режим роботи S3

4.7.4. Додаткові режими роботи

Тема 4.7. Особливості вибору двигунів в залежності від теплового режиму роботи

Робота двигунів за зміною навантаження на валу, а отже, й за законом нагрівання та охолодження, поділяється на вісім режимів S1...S8, з яких три є основними.

4.7.1. Тривалий режим роботи S1

Тривалий режим роботи S1 характеризується постійним навантаженням протягом часу, за який температура його частин досягає усталеного значення, що не перевищує допустимого, незалежно від тривалості роботи.

$$t_p \geq (3 \dots 4)T_H, \quad (13.1)$$

де t_p – тривалість роботи двигуна.

Режим S1 відрізняється постійними втратами протягом усього періоду роботи. У цьому режимі двигун може працювати як із постійним, так і зі змінним циклічним навантаженням.

Графік зміни потужності на валу P , моменту M , втрат потужності ΔP і нагріву τ для режиму S1 при постійному навантаженні представлений на рис. 13.1.

Оскільки двигун обирається за умовою $P \leq P_H$, то виконується й умова:

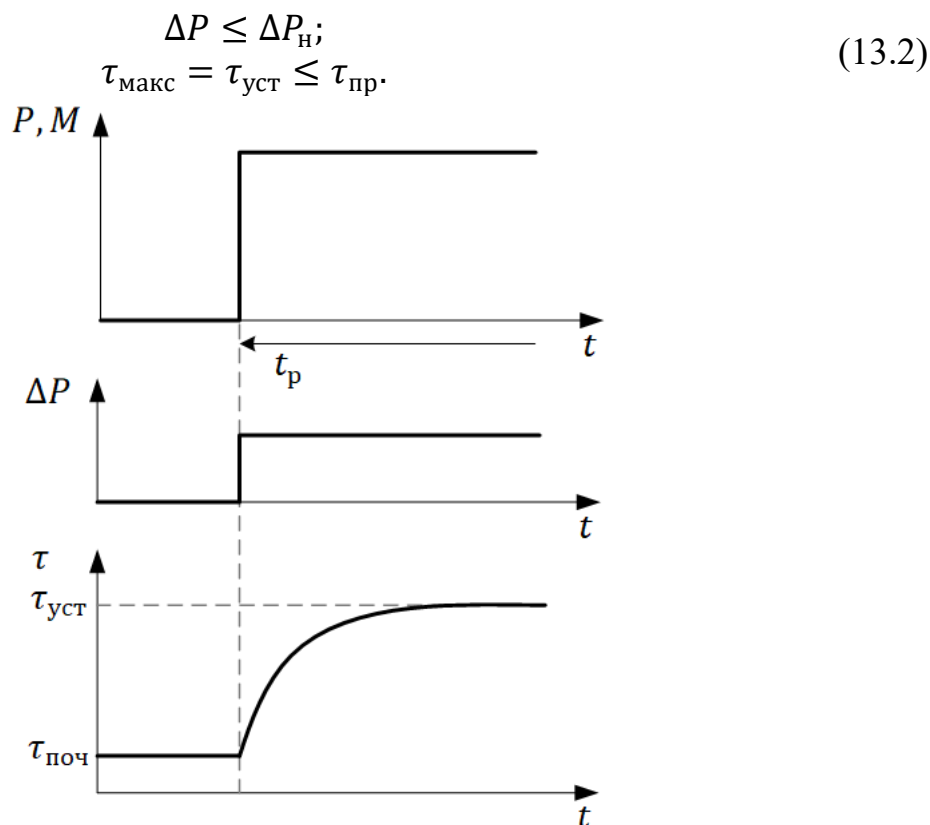


Рис. 13.1. Графік зміни потужності на валу P , моменту M , втрат потужності ΔP і нагріву τ для режиму S1 за постійного навантаження

Якщо навантаження на валу двигуна змінюється періодично, то відповідно змінюватимуться втрати в двигуні та його температура. У цьому випадку перевірку двигуна здійснюють за допомогою методу середніх втрат або еквівалентних величин.

4.7.2. Короткочасний режим роботи S2

Короткочасний режим роботи S2 характеризується чергуванням періодів сталого навантаження з періодами вимкнення двигуна. При цьому за час роботи t температура не досягає усталеного значення, а під час паузи t_0 всі частини двигуна охолоджуються до температури навколишнього середовища:

$$\begin{aligned} t_p &\leq (3 \dots 4)T_H; \\ t_0 &\geq (3 \dots 4)T_H. \end{aligned} \quad (13.3)$$

ДСТУ EN 60034-1:2016 визначає стандартні значення тривалості робочого періоду – 10, 30, 60 і 90 хв. Графіки, що відображають короткочасний режим роботи S2, представлені на рис. 13.2.

Якщо двигун спроектований для тривалого режиму роботи, то в короткочасному режимі його перегрівання до кінця робочого періоду не досягне усталеного значення. У такому випадку двигун буде недовикористаний за нагріванням і, відповідно, за потужністю.

Щоб максимально використовувати двигун у короткочасному режимі, слід перевантажувати його за потужністю на валу, щоб до завершення

робочого періоду температура досягала припустимого рівня. Для оцінки перевантаження та нагрівання двигуна застосовують коефіцієнти термічного та механічного перевантажень.

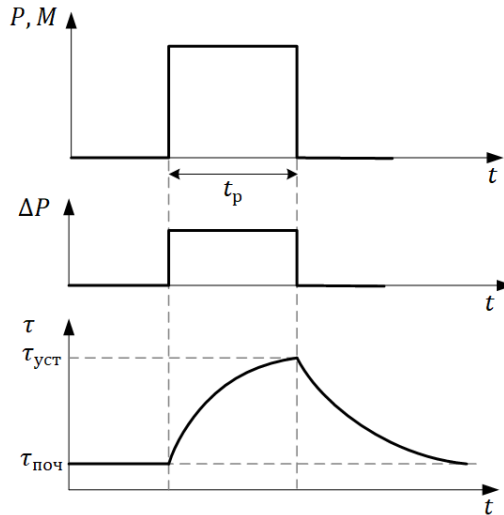


Рис. 13.2. Графік зміни потужності на валу P , моменту M , втрат потужності ΔP і нагріву τ для короткочасного режиму S2

Коефіцієнт термічного перевантаження p_T визначається як відношення втрат потужності в короткочасному режимі ΔP_K до номінальних втрат ΔP_H :

$$p_T = \frac{\Delta P_K}{\Delta P_H} > 1. \quad (13.4)$$

Коефіцієнт механічного перевантаження p_M визначається як відношення потужності навантаження двигуна в короткочасному режимі P_K до номінальної потужності P_H у тривалому режимі:

$$p_M = \frac{P_K}{P_H} > 1. \quad (13.5)$$

Коефіцієнти механічного і термічного перевантажень пов'язані відповідними залежностями:

$$p_T = \frac{\Delta P_K}{\Delta P_H} = \frac{K + V_H p_M^2}{K + V_H} = \frac{a + p_M^2}{a + 1}; \quad (13.6)$$

$$p_M = \sqrt{(1 + a)p_T - a};$$

де $a = K/V_H$ – коефіцієнт втрат.

Якщо знехтувати постійними втратами K , то $a = 0$, і $p_M = \sqrt{p_T}$. Залежність коефіцієнтів термічного і механічного перевантажень при короткочасному режимі роботи від відносної тривалості робочого періоду t_p/T_H показана на рис. 13.3.

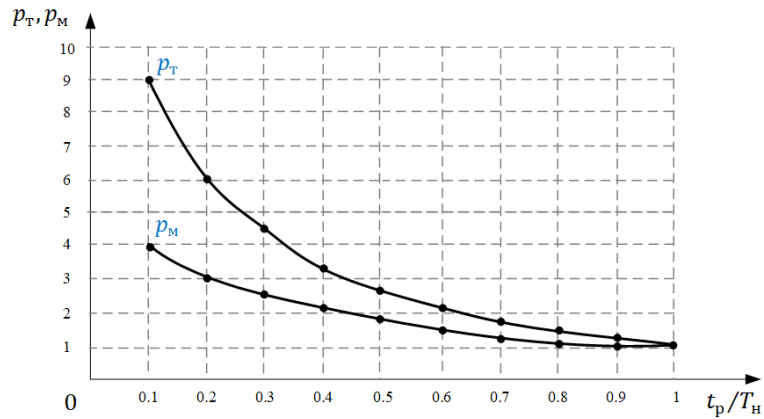


Рис. 13.3. Залежність коефіцієнтів термічного і механічного перевантажень при короткочасному режимі роботи від відносної тривалості робочого періоду t_p/T_n

При відношенні $t_p/T_n = 0,3 \dots 0,4$ припустимий за умовами нагрівання коефіцієнт механічного перевантаження приблизно дорівнює 2,5, що в середньому відповідає перевантажувальній спроможності двигунів загальнопромислових серій. Внаслідок цього при менших відношеннях t_p/T_n повне використання таких двигунів по нагріванню обмежується їх перевантажувальною спроможністю. Іншими словами, при малих відношеннях t_p/T_n двигуни недовикористовуються по нагріванню, тому в цьому випадку можна взагалі не проводити перевірку двигуна по нагріванню, а обмежитися лише його перевіркою за умовами перевантаження.

Повне використання двигунів по нагріванню можливе тільки при великих значеннях t_p/T_n . Промисловість випускає спеціальні двигуни, розраховані для короткочасного режиму роботи. Вони мають підвищену перевантажувальну спроможність, що дозволяє повніше використовувати їх по нагріванню. Час роботи цих двигунів нормується. Це означає, що двигун з номінальною потужністю $P_n = 10$ кВт при $t_p = 30$ хв може розвивати протягом 30 хвилин потужність 10 кВт, не перегрівшись. Потім він повинен бути відімкнений від мережі для охолодження.

У загальному випадку перевірка таких двигунів по нагріванню може виконуватись двома варіантами. Якщо дані навантажувальної діаграми відповідають номінальним даним, перевірка за нагріванням не потрібна. Якщо ж дані навантажувальної діаграми відрізняються від паспортних, слід розрахувати еквівалентну потужність, привівши її до найближчого стандартного часу $t_{p\text{ ст}}$:

$$P_n \geq P_{\text{екв}} \sqrt{\frac{t_p}{t_{p\text{ ст}}}}, \quad (13.7)$$

де t_p – дійсний час короткочасної роботи двигуна з навантажувальних діаграм. Для більш точної оцінки можна використати вираз:

$$P_K = P_H \frac{\sqrt{(1+a) \left(1 - e^{-\frac{t_{p,ст}}{T_H}}\right)}}{\sqrt{\left(1 - e^{-\frac{t_{p,ст}}{T_H}}\right) - a}}. \quad (13.8)$$

Якщо припустима потужність P_K перевищує еквівалентну, тобто $P_K \geq P_{екв}$, то двигун працюватиме в нормальному тепловому режимі, не перегріваючись понад припустимий рівень. Необхідно зазначити, що двигуни, розраховані на короткочасний режим роботи, не варто використовувати в тривалому режимі через їх підвищені постійні втрати потужності. Іноді такі двигуни не можуть працювати в тривалому режимі навіть без навантаження, перегріваючись при цьому вище припустимого рівня.

4.7.3. Повторно-короткочасний режим роботи S3

Повторно-короткочасний режим роботи S3 характеризується короткими періодами роботи t_p з незмінним навантаженням, які чергуються з паузами t_0 відключення двигуна, причому як робочі періоди, так і паузи не настільки довгі, щоб перегрів досягнув сталого значення:

$$\begin{aligned} t_p &\leq (3 \dots 4)T_H; \\ t_0 &\leq (3 \dots 4)T_0. \end{aligned} \quad (13.9)$$

Графіки навантаження для повторно-короткочасного режиму роботи зображені на рис. 13.4. Цей режим характеризується відносною тривалістю увімкнення:

$$ТВ = \frac{t_p}{t_p + t_0} 100 = \frac{t_p}{t_{ц}} 100, \%. \quad (13.10)$$

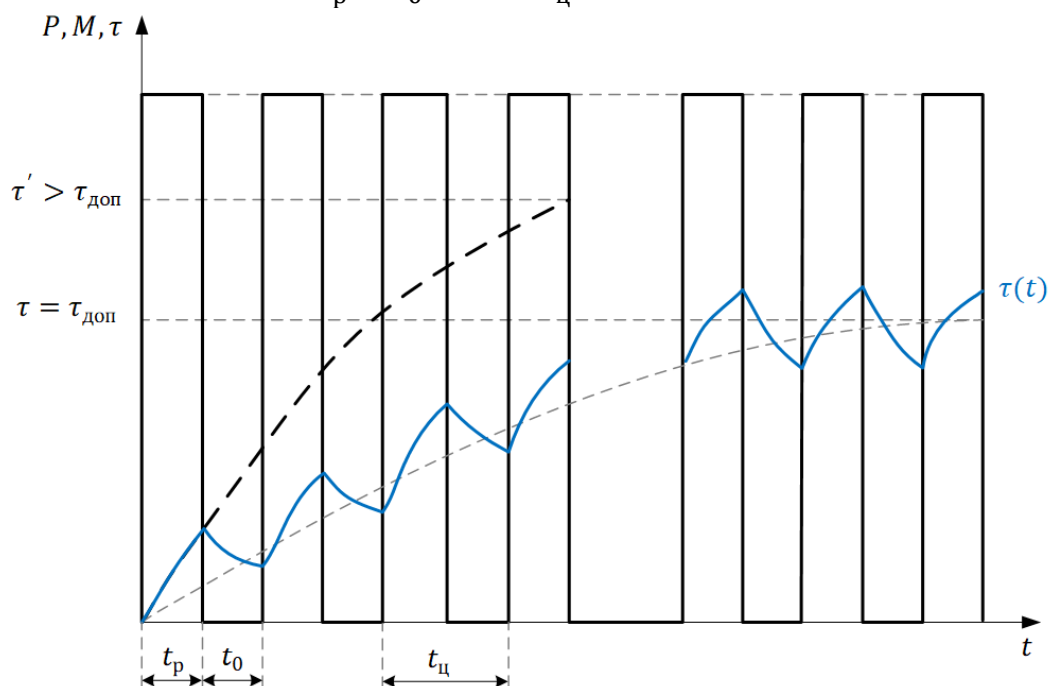


Рис. 13.4. Графіки навантаження для повторно-короткочасного режиму роботи S3

Для повторно-короткочасного режиму роботи виробляються спеціальні двигуни, у паспортних даних яких вказується номінальна потужність при нормативній тривалості ввімкнення $T_{B_n} = 15, 25, 40, 60$.

Якщо потужність навантаження та T_B близькі до номінальних даних двигуна, перевірка його по нагріванню не потрібна, оскільки робота при таких параметрах навантажувальної діаграми гарантується виробником. Розглянемо перевірку двигуна по нагріванню в випадку, коли тривалість ввімкнення в реальному циклі T_{B_1} помітно відрізняється від нормативної величини T_{B_n} , тобто $T_{B_1} \neq T_{B_n}$. Нехай T_{B_1} відповідає навантаженню P_1 , а стандартній T_{B_n} відповідає номінальна потужність P_n (рис. 13.5).

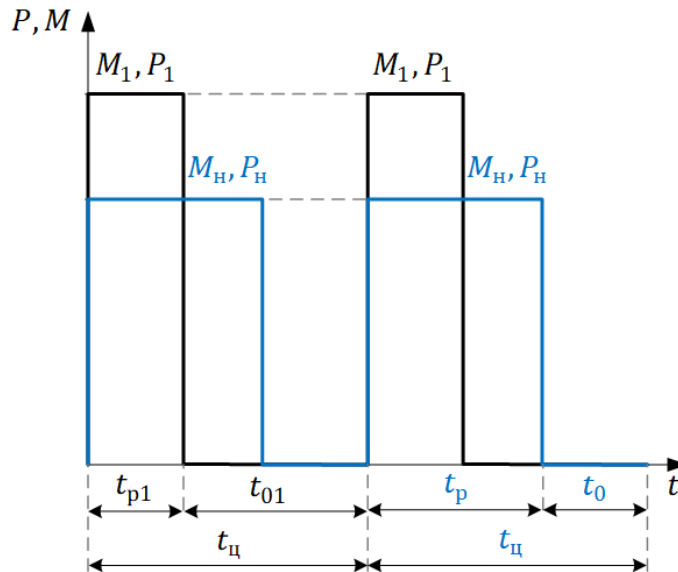


Рис. 13.5. Графіки навантаження при $T_{B_1} \neq T_{B_n}$

На основі методу середніх втрат можна стверджувати, що середнє перевищення температури двигуна при його роботі з потужністю $P_1 \neq P_n$ при $T_{B_1} \neq T_{B_n}$ не перевищить припустиму температуру, якщо середні втрати потужності за цикл при P_1 і T_{B_1} не будуть перевищувати втрати за той самий цикл при P_n і T_{B_n} , тобто

$$\Delta P_1 T_{B_1} \leq \Delta P_n T_{B_n} . \quad (13.11)$$

Отже, щоб при роботі з потужністю P_1 і T_{B_1} середня температура двигуна не перевищувала припустиму, між втратами потужності повинно виконуватися співвідношення

$$\frac{\Delta P_1 T_{B_1}}{T_{B_n}} \leq \Delta P_n . \quad (13.12)$$

Порядок перевірки двигуна по нагріванню полягає в наступному. Спочатку визначають ΔP_1 і T_{B_1} . Потім, за паспортними даними двигуна для найближчої нормативної T_{B_n} , знаходять номінальні втрати двигуна та перевіряють вищенаведену умову. Якщо умова виконується, нагрів двигуна не перевищить нормативного. Перевірка також може бути проведена порівнянням номінальної та еквівалентної потужності двигуна, визначеної за навантажувальними діаграмами:

$$P_H \geq P_1 \sqrt{\frac{TB_1}{\alpha(TB_H - TB_1) + TB_H}}. \quad (13.13)$$

Якщо ця умова виконується, то температура двигуна не перевищить припустимого значення. Коли реальна тривалість ввімкнення не сильно відрізняється від нормативної, добуток $\alpha(TB_H - TB_1)$ можна не враховувати, тоді отримаємо:

$$P_H \geq P_1 \sqrt{\frac{TB_1}{TB_H}}. \quad (13.14)$$

Перевірка двигунів по нагріванню, які призначені для тривалого режиму роботи, але використовуються для повторно-короткочасного навантаження, може бути виконана за допомогою вищезгаданих формул, якщо в них поставити $TB_H = 100\%$. Для двигунів тривалого режиму роботи, у яких тепловіддача під час пауз погіршується, перевірка нагрівання здійснюється за формулою:

$$P_H \geq P_1 \sqrt{\frac{TB_1}{TB_1 + \beta_0(1 + \alpha)(1 - TB_1)}}. \quad (13.15)$$

Якщо $TB > 70...80\%$, вибір двигуна можна здійснювати як для такого, що працює в режимі S1.

4.7.4. Додаткові режими роботи

Розглянуті вище режими роботи є основними та найбільш типовими для електричних двигунів. Існують ще п'ять режимів S4-S8, які є варіантами перших трьох і трапляються значно рідше. Перевірка двигунів на нагрівання в цих режимах проводиться за допомогою методів середніх втрат або еквівалентних величин.

Повторно-короткочасний режим роботи з частими пусками S4 – це режим, при якому періоди пуску та короткочасного незмінного навантаження чергуються з періодами відключення двигуна, при цьому перевищення температури не досягає сталого значення. У цьому режимі нормуються відносна тривалість включення у відсотках, кількість пусків за годину (30, 60, 120 або 240) та коефіцієнт інерції F_1 , що визначається як відношення сумарного приведенного моменту інерції привода до моменту інерції якоря (ротора) двигуна (1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0; 6,3; 10).

Тривалість ввімкнення:

$$TB = \frac{t_n + t_p}{t_n + t_p + t_0} 100\%, \quad (13.16)$$

де t_n – час пуску, с.

Повторно-короткочасний режим роботи з частими пусками й електричним гальмуванням S5 – це режим, у якому періоди пуску, короткочасного незмінного навантаження та електричного гальмування t_T чергуються з періодами відключення двигуна, при цьому перевищення

температури досягає сталого значення. Нормовані величини такі ж, як і для режиму S4, але ТВ визначається за формулою:

$$ТВ = \frac{t_{п} + t_{р} + t_{г}}{t_{п} + t_{р} + t_{о} + t_{г}} 100\%. \quad (13.17)$$

Почерговий режим роботи S6 – це режим, при якому періоди незмінного робочого навантаження чергуються з періодами без навантаження, під час яких двигун не вимикається, і перевищення температури двигуна не досягає сталого значення. Режим характеризується відносною тривалістю навантаження:

$$ТВ = \frac{t_{р}}{t_{р} + t_{нх}} 100\%, \quad (13.18)$$

де $t_{нх}$ – тривалість неробочого ходу двигуна. Нормативні значення ТН рівні 15; 20; 40 і 60%.

Почерговий режим роботи із частими реверсами S7 – це режим, у якому періоди роботи з незмінним навантаженням чергуються з періодами реверсу з електричним гальмуванням, при цьому температура двигуна не досягає сталого значення. Нормується число вмикань за годину (30, 60, 120 або 240) і коефіцієнт інерції $F_1 = (1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0)$.

Почерговий режим роботи з двома чи більше кутовими швидкостями S8 – це режим, у якому періоди роботи з одним навантаженням на одній швидкості чергуються з періодами роботи на іншій швидкості з іншим, але також незмінним навантаженням. При цьому перевищення температури двигуна не перевищує встановленого рівня. Нормуються число циклів за годину (30, 60, 120 або 240), коефіцієнт інерції $F_1 = (1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0)$ і відносна тривалість навантаження (у % від $t_{ц}$) на кожній із кутових швидкостей обертання.

Для електроприводів, що працюють у режимах S4, S5 доцільно обирати двигуни, призначені для роботи в режимі S3.

Для електроприводів, що працюють у режимах S6, S7 та S8 доцільно обирати двигуни, призначені для роботи в режимі S1.

Контрольні запитання

1. Чим характеризується тривалий режим роботи S1? Побудувати графіки навантаження для режиму S1.
2. Чим характеризується короткочасний режим роботи S2? Побудувати графіки навантаження для режиму S2.
3. Чим характеризується повторно-короткочасний режим роботи S3? Побудувати графіки навантаження для режиму S3.
4. Чим характеризується повторно-короткочасний режим роботи з частими пусками S4?
5. Чим характеризується повторно-короткочасний режим роботи з частими пусками й електричним гальмуванням S5?
6. Чим характеризується почерговий режим роботи S6?
7. Чим характеризується почерговий режим роботи із частими реверсами S7?

8. Чим характеризується почерговий режим роботи з двома чи більше кутовими швидкостями S8?

9. Які двигуни слід обирати для роботи електропривода в режимах S4, S5 та S6-S8?

Рекомендована література

[1] – с. 149-158

Розділ 5. ТИПОВІ СТРУКТУРИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Лекція 14. Типові структури перетворювачів електроенергії.

Тема 5.1. Електромашинні перетворювачі

Тема 5.2. Статичні перетворювачі на напівкерованих електронних приладах (тиристорах)

Тема 5.3. Статичні перетворювачі на керованих електронних пристроях

Тема 5.1. Електромашинні перетворювачі

На рис. 14.1 зображено схему електромашинного перетворювача змінного струму на постійний. До складу перетворювача входить приводний двигун генератора ПДГ, який може бути асинхронним або синхронним. Основна вимога до ПДГ – наявність жорсткої характеристики, щоб швидкість генератора залишалася сталою незалежно від навантаження. Генератор являє собою машину постійного струму з незалежним збудженням і компенсаційною обмоткою. Компенсація необхідна для забезпечення незалежності ЕРС генератора від навантаження. Система має два входи енергії: механічний ω_r та збудження $U_{зг}$. Керування здійснюється за допомогою потенціометра.

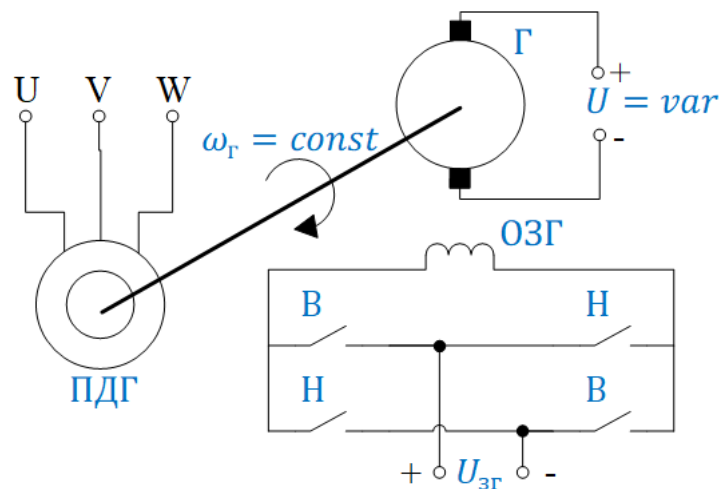


Рис.14.1. Електромашинний перетворювач змінного струму на постійний

На рис. 14.2 показано схему електромашинного перетворювача з регулюванням амплітуди та частоти вихідної напруги.

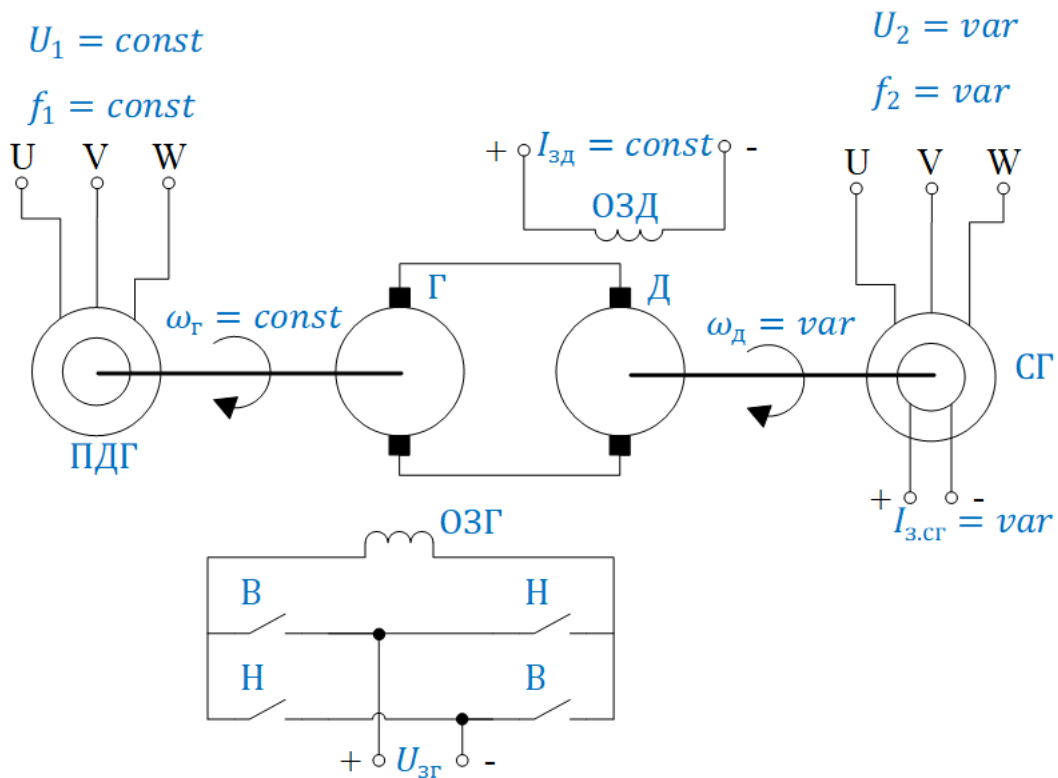


Рис.14.2. Електромашинний перетворювач з регулюванням амплітуди та частоти вхідної напруги

Регулювання швидкості двигуна Д здійснюється шляхом зміни напруги на його якорі:

$$\omega_{\text{д}} = \frac{E_{\text{Г}}}{k_{\text{д}}\Phi_{\text{д}}} - \frac{I r_{\text{я}}}{k_{\text{д}}\Phi_{\text{д}}} \quad \text{чи} \quad \omega_{\text{д}} = \frac{E_{\text{Г}}}{k_{\text{д}}\Phi_{\text{д}}} - \frac{I r_{\text{я}}}{k_{\text{д}}\Phi_{\text{д}}}, \quad (14.1)$$

де $c_{\text{Г}} = k_{\text{Г}} k_{\text{зГ}} \omega_{\text{Г}}$ – стала генератора; $k_{\text{д}}$ і $k_{\text{Г}} = \frac{pN}{2\pi a}$ – конструктивні коефіцієнти двигуна та генератора; $k_{\text{зГ}}$ – коефіцієнт збудження генератора, що визначається за кривою намагнічування генератора; $r_{\text{я}} = r_{\text{яГ}} + r_{\text{яД}}$ – опір якорного кола електромашинного перетворювача.

ЕРС генератора обчислюється за формулою:

$$E_{\text{Г}} = c_{\text{Г}} I_{\text{зГ}}. \quad (14.2)$$

Вал двигуна з'єднаний із валом синхронного генератора СГ, частота напруги якого залежить від швидкості обертання двигуна, а амплітуда визначається струмом збудження $I_{\text{з.СГ}}$.

Серед недоліків таких систем – низький коефіцієнт корисної дії, велика кількість обертових машин, низька швидкодія. Загальна встановлена потужність обладнання в понад чотири рази перевищує необхідну (за умови $\eta = 1$). ККД перетворювача:

$$\eta_{\text{п}} = \eta_{\text{н}}^k, \quad (14.3)$$

де $\eta_{\text{н}}$ – номінальний ККД приводного двигуна; k – кількість ступенів перетворення енергії.

Якщо ККД електричних машин середньої потужності становить 0,85–0,9, то при дворазовому перетворенні енергії ККД перетворювача не перевищує 0,7–0,8, а при чотириразовому – 0,5–0,65. Це означає, що при потужності приводного двигуна генератора 1000 кВт, від 350 до 500 кВт витрачається на нагрівання повітря.

Тема 5.2. Статичні перетворювачі на напівкерованих електронних приладах (тиристорах)

Розглянемо найпоширеніші в електроприводі схеми напівпровідникових перетворювачів, в основі яких лежить тиристор (SCR – кремнієвий керований випрямляч). Тиристор є напівкерованим електронним елементом.

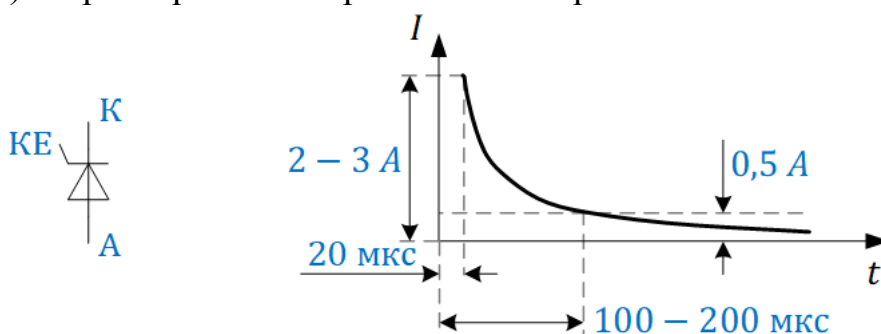


Рис.14.3. Схематичне зображення тиристора та залежність струму анод-катод від часу

Тиристор відкривається при подачі імпульсу струму на керуючий електрод (КЕ) за умови наявності позитивного потенціалу на аноді (рис. 14.3). Якщо на анод подати напругу, що перевищує допустиму пряму напругу, відбудеться некероване самовідкривання – пробій тиристора. Тому робоча анодна напруга встановлюється значно нижчою.

Керувати відкриванням тиристора можна, змінюючи керуючий струм I_y за величиною – це горизонтальне керування. Наприклад, при $I_{y \text{ макс}}$ тиристор відкривається вже при невеликій анодній напрузі. Однак таке керування можливе лише до половини напруги, тобто є неповним.

Здебільшого використовується вертикальне (фазове) керування. У цьому випадку I_y обирається максимальним і не змінюється, а фаза імпульсу струму варіюється. Змінюючи фазу імпульсу, можна регулювати кут керування α в межах $0 \leq \alpha \leq 180^\circ$.

Вольт-амперну характеристику тиристора показано на рис. 14.4.

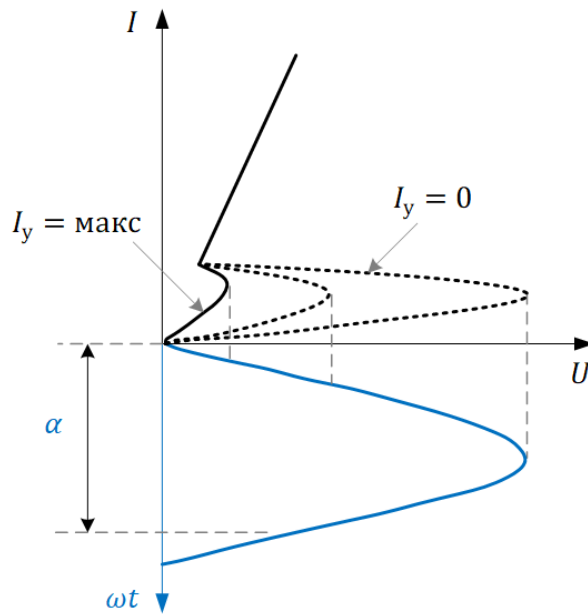


Рис.14.4. ВАХ тиристора

Існує два способи закриття тиристора:

- зміна полярності анодної напруги на зворотну (природна комутація);
- розрив кола струму (примусова комутація).

Схему трифазного мостового перетворювача змінного струму в постійний подано на рис. 14.5.

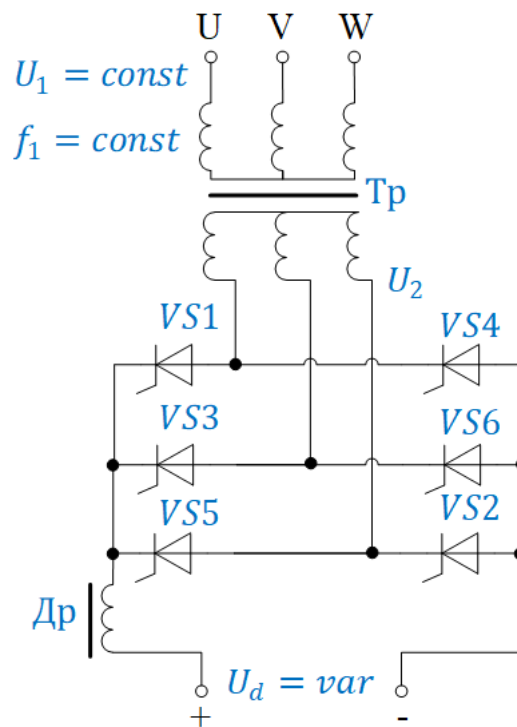


Рис.14.5. Трифазний мостовий тиристорний перетворювач змінного струму в постійний

Кут керування тиристорів α визначається як кут між точкою природного відкриття та реальним моментом відкриття тиристора (рис. 14.6, б). Точка природного відкриття – це момент, коли фазні напруги рівні між собою, або лінійна напруга дорівнює нулю.

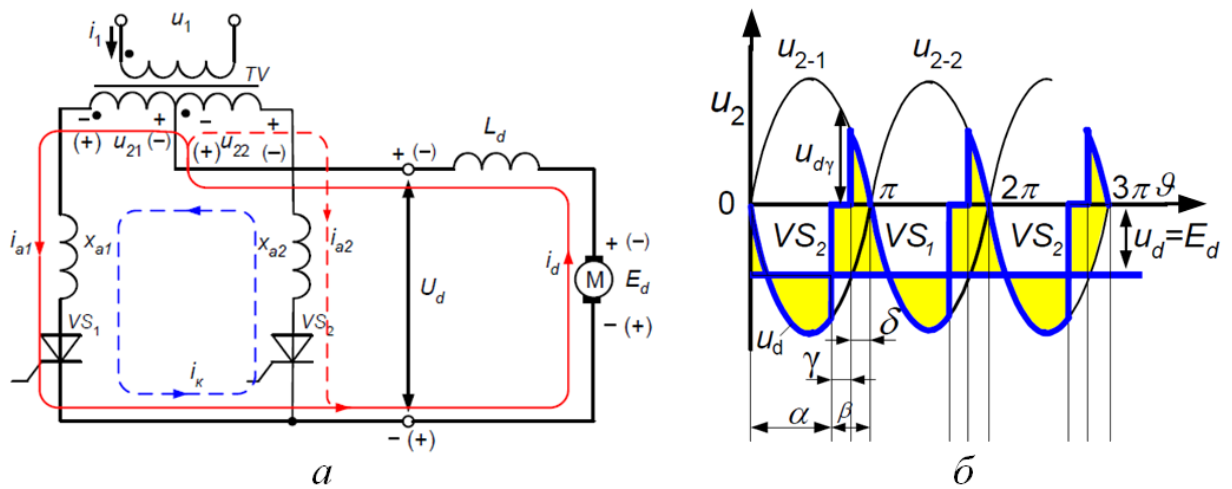


Рис.14.6. Схема однофазного веденого інвертора (а) та криві напруг на вторинних обмотках трансформатора веденого інвертора (б) [4]

Діаграми напруг і струмів, що ілюструють принцип роботи шестипульсового мостового випрямляча при $\alpha = 0$, представлені на рис. 14.7.

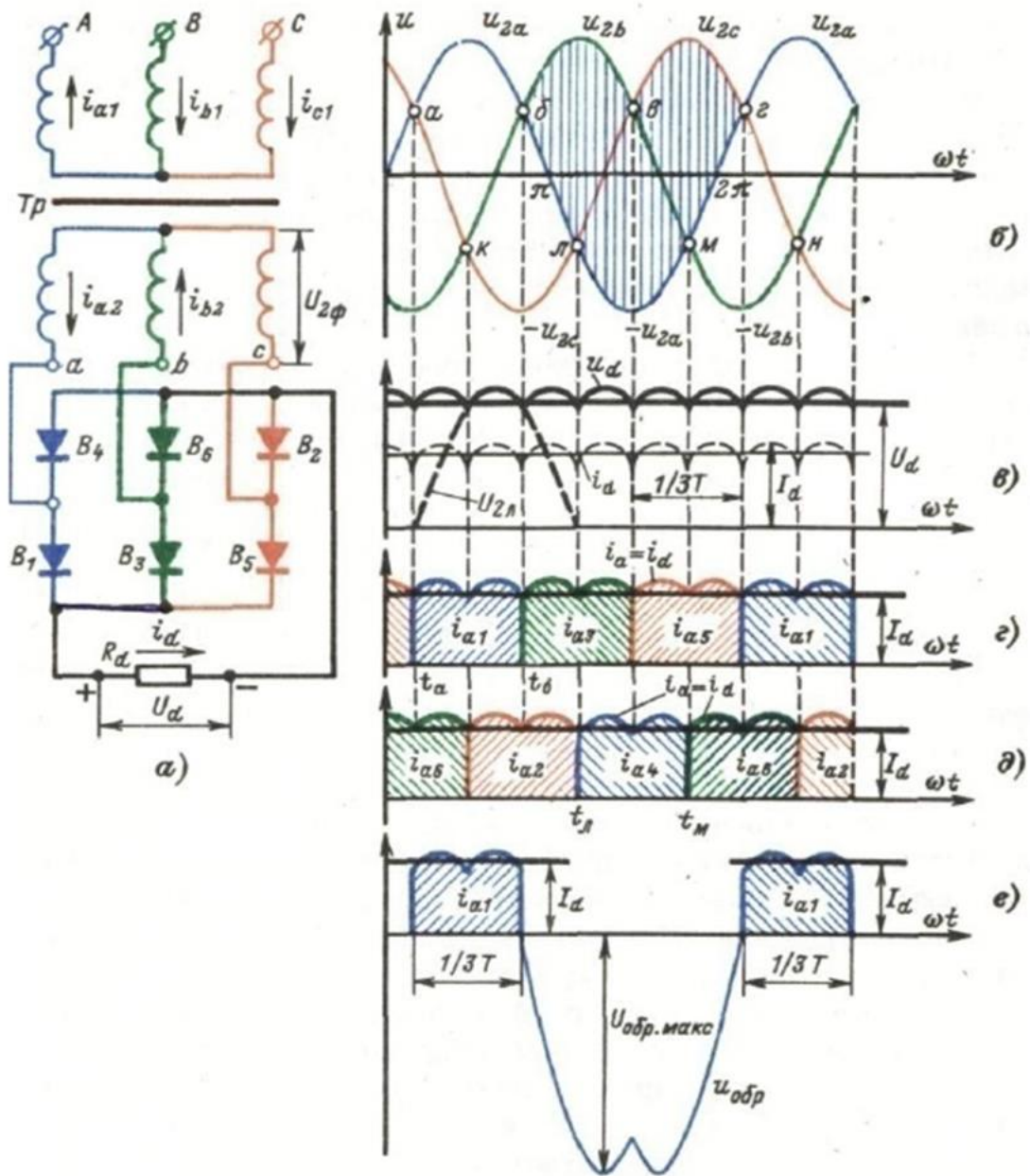


Рис.14.7. Діаграми напруг і струмів шестишпульного мостового випрямляча при $\alpha = 0$

Кут комутації γ визначає час переведення струму з одного вентиля на інший ($\gamma \approx 15-20^\circ$ частоти мережі живлення). Середнє значення ЕРС на виході перетворювача:

$$e_d = e_{d0} \cos \alpha, \quad (14.4)$$

де $e_{d0} = k_{cx} E_{2T}$ ($e_{d0} = k_{cx} U_c$) – максимальна величина середнього значення випрямленої ЕРС; k_{cx} – коефіцієнт схеми ($k_{cx} = 1,35$ для лінійної напруги або 2,34 для фазної); $E_{2T}(U_c)$ – ЕРС вторинної обмотки трансформатора або напруга мережі.

Кутова характеристика перетворювача зображена на рис. 14.8.

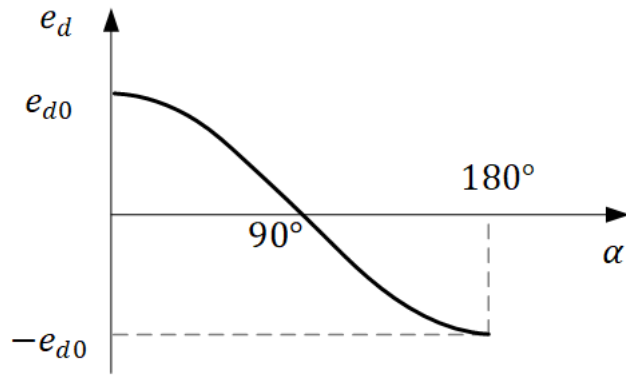


Рис.14.8. Кутова характеристика тиристорного перетворювача

При $0 < \alpha < 90^\circ$, $e_d > 0$ перетворювач працює в режимі випрямляча, а при $90^\circ < \alpha < 180^\circ$, $e_d < 0$ – в режимі інвертора.

Діаграма напруг на вході і виході шестипульсового мостового випрямляча при різних кутах керування зображена на рис. 14.9.

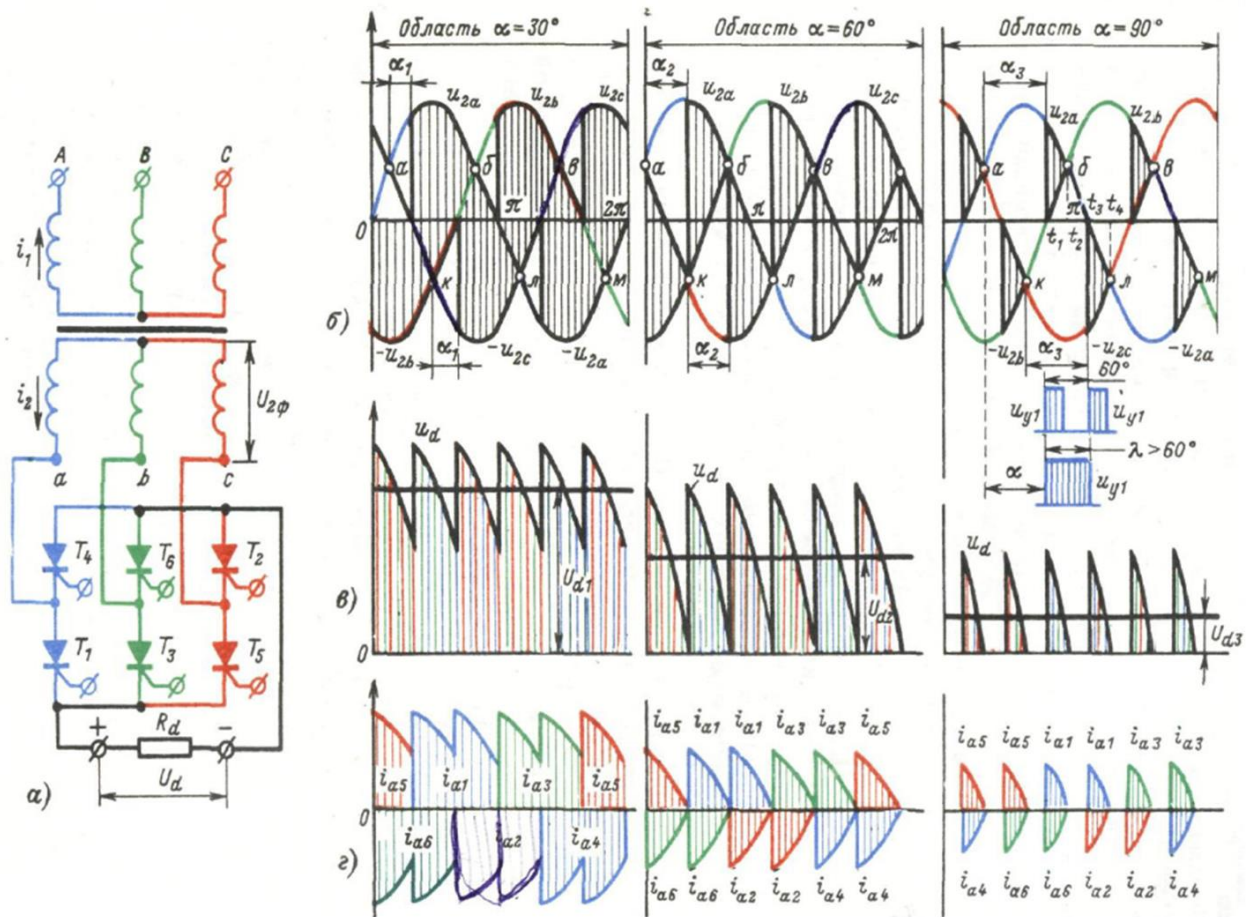


Рис.14.9. Діаграма напруг на вході і виході шестипульсового мостового випрямляча при різних кутах керування

Схему перетворювача постійного струму з нульовою точкою представлено на рис. 14.10.

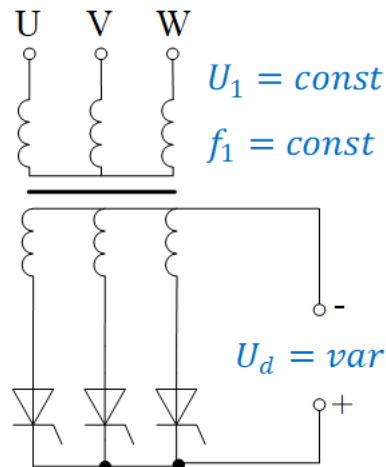


Рис.14.10. Схема перетворювача постійного струму з нульовою точкою

Схема перетворювача постійного струму з імпульсним регулюванням напруги зображена на рис. 14.11.

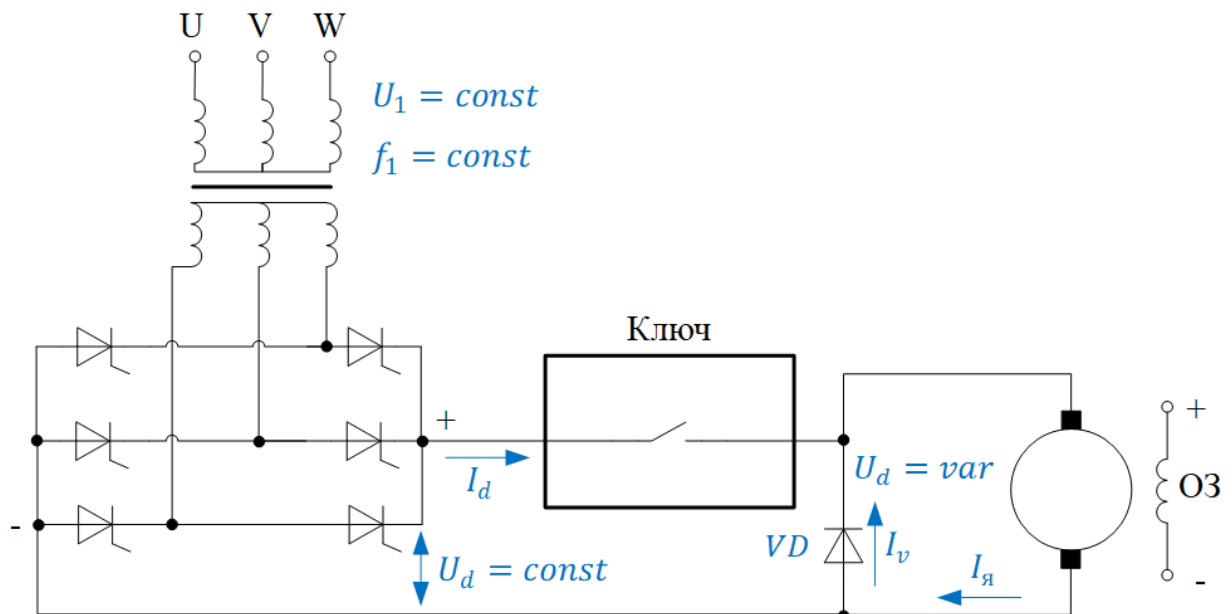


Рис.14.11. Схема перетворювача постійного струму з імпульсним регулюванням напруги

Існує два способи керування електронним ключем – широтноімпульсне та частотноімпульсне. При **широтноімпульсному** період комутації ключа T_k , що включає час замкнутого стану t_3 і час розімкненого стану t_p , залишається сталим $T_k = t_3 + t_p = const$, а змінюється лише час t_3 . Відношення часу замкнутого стану ключа до періоду комутації називається **скважністю**:

$$D = \frac{t_3}{T_k} = \frac{t_3}{t_3 + t_p}. \quad (14.5)$$

При **частотноімпульсному** регулюванні час замкненого стану ключа залишається сталим, а змінюється період комутації ключа, тобто частота. Це також призводить до зміни скважності.

Коли ключ замкнений, струм у навантаженні (наприклад, у двигуні постійного струму) протікає під дією напруги випрямляча, а коли ключ розімкнений – під дією ЕРС самоіндукції, замикаючись через діод VD (електродинамічний режим гальмування). Струм у якорі має пульсуючий характер (рис. 14.12, а). Струм у навантаженні при $t = t_3$ дорівнює струму, що протікає з випрямляча $I_{я} = I_d$, а при $t = t_p$ струм $I_{я} = I_v$.

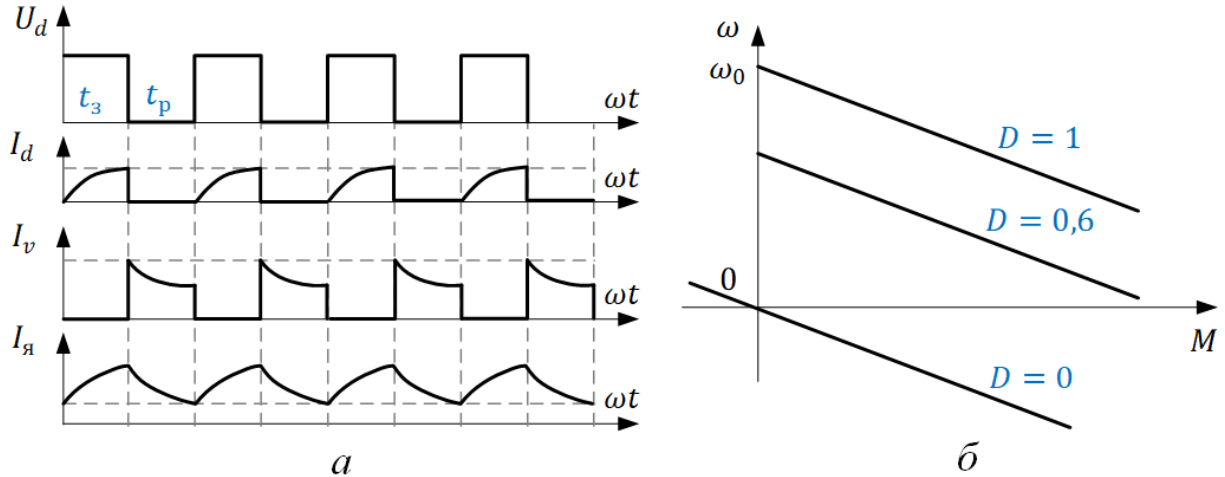


Рис.14.12. Діаграми напруг і струмів двигуна (а), та його механічні характеристики (б)

Регулюючи скважність D роботи ключа, можна отримати різні характеристики (рис. 14.12, б). При $D = 1$ на якорь постійно подається повна напруга мережі, і двигун постійного струму має природну характеристику. При розімкненому ключі $D = 0$ напруга не подається, і двигун переходить в режим електродинамічного гальмування.

Електронні ключі виконуються на транзисторах, тиристорах та тиристорах з штучною комутацією. Схема електронного ключа на тиристорі зі штучною комутацією зображена на рис. 14.13.

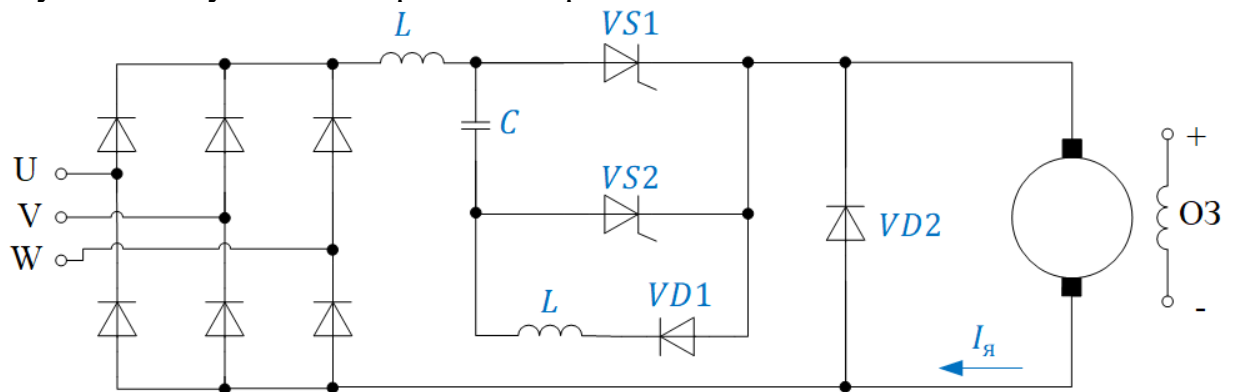


Рис.14.13. Схема електронного ключа на тиристорі зі штучною комутацією

Для ввімкнення привода в роботу спочатку подається сигнал на допоміжний тиристор VS2, при відкриванні якого через якорне коло двигуна протікає струм заряду конденсатора C . Потенціал на верхній обкладинці

конденсатора стає позитивним після закінчення заряду, і струм зменшується до нуля.

Потім по черзі подаються сигнали на відкриття тиристорів VS1 і VS2. При відкритті основного тиристора VS1 двигун підключається до мережі. Через тиристор VS1 проходить струм якоря та струм перезаряду конденсатора C, що замикається по контуру C–VS1–VD1–L. Внаслідок перезаряду конденсатор отримує негативний потенціал на верхній обкладинці.

Наступне відкриття VS2 призводить до шунтування основного тиристора конденсатором. При цьому потенціал анода VS1 стає негативним стосовно катода, що викликає його запирання через перезаряд ємності. Верхня обкладинка конденсатора по закінченні процесу стає позитивною.

Перевага імпульсного способу – простота, $\cos\varphi = 1$. Недоліком є значні пульсації струму. Схема перетворювача змінного струму з регулюванням напруги при постійній частоті зображена на рис. 14.14.

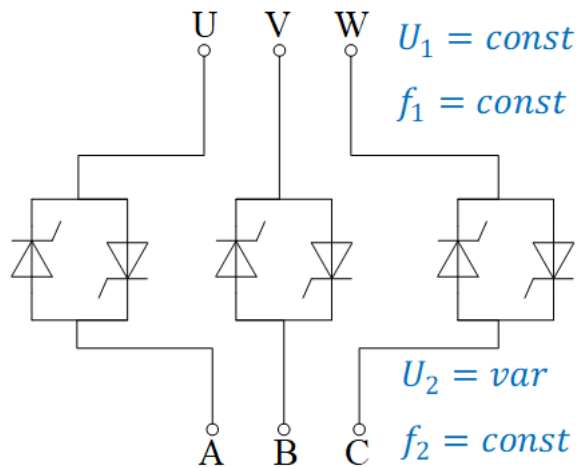


Рис.14.14. Схема перетворювача змінного струму з регулюванням напруги при постійній частоті

Схема перетворювача частоти з безпосереднім зв'язком зображена на рис. 14.15.

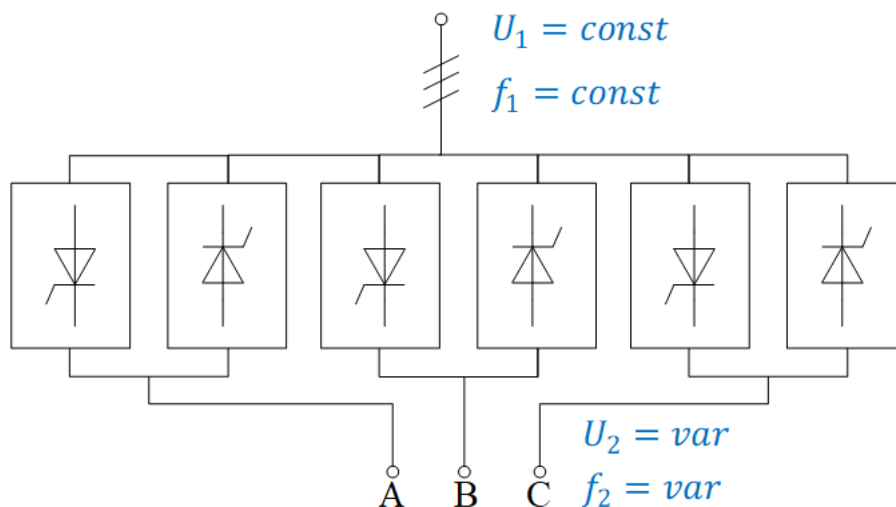


Рис.14.15. Схема перетворювача частоти з безпосереднім зв'язком

Такий перетворювач впливає на мережу через більшу кількість випрямних мостів (6 шт.), що забезпечує вищу частоту пульсацій, але з меншою амплітудою. Керування здійснюється за частотним законом $U/f = const$. Вихідна частота перетворювача не перевищує 30% від вхідної, тобто 15 Гц. Перетворювач має складну систему керування, що є недоліком.

Схема перетворювача частоти з ланкою постійного струму та автономним інвертором зображена на рис. 14.16. Перетворювач складається з керованого випрямляча (КВ), що регулює напругу, та автономного інвертора (АІ) зі штучною комутацією, який регулює частоту. Комутація тиристорів інвертора здійснюється за рахунок енергії, накопиченої в реактивних елементах L і C . Діоди VD1-VD6 служать для відокремлення комутуючого струму від струму навантаження.

Для віддачі реактивної енергії в мережу використовується випрямляч В, який увімкнений зустрічно основному. Дросель Dp і ємність $C1$ забезпечують згладжування струму і напруги на вході інвертора. Ємність $C1$ вказує на те, що інвертор виконаний за схемою джерела напруги (вихідний струм має синусоїдальну форму, а напруга – ступінчасту). Індуктивності $L1$ та $L2$ обмежують струм розряду через діоди випрямляча В.

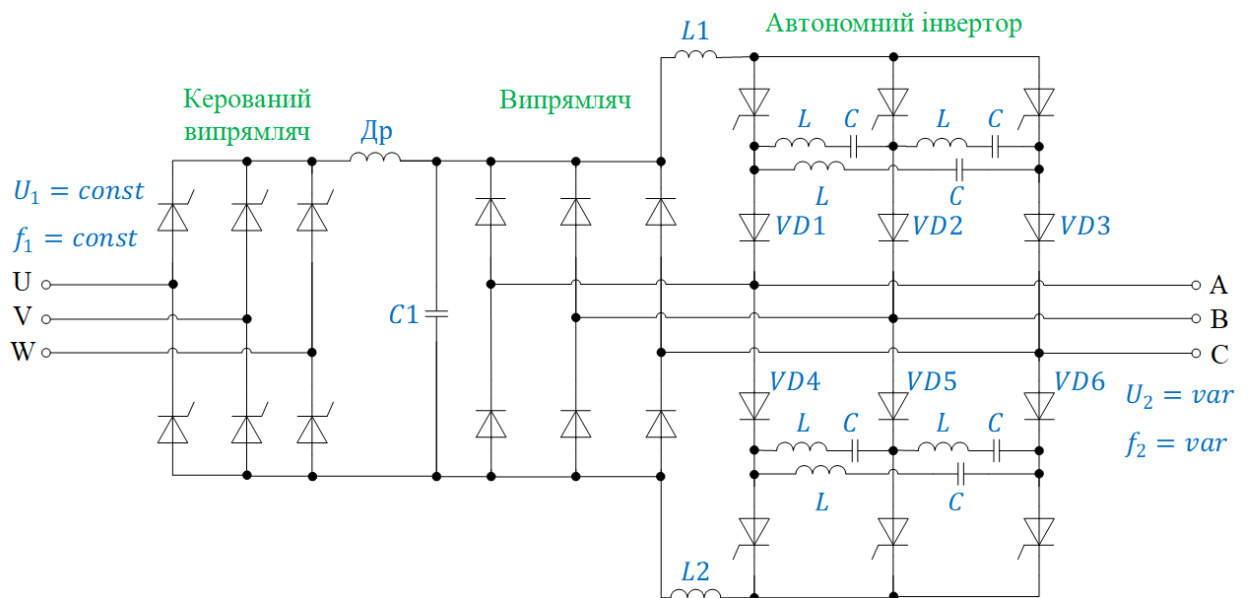


Рис.14.16. Схема перетворювача частоти з ланкою постійного струму із тиристорним інвертором

Цей перетворювач характеризується високим ККД (близько 0,96) і швидкодією. Недоліками є значна встановлена потужність перетворювача ($P \approx 2,5P_H$), наявність реактивних елементів і складність системи керування.

Тема 5.3. Статичні перетворювачі на керованих електронних пристроях

Масове виробництво перетворювачів для електроприводів на основі сучасних двоопераційних приладів було освоєно майже всіма провідними електротехнічними компаніями світу. Незважаючи на різноманіття існуючих перетворювачів, вони мають спільну силову схему класичної структури

(рис. 14.17): трифазний мостовий некерований випрямляч, LC-фільтр ланки постійного струму, трифазний мостовий автономний інвертор напруги з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ).

Некерований режим роботи випрямляча і властивості силових керованих ключів інвертора дозволяють уникнути питань, пов'язаних з обмеженням di/dt та du/dt у колах вентилів, а також потреби в громіздких снабберах для захисту від перенапруг і подібного.

Різноманітність силових схем зводиться до різниць у типах і способах підключення комутаційних та захисних апаратів (електромагнітні пускачі, автоматичні вимикачі, запобіжники, струмообмежувальні реактори), датчиків струму і напруги, а також пристроїв гальмування (мережевий інвертор для рекуперації, ключ для електродинамічного гальмування). Основний акцент у розробці силових частини перетворювачів перемістився з галузі схмотехніки (важливої для тиристорних пристроїв) в область оптимізації конструкторських рішень і теплофізичних розрахунків, а також підвищення стійкості до аварійних ситуацій.

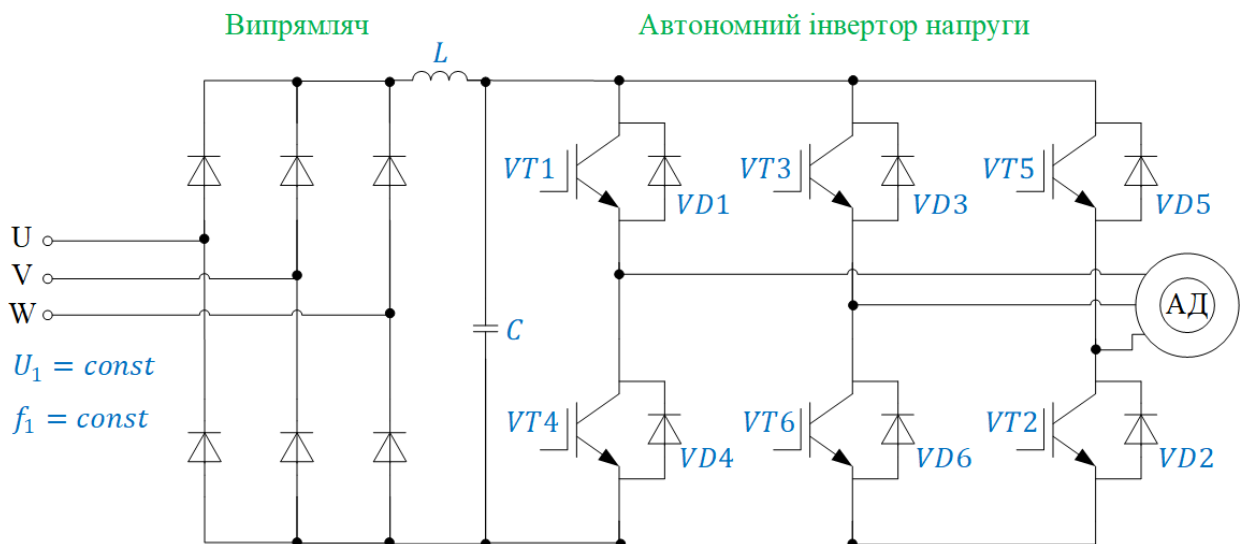


Рис.14.17. Схема перетворювача частоти з ланкою постійного струму із транзисторним інвертором

Основним фактором, що впливає на споживчі властивості перетворювачів і електроприводів, є їх інформаційний канал – алгоритми керування і регулювання, а також мікроконтролерні системи (МСУ), які їх реалізують. Саме ці системи визначають регульовальні властивості, динамічні характеристики електропривода, його функціональність та адаптованість до складних систем автоматичного керування різними технологічними процесами.

Автономний інвертор (рис. 14.17) отримує живлення від постійної напруги, що надходить від некерованого діодного випрямляча або від автономного джерела постійної напруги. Ємність C згладжує пульсації на виході випрямляча. Ключ складається з біполярного ключа VT з польовим керуванням (IGBT – insulated gate bipolar transistor) та діода VD , ввімкненого протилежно напрузі живлення. Діод VD забезпечує повернення енергії в

мережу, коли струм через ключ має напрямок, протилежний напрямку напруги на ньому. Така ситуація виникає при реактивно-активному навантаженні. Сполучення діодів VD1-VD6 формує трифазний мостовий шестинапівперіодний діодний випрямляч, що дозволяє повернути енергію від двигуна в мережу.

Для реалізації режиму рекуперації замість некерованого випрямляча застосовують керований реверсивний перетворювач на тиристорах. Режим електродинамічного гальмування здійснюється підключенням зовнішнього реостата через додатковий ключ IGBT паралельно автономному інвертору.

У типовій схемі автономного інвертора напруги є 6 ключів. Транзисторні ключі, перемикаючись у певній послідовності, формують на виході інвертора періодичний трифазний сигнал. У такому інверторі фази двигуна можуть бути підключені до потенціалів постійної напруги $2^3 = 8$ різними способами. Результируючий вектор напруги на виході АІН має відповідно 8 положень, з яких 2 є виродженими, оскільки вони призводять до нульового значення результируючого вектора.

Регулювання частоти трифазної напруги на виході АІН здійснюється зміною частоти перемикаць транзисторних ключів. Зміна амплітуди трифазної напруги відбувається за допомогою широтно-імпульсного регулювання.

У сучасних IGBT час перемикання складає менше однієї мікросекунди. Така висока швидкість перемикання дозволяє повністю реалізувати переваги методу широтно-імпульсної модуляції: здійснювати комутацію на частоті понад 16 кГц, що вирішує проблему акустичних шумів і зменшує масу та габарити реактивних елементів – фільтрів вищих гармонік. Крім того, при великій кратності частоти комутації і низькій частоті вихідної напруги значно підвищується швидкодія системи регулювання, що поліпшує динамічні характеристики перетворювача.

Однак з підвищенням частоти комутації зростає частка комутаційних втрат, що змушує знижувати припустимі струми і напруги при частотах 5 кГц і вище. Збільшення комутаційних втрат знижує перевантажувальну здатність транзисторів. Швидке перемикання транзисторів через ефект di/dt на паразитних індуктивностях у контурі комутації призводить до появи значних перенапруг на елементах схеми. При швидких перемиканнях транзисторів на виході перетворювача швидкість зміни напруги може досягати 5000 В/мкс. Якщо довжина сполучних кабелів між перетворювачем і навантаженням становить 10-100 м і більше, то напруги можуть досягати двократних значень стосовно номінальних. Це явище особливо небезпечне в регульованих електроприводах, оскільки під впливом швидко зростаючих імпульсів напруги з крутим фронтом може бути пошкоджена ізоляція двигуна.

Зазначені проблеми виникають при жорсткій комутації та використанні широтно-імпульсної модуляції в класичному варіанті. Очевидним шляхом вирішення цих труднощів є зниження швидкості перемикаць. Зниження частоти ШІМ є бажаним, однак це призводить до збільшення амплітуд найближчих до основної вищих гармонік на виході інвертора, що спричиняє зростання втрат у двигуні. З іншого боку, ШІМ суттєво ослаблює лише

гармоніки, найближчі до основної. Для ослаблення гармонік вищої частоти необхідно підвищувати частоту комутації ключів інвертора, що, у свою чергу, призводить до збільшення втрат у перетворювачі частоти.

Інший напрямок цих робіт пов'язаний з відродженням техніки резонансних інверторів, де «м'яке» перемикання вентилів відбувається при нульовому струмі або напрузі. Недоліком цієї схеми є те, що форма одержуваної фазної напруги відрізняється від синусоїди, що погіршує енергетичні характеристики АД у порівнянні з енергетичними характеристиками двигуна, що живиться від трифазної синусоїдальної напруги. Для покращення енергетичних характеристик привода застосовуються різні методи широтноімпульсної модуляції: синусоїдальні, лінійні та їх модифікації. Широтноімпульсна модуляція має на меті ослаблення значних за амплітудою вищих гармонік, найближчих до основної. Це досягається шляхом періодичної зміни основної діаграми роботи ключів інвертора протягом періоду повторюваності $T/6$, з одночасним введенням нульових ділянок.

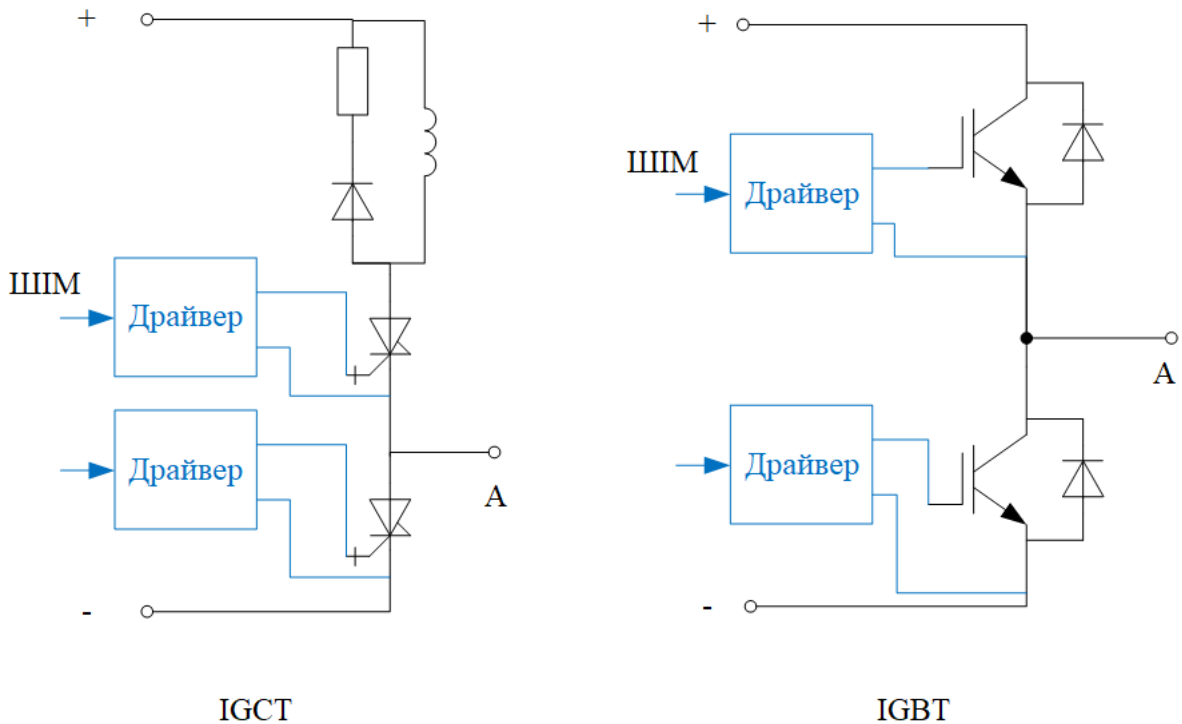


Рис.14.18. Схеми напівмостів для різних типів силових ключів:
 а – IGCT (integrated gate-commutated thyristor);
 б – IGBT (insulated-gate bipolar transistor);

На рис. 14.18 показані фазові плечі IGCT і IGBT інверторів напруги, де можна побачити кількість основних компонентів в інверторі. В цьому контексті IGBT є найбільш ефективним рішенням, оскільки дозволяє використовувати мінімальну кількість елементів, а керуючі блоки є частиною IGBT-модулів. Для струмів до 200 А повний інвертор може бути виготовлений у вигляді одного модуля, що складається лише з одного компонента, але при

1200 А ця кількість становить 6 (6 окремих ключових модулів), а для 3600 А – 18 (3 × 1200 А).

З точки зору надійності, кількість компонентів відповідає кількості необхідних дискретних елементів у модульному або іншому виконанні, яке постачається виробником напівпровідників. Таким чином, інвертор на силових IGBT для струму 50 А (без використання паралельних сполучень приладів) мав би 18 пристроїв (IGBT + діод + керуючий блок), кожен з яких має визначену норму наробітку на відмову. Ці норми залежать від багатьох факторів: кількості кристалів, монтажних проводів, паяних і рознімних з'єднань, робочої температури, електричних і механічних навантажень тощо. Кожен напівпровідниковий елемент має типову норму наробітку на відмову, наприклад, 10 (10 відмов протягом 10^8 годин роботи), а безпосередньо керуючий драйвер, який складається з багатьох активних і пасивних компонентів, має норму відмови близько 500.

IGBT складаються з багатьох стандартних індивідуальних кристалів, встановлених паралельно, що є як їх сильною, так і слабкою стороною. Стандартні кристали дозволяють виготовляти стандартні пластини, які завершуються одним виробом для струму від 50 до 1000 А, а монолітний підхід, заснований на використанні кристалів, вирізаних з великої пластини, забезпечує найкраще використання кремнію. Однак з ростом струму приладу пропорційно збільшується норма відмовлення.

У той час як GTO, незважаючи на монолітну провідникову структуру, потребує багатьох допоміжних компонентів, і, як видно з рис. 14.16, кожен ключ має свій коефіцієнт норми відмовлення (не кажучи вже про вартість і масогабаритні параметри).

Однією з характеристик «ідеального» ключа є надійність, що означає, що загальний складовий показник має бути обмежений, незалежно від того, чи досягають компоненти видимих розмірів. У цьому контексті технологія IGCT гарантує, що в інверторі буде мало зовнішніх компонентів (приблизно 3), а всі «внутрішні» напівпровідники будуть монолітними. На рис. 14.19 показано порівняння кількості силових компонентів (пасивні елементи + кристали, без елемента керування) для інвертора, що працює від 2,8 кВ з двопозиційним ШІМ на частоті 600 Гц для трьох технологій.



Рис.14.19. порівняння кількості силових компонентів різних типів силових ключів інверторів

На рис. 14.20 показана схема двоключового «інтелектуального» силового IGBT-модуля, який має повний набір захистів від перевантаження по струму, короткого замикання, перенапруги та перегріву силових елементів.

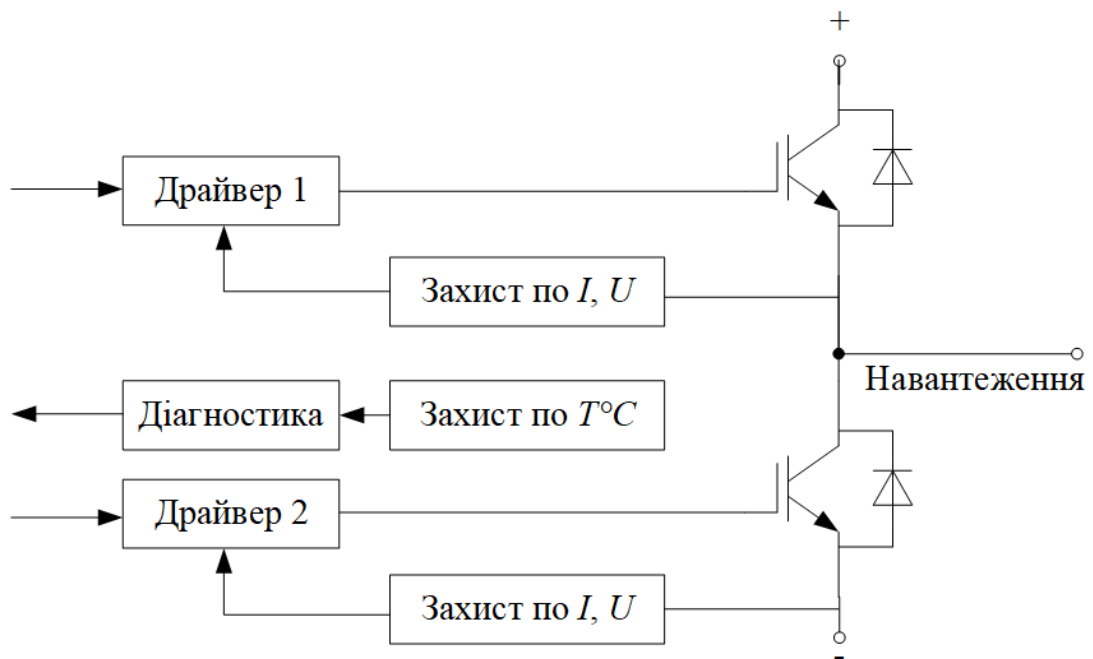


Рис.14.20. Схема двоключового «інтелектуального» силового IGBT-модуля

В електроприводі постійного струму основні методи керування реалізуються через зміну напруги якоря та потоку збудження. Для забезпечення керування двигуном постійного струму у всіх режимах роботи, включаючи реверсивний режим з рекуперацією енергії в джерело живлення, найбільш ефективним є використання схеми, що забезпечує роботу в чотирьох квадрантах на стороні постійного струму, виконаної на повністю керованих ключах і регульованої методом широтно-імпульсної модуляції (рис.14.21). На рисунку: а – схема; б – діаграма станів транзисторів.

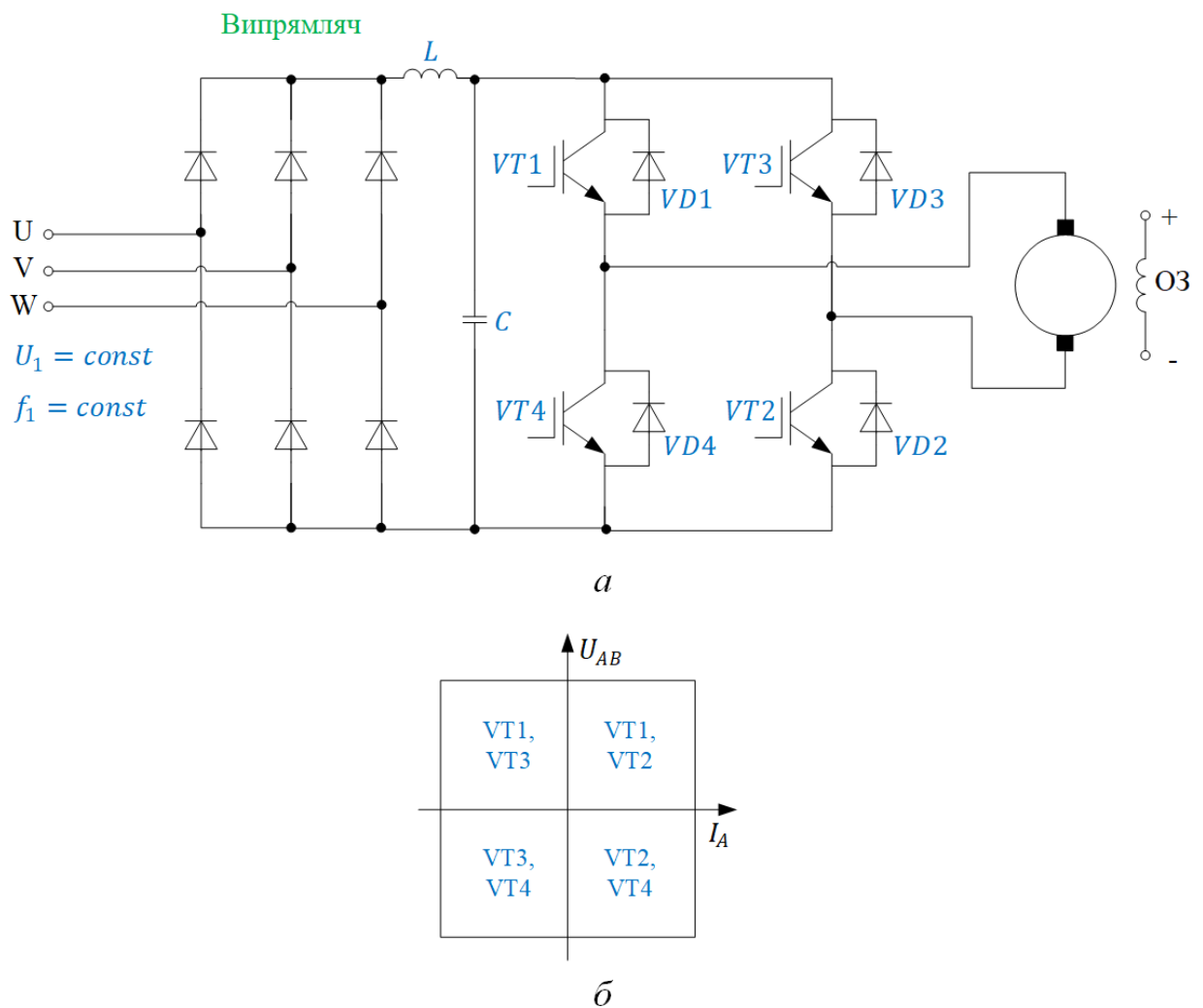


Рис.14.21. Реверсивна схема перетворювача для приводу постійного струму на повністю керованих силових ключах

Контрольні запитання

1. В чому полягає принцип електромашинного перетворювача змінного струму в постійний?
2. Яким чином регулюється вихідна напруга в електромашинному перетворювачі?
3. Навести принцип роботи тиристора і його вольт-амперну характеристику. Як залежить вихідна напруга від кута відпирання тиристора?
4. Навести схему і діаграми напруг та струмів шестипульсного тиристорного мостового випрямляча.
5. Навести схему та діаграми напруг і струмів перетворювача постійного струму з імпульсним регулюванням напруги.
6. Розкрити принцип роботи і схему перетворювача частоти з ланкою постійного струму із тиристорним інвертором
7. Навести схему перетворювача частоти із ланкою постійного струму на повністю керованих силових ключах.
8. В чому полягає принцип широтноімпульсної та частотноімпульсної модуляцій?

9. Чому не слід розташовувати двигун на віддаленні від перетворювача частоти через ефект di/dt та паразитні індуктивності в контурі комутації?

10. В чому полягає особливість «інтелектуального» силового IGBT-модуля?

Рекомендована література

[2] – с. 151-165;

[4] – с. 10-20;

[5] – с. 77-81; 133-136.

Розділ 6. ТИПОВІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Лекція 15. Асинхронно-вентильні каскади. Фазове керування АД

Тема 6.1. Асинхронно-вентильні каскади

Тема 6.2. Асинхронний електропривод із фазовим керуванням

Тема 6.1. Асинхронно-вентильні каскади

Один із найпростіших методів регулювання швидкості АД з фазним ротором полягає у підключенні додаткових резисторів у роторне коло. Проте це значно знижує ККД електропривода на регульовальних характеристиках, оскільки втрати ковзання, що виникають у роторних резисторах, не використовуються корисно:

$$\Delta P = P_1 s = M \omega_0 s. \quad (15.1)$$

При потужності електропривода від кількох сотень кВт і більше втрати ковзання стають суттєвими в абсолютному вираженні. Безпосереднє використання енергії ковзання неможливе, оскільки напруга і частота струму в роторі не лише відрізняються від параметрів мережі живлення, а й змінюються залежно від ковзання двигуна. Тому повне використання цієї енергії неможливе без застосування перетворювача електроенергії в роторному колі. Існують два основні способи ефективного використання енергії ковзання – її повернення на вал АД або до мережі живлення.

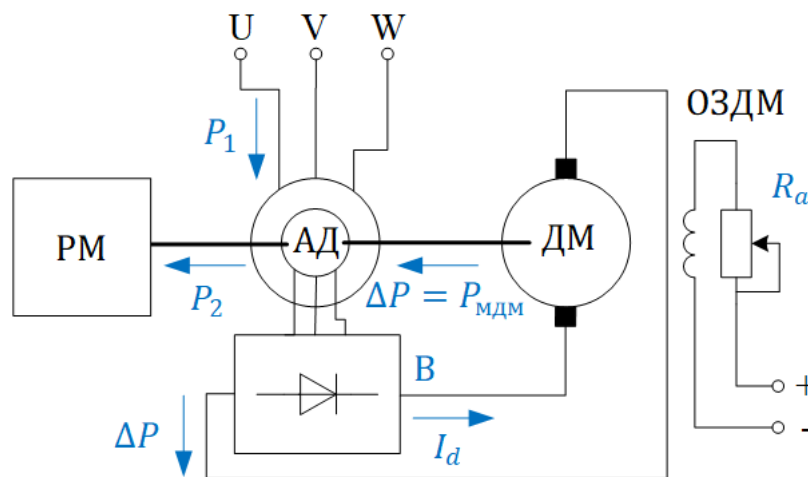


Рис.15.1. Схема АВК із некерованим випрямлячем

У асинхронно-вентильному машинному каскаді (АВМК) обмотка ротора АД, що приводить у рух робочий механізм РМ, з'єднується з некерованим випрямлячем (рис. 15.1). ЕРС випрямляча протилежна за напрямком до ЕРС допоміжної машини постійного струму ДМ. АД і ДМ жорстко з'єднані загальним валом. Потужність ковзання ΔP , за винятком втрат у роторі АД, перетворювачі та допоміжній машині, подається на вал як механічна потужність від ДМ:

$$\Delta P = P_{\text{мдм}} \quad (15.2)$$

Уся електромагнітна потужність передається асинхронному двигуну (за умови нехтування втратами в каскадній схемі):

$$P_2 = P_1 - \Delta P + \Delta P = P_1. \quad (15.3)$$

Отже, потужність, яку створює каскад, залишається сталою незалежно від ковзання (швидкості). Такі каскади називають **каскадами постійної потужності**. Повернення потужності ковзання в мережу реалізується у наступній схемі АМВК (рис. 15.2), де допоміжна машина не має механічного зв'язку, а об'єднана валом із синхронним генератором СГ, підключеним до мережі змінного струму.

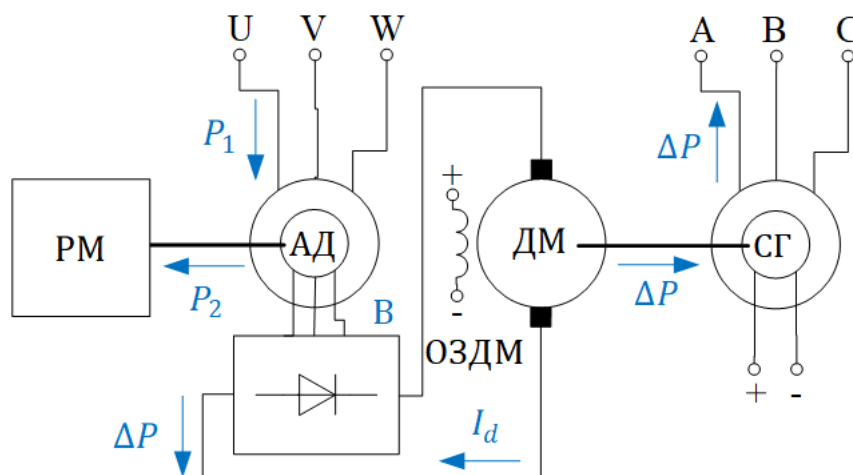


Рис.15.2. Схема АМВК із синхронним генератором

Потужність втрат не передається на вал робочої машини, а через генератор подається в мережу:

$$P_2 = P_1 - \Delta P = P_1 - P_1 s = P_1 (1 - s). \quad (15.4)$$

Недоліки АМВК обумовлені наявністю допоміжних машин. Зазвичай практичний діапазон регулювання швидкості в машинних каскадах не перевищує двократного значення. Це пов'язано з тим, що зі збільшенням діапазону регулювання необхідно підвищувати встановлену потужність усіх елементів роторного кола АД. Наприклад, при діапазоні 2:1, встановлена потужність електричного АМВК становить 250%, з яких: АД – 100%, випрямляч, допоміжна машина та синхронний генератор – по 50%.

Найбільше поширення отримали АВК (рис. 15.3), де перетворювач включає некерований випрямляч і інвертор, керований мережею. Трансформатор використовується для узгодження напруг інвертора з мережею.

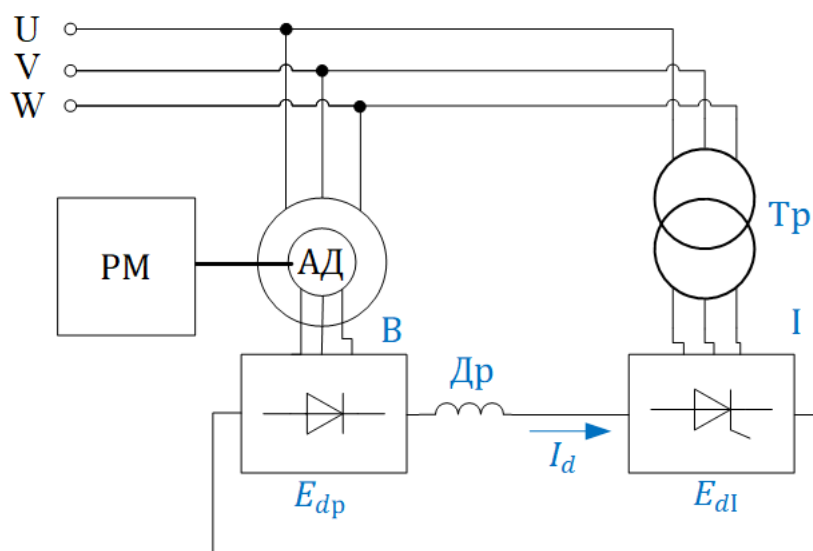


Рис.15.3. Схема АВК із інвертором напруги

Однією з головних переваг цієї схеми є те, що при обмеженому діапазоні регулювання швидкості потужність перетворювача в роторному колі двигуна є меншою за потужність самого двигуна:

$$P_{\Pi} = P_{\text{АД}} s_{\text{макс}}, \quad (15.5)$$

де P_{Π} – потужність перетворювача; $s_{\text{макс}}$ – ковзання, яке відповідає мінімальній швидкості АД.

Ефективність вентиляного каскаду тим вища, чим менша потужність перетворювача та чим більша кількість енергії повертається в мережу. Тому АВК доцільно використовувати, переважно для електроприводів великої потужності з тривалим режимом роботи та обмеженим діапазоном регулювання швидкості (наприклад, для вентиляторів, насосів, компресорів тощо). Рекуперація електроенергії покращує енергетичну ефективність цього способу регулювання швидкості АД у порівнянні з методами, де енергія, що виділяється в роторному колі, розсіюється у вигляді теплоти. Однак АВК має суттєвий недолік – низький коефіцієнт потужності, що вимагає використання компенсуючих пристроїв.

Погіршення коефіцієнта потужності пояснюється тим, що активна потужність, яку споживає електропривод, є різницею між потужностями, підведеними до статора АД, і рекуперованою перетворювачем. Реактивна потужність каскаду дорівнює сумі реактивних потужностей АД та перетворювача. Коефіцієнт потужності АД також залежить від кількості пар полюсів: двигуни з меншим числом пар полюсів (вищими швидкостями) мають вищий номінальний коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{\text{н}}$.

Коефіцієнт потужності перетворювача визначається кутом випередження ввімкнення вентилів інвертора, що залежить від режиму роботи електропривода.

Середнє значення випрямленої ЕРС ротора:

$$E_{dp} = E_{dp0} s, \quad (15.6)$$

де $E_{dp0} = K_{cx} E_{2H}$ – максимальне значення випрямленої ЕРС ротора;
 E_{2H} – номінальна ЕРС ротора.

Середнє значення випрямленої ЕРС інвертора:

$$E_{di} = E_{di0} \cos \beta, \quad (15.7)$$

де $E_{di0} = K_{cx} E_{2тр}$ – максимальне значення випрямленої ЕРС інвертора;
 β – кут випередження вмикання вентилів.

При роботі електропривода в робочій зоні частот обертання середнє значення ЕРС перетворювача наближається до нуля, а кут випередження дорівнює 90° . Таким чином, АВК, на відміну від приводу постійного струму чи ВД, характеризується найбільшим споживанням реактивної енергії та найбільшими значеннями коефіцієнтів спотворення й гармонік саме в зоні робочих швидкостей, близьких до номінальної.

Величини коефіцієнтів спотворення та гармонічних складових тим більші, чим більше форма вихідної напруги перетворювача відрізняється від синусоїдальної. При $\beta = 90^\circ$ напруга перетворювача має пилкоподібну форму, причому середнє значення ЕРС дорівнює нулю, а амплітуда викидів напруги може досягати подвійного значення номінальної ЕРС вторинної обмотки трансформатора. Тому при роботі АВК в області номінальних швидкостей перетворювач відключають, а ротор АД закорочують (шунтують), що є недоліком електропривода.

Реалізація енергозберігаючих переваг АВК передбачає вибір керуючої апаратури меншої потужності, ніж установлена потужність електродвигуна. Однак у цьому випадку можливий лише реостатний пуск АД до половинної швидкості, що спричиняє переключення в силових колах під час руху і підвищення загальних втрат енергії при пуску.

Ще один недолік АВК – відсутність гальмівного режиму. Для здійснення електродинамічного гальмування необхідно відключити систему АВК, увімкнути трифазний реостат у ротор АД, а в дві фази статора подати постійний струм.

Середнє значення випрямленого струму визначається виразом:

$$I_d = \frac{E_{dp0} s - E_{di0} \cos \beta}{R_{es}}, \quad (15.8)$$

де R_{es} – еквівалентний опір кола перетворювача АВК.

При $I_d = 0$ електропривод працюватиме в режимі холостого ходу:

$$E_{dp0} s = E_{di0} \cos \beta. \quad (15.9)$$

Ковзання, яке відповідає кутовій швидкості холостого ходу при заданому куті випередження β :

$$s_0 = \frac{E_{di0}}{E_{dp0}} \cos \beta. \quad (15.10)$$

Механічні характеристики в системі АВК (рис. 15.4) розміщуються нижче природної:

$$I_d = \frac{E_{dpo}s - E_{dpo}s_0}{R_{es}} = \frac{E_{dpo}}{R_{es}}(s - s_0), \quad (15.11)$$

а критичний момент зменшується на 15...17% порівняно з критичним моментом на природній характеристиці:

$$M = \frac{E_{dpo}^2}{\omega_0 R_{es}^2} R_{es0}(s - s_0), \quad (15.12)$$

Де R_{es0} – еквівалентний опір кола перетворювача при ковзанні s_0 .

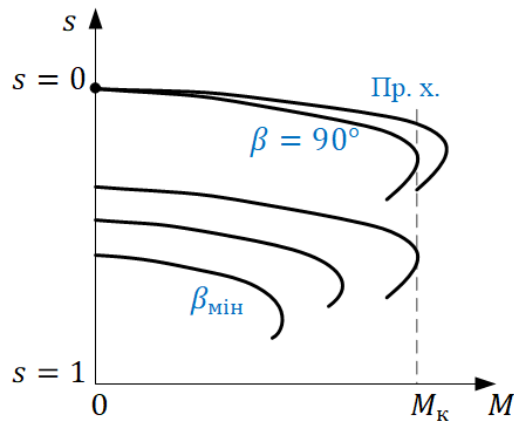


Рис.15.4. Механічні характеристики електропривода за системою АВК

На рис. 15.5 представлена схема АВК з покращеними енергетичними показниками.

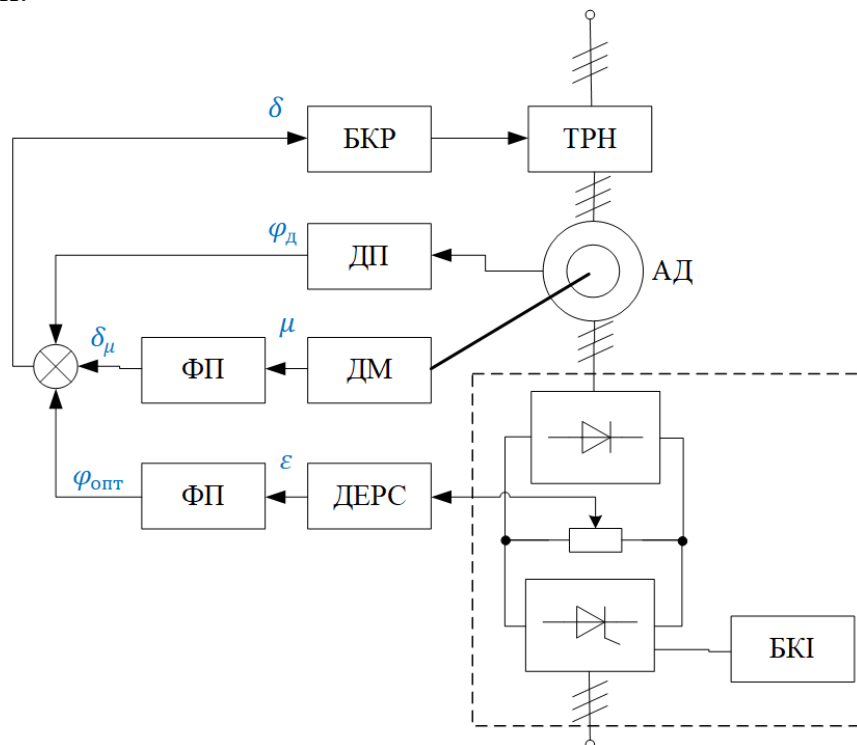


Рис.15.5. Схема АВК з покращеними енергетичними показниками

Така схема АВК включає: тиристорний регулятор напруги ТРН, блок керування БКР; перетворювач з ланкою постійного струму з блоком керування БКІ; датчики моменту ДМ і потоку ДП; функціональний перетворювач ФП1, який реалізує функцію виду:

$$\delta_{\mu} = de^{\mu f} + g, \quad (15.13)$$

де d, f, g – постійні величини; датчик ЕРС – ДЕРС, а також другий функціональний перетворювач ФП2, що реалізує функцію виду:

$$\varphi_{\text{опт}} = a\varepsilon^b + c, \quad (15.14)$$

де a, b, c – постійні величини.

Сигнал $\varepsilon = E_2/E_{2н}$, що є ЕРС інвертора, подається на ФП2, де генерується сигнал оптимального потоку $\varphi_{\text{опт}}$ (рис. 15.6,а), який відповідає номінальному навантаженню на валу асинхронного двигуна. З датчика моменту зчитується сигнал μ , що відображає момент навантаження АД, і надходить на ФП1, де створюється сигнал δ_{μ} – поправка до моменту (рис. 15.6,б). У суматорі відбувається порівняння сигналів $\varphi_{\text{опт}}$, δ_{μ} та потоку $\varphi_{\text{д}}$, що присутній у зазорі АД. На виході суматора формується сигнал:

$$\delta = \varphi_{\text{опт}} + \delta_{\mu} + \varphi_{\text{д}}, \quad (15.15)$$

що впливає на керуючий блок регулятора. Напруга на виході ТРН змінюється до тих пір, поки сигнал δ не дорівнюватиме нулю ($\delta = 0$), що відповідає оптимальному значенню потоку $\varphi_{\text{д}}$ у зазорі АД з урахуванням фактичного навантаження на валу, тобто

$$\varphi_{\text{д}} = \varphi_{\text{опт}} + \delta_{\mu}. \quad (15.16)$$

В електроприводі за допомогою другого нелінійного блоку можна реалізувати різні закони керування, зокрема:

- за мінімальним струмом I_{1min} статора (рис. 15.16,а);
- мінімальними сумарними втратами $\Delta P_{\Sigma min}$;
- мінімальною споживаною потужністю ΔP_{1min} ;
- за максимальним ККД η_{max} .

У загальному випадку на другому нелінійному блоці формується залежність між відносною величиною ε додаткової ЕРС інвертора і відносною величиною $\varphi_{\text{опт}}$ оптимального потоку двигуна.

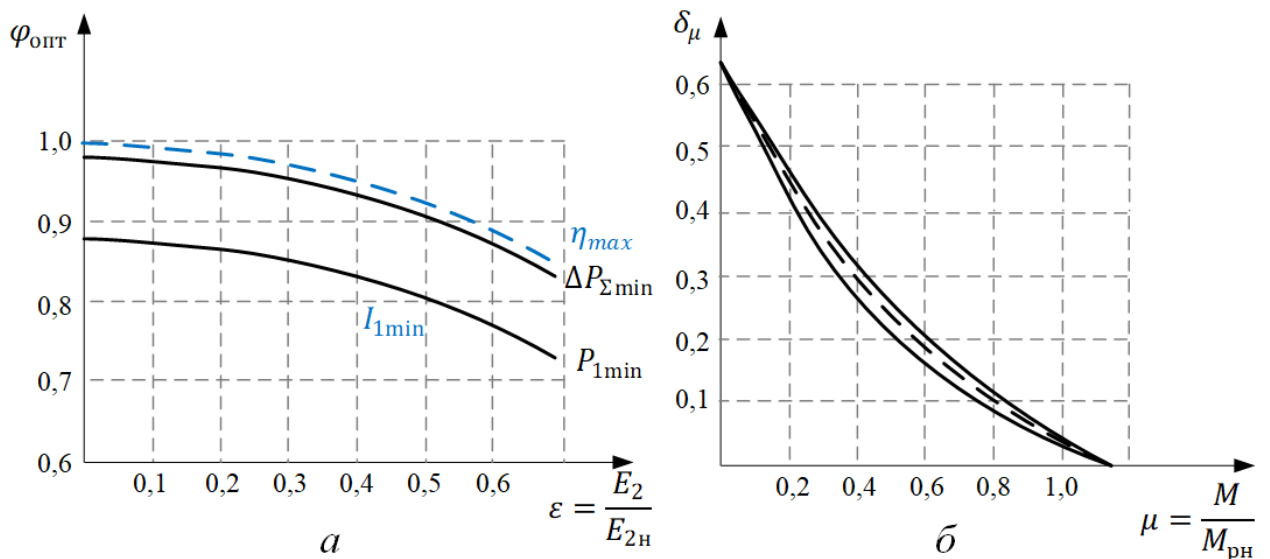


Рис.15.6. Залежності керованих параметрів АВК:
а – оптимального потоку; б – корекції до моменту

Тема 6.2. Асинхронний електропривод із фазовим керуванням

Найбільшим споживачем електроенергії є електроприводи змінного струму, особливо асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, які споживають близько половини всієї виробленої у світі електроенергії. З огляду на те, що більшість цих двигунів працює з недовантаженням, це суттєво впливає на зниження ККД і $\cos\varphi$ як самих двигунів, так і електропривода в цілому.

Найпростіші з систем фазового керування виконані за схемою зустрічно-паралельного підключення тиристорів і застосовуються для регулювання напруги та забезпечення “м’якого” запуску АД. Залежно від фактичного коефіцієнта завантаження K_3 , мінімальне значення напруги регулятора повинно враховувати коефіцієнт запасу $(1,2 \dots 1,3)^{\wedge}$

$$U = (1,2 \dots 1,3) \sqrt{K_3} U_{\text{ном}} \quad (15.17)$$

Механічні характеристики АД з фазовим керуванням показано на рис. 15.7. У разі, якщо механізм має вентиляторний статичний момент M_{c1} , запуск і подальша робота двигуна здійснюються при напрузі U_3 . Якщо ж статичний момент M_{c2} є сталим, то запуск відбувається при напрузі U_1 з подальшим перемиканням на напругу U_3 .

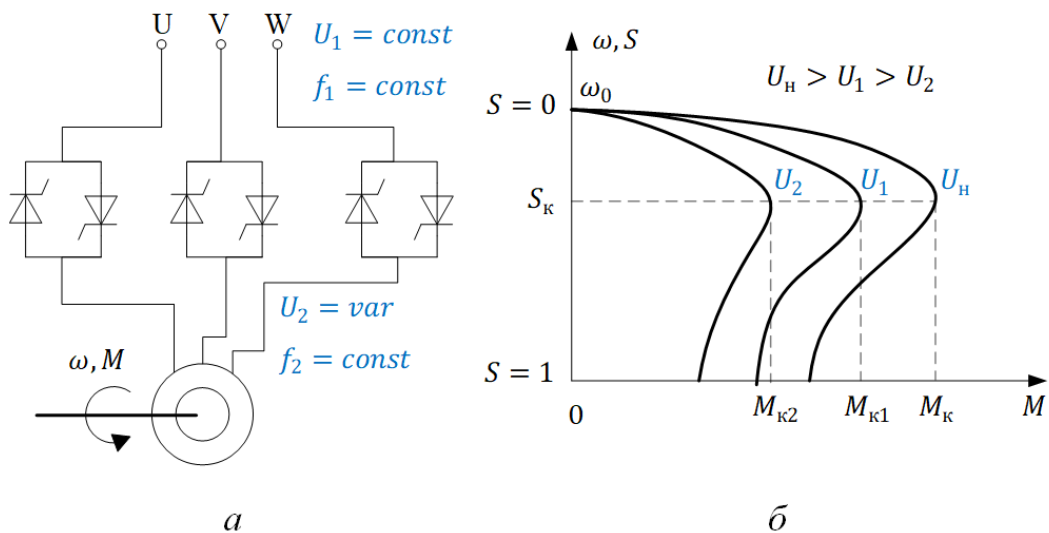


Рис.15.7. Схема перетворювача підключення (а) та механічні характеристики (б) АД з фазовим керуванням

У процесі розробки та проєктування енергозберігаючих систем електропривода на базі АД з високими техніко-економічними та енергетичними характеристиками важливим аспектом є встановлення умов мінімізації втрат у двигуні. Оптимальне керування особливо актуальне для механізмів, що працюють у тривалих режимах, де досягнення високих енергетичних показників має вирішальне значення.

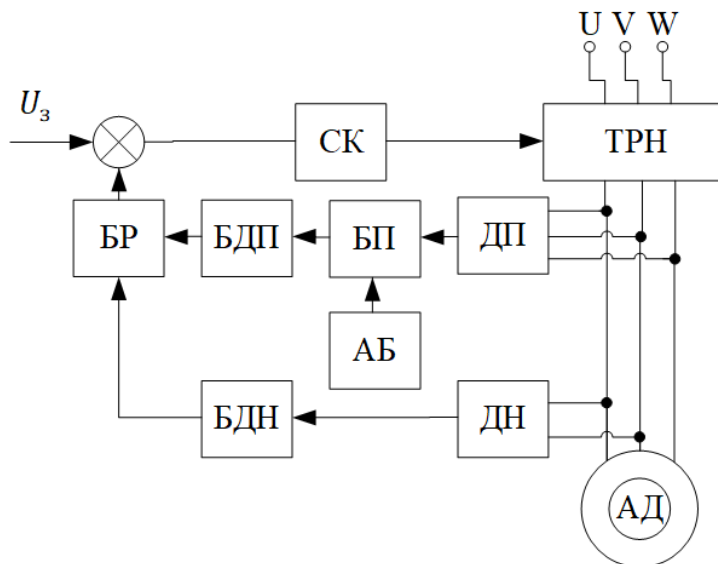


Рис.15.8. Схема енергозберігаючого асинхронного електроприводу з екстремальним керуванням.

На рис. 15.8 зображена схема енергозберігаючого асинхронного електроприводу з екстремальним керуванням. До складу приводу входять:

- тиристорний регулятор напруги ТРН;
- система керування СК;
- датчик напруги ДН;

- блок диференціювання сигналу напруги БДН;
- датчик потужності ДП, підключений до блоку перемноження БП;
- арифметичний блок АБ;
- блок диференціювання сигналу потужностей БДП;
- блок розподілу БР.

У робочому режимі електродвигуна на виходах датчиків ДН і ДП утворюються сигнали. Сигнал з ДП перемножується з сигналом, пропорційним величині $(1 - \eta_n)$, що надходить з АБ. На виході БП формується сигнал, пропорційний сумі втрат ΔP в електродвигуні, що складаються з електромагнітних і механічних втрат. Продиференційований сигнал $\frac{d\Delta P}{dt}$ втрат потужності в БДП поділяється на диференційований сигнал $\frac{d}{dt}$ у БР.

Відповідно, на виході цього блоку формується сигнал $\frac{\frac{d\Delta P}{dt}}{\frac{d}{dt}} = \frac{d\Delta P}{d}$.

Залежно від навантаження сигнал, рівний $\frac{d\Delta P}{d}$, змінює свій знак. Для забезпечення екстремального регулювання вихідне значення цього сигналу повинно бути нульовим. У суматорі здійснюється віднімання або додавання сигналів, що забезпечує роботу електродвигуна в екстремальній зоні регулювання при різних значеннях навантаження на валу.

Отже, система асинхронного електропривода з екстремальним керуванням забезпечує мінімізацію сумарних втрат АД при будь-якому рівні навантаження, що призводить до значного підвищення ККД електропривода та ефективного використання встановленої потужності АД.

Контрольні запитання

1. Чому реостатне регулювання асинхронних двигунів є неефективним?
2. За яким принципом працює каскад постійної потужності? Навести схему підключення.
3. Навести схему асинхронно-вентильного машинного каскаду із можливістю віддачі енергії в мережу живлення. Які недоліки такої схеми електроприводу?
4. Навести схему асинхронно-вентильного каскаду із інвертором. В чому полягають основні недоліки подібної схеми?
5. Побудувати механічні характеристики системи АВК із інвертором.
6. В чому полягає принцип роботи системи АВК із поліпшеними енергетичними показниками?
7. Як можна забезпечити "м'який" пуск асинхронного двигуна?
8. Пояснити принцип роботи схеми енергозберігаючого асинхронного електроприводу із екстремальним керуванням.

Рекомендована література

- [2] – с. 108-118;
- [4] – с. 36-38

Лекція 16. Вентильний двигун

Тема 6.3. Вентильний двигун

6.3.1. Принцип роботи і способи керування ВД

6.3.2. Оптимізація параметрів електрообладнання вентильних двигунів

Тема 6.3. Вентильний двигун

6.3.1. Принцип роботи і способи керування ВД

Одним із найперспективніших і універсальних типів електроприводів із синхронними машинами є безконтактний або безколекторний електропривод, у якому регулювання швидкості та моменту здійснюється шляхом зміни підведеної напруги, струму збудження та кута випередження вмикання вентилів при самокерованому живленні за частотою. Такий привод поєднує регульовальні властивості машин постійного струму з надійністю систем змінного струму.

Звичайний синхронний двигун має вищу надійність порівняно з іншими типами і за вартістю поступається лише асинхронному двигуну з короткозамкненим ротором. Безконтактність синхронного двигуна досягається як традиційними методами (через безщітчні системи збудження з обертовими випрямлячами), так і новітніми підходами (використанням постійних магнітів на роторі, ротора з кігтеподібними полюсами, обмотки збудження на статорі тощо).

Завдяки простоті найбільшого поширення набули вентильні двигуни (ВД) постійного (рис. 16.1,а) і змінного струму (рис. 16.1,б) з перетворювачами, що працюють у режимі джерела струму.

На відміну від частотного приводу, в таких електроприводах комутація тиристорів відбувається за рахунок електрорушійної сили двигуна (машинна комутація) з використанням датчика положення ротора (ДПР). Машинна комутація дозволяє уникнути використання громіздких і високовольтних реактивних компонентів в інверторі, що значно спрощує схему, зменшує її габаритну потужність і покращує якість перетворення енергії. Однак під час пуску або при малих швидкостях виникає проблема зриву комутації через відсутність або незначне значення ЕРС.

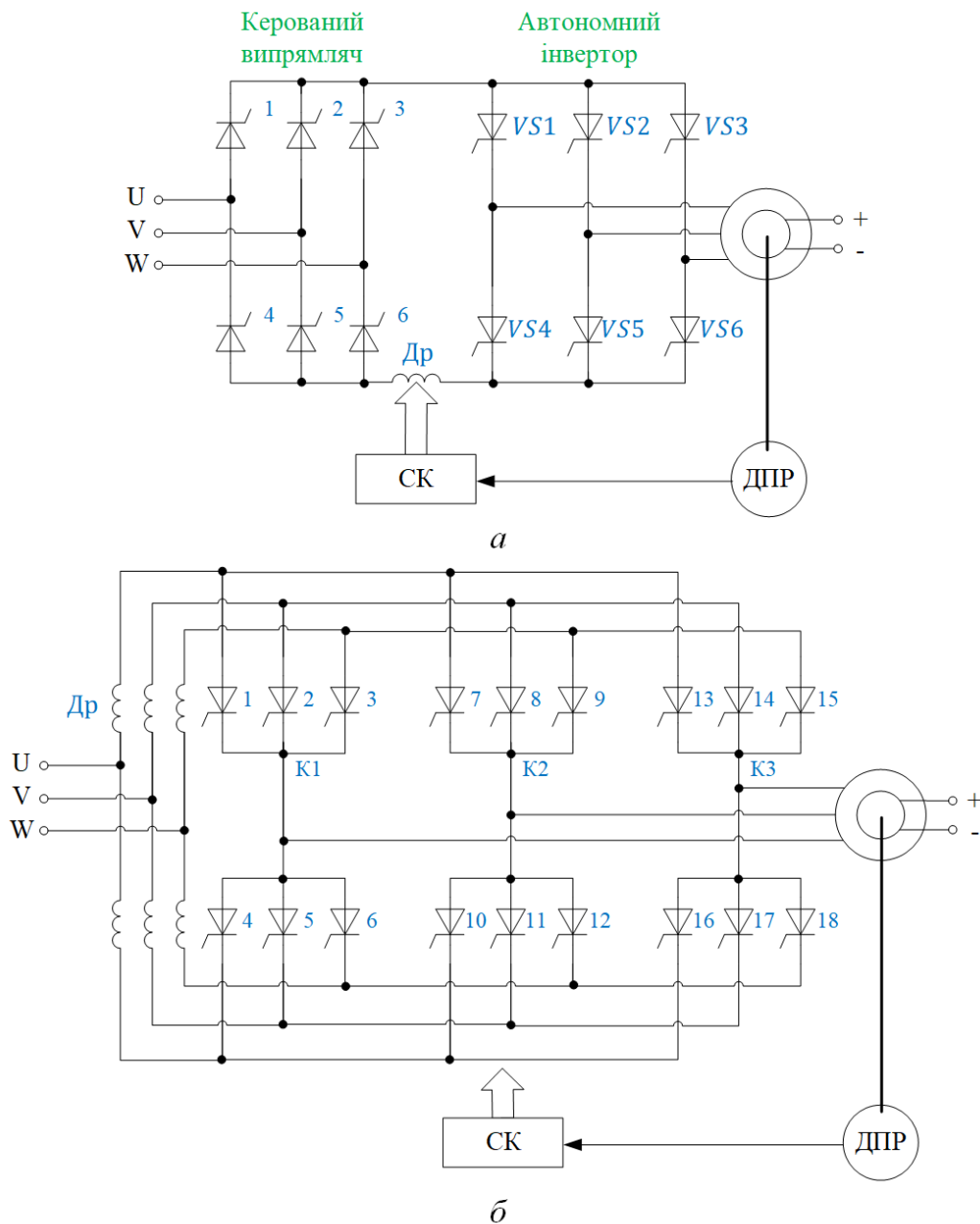


Рис. 16.1. Вентильний двигун постійного (а) та змінного (б) струму

У електроприводах постійного струму можливі такі варіанти пуску:

- асинхронний;
- з штучною комутацією;
- з примусовою комутацією.

Асинхронний пуск, попри свою зовнішню простоту, має суттєві недоліки – пуск некерований і вимагає перемикачів у силових, зазвичай високовольтних колах.

Пуск із штучною комутацією використовує автономний інвертор, у якому задіяна реактивна енергія комутуючих компонентів (конденсаторів і дроселів). Такий підхід значно ускладнює схему та призводить до збільшення маси і вартості інвертора.

Третій варіант **пуску з примусовою комутацією** реалізується шляхом відсікання керуючих імпульсів або періодичного переведення випрямляча в інверторний режим під час комутації тиристорів. Цей метод потребує мінімальних витрат. Його основні недоліки – зменшення пускового моменту двигуна та певне зростання споживання реактивної потужності.

Пуск із примусовою комутацією також може бути реалізований у схемі з некерованим випрямлячем, де інвертор здійснює широтно-імпульсне регулювання напруги. Для цього необхідне використання в інверторі транзисторів або тиристорів, що здатні запиралися (Gate Turn-Off Thyristor, (GTO) або Integrated Gate-Commutated Thyristor(IGCT)).

Найпростішим способом вирішення проблеми пуску є система з циклоконвертором (рис. 16.1, б), де функції випрямлення та інвертування виконують ті самі тиристиори, що дозволяє перетворювати напругу та частоту джерела безпосередньо в напругу і частоту двигуна. Така система має більше тиристорів, ніж перетворювач з ланкою постійного струму, але завдяки відсутності пускових пристроїв, одноразовому перетворенню енергії та зменшеному тепловому навантаженню на тиристиори вона є економічною та надійною.

У схемі з циклоконвертором природна комутація відбувається в усьому швидкісному діапазоні роботи електроприводу як між тиристорами в працюючих групах, так і між тиристорами однополярних груп. Останнє має місце, коли сигнали на перемикання фаз мережі і двигуна збігаються за часом. Машинна комутація здійснюється завдяки ЕРС двигуна між тиристорами однополярних груп при частотах, що перевищують 0,1...0,15 частоти обертання двигуна.

ВД з комутатором струму має два режими роботи: міжкомутаційний і комутаційний. **У міжкомутаційному режимі** струм протікає через дві фази, а **в комутаційному** – через три. Тривалість міжкомутаційного періоду для кожної фази дорівнює $\frac{2\pi}{m} - \gamma$, а комутаційного – γ .

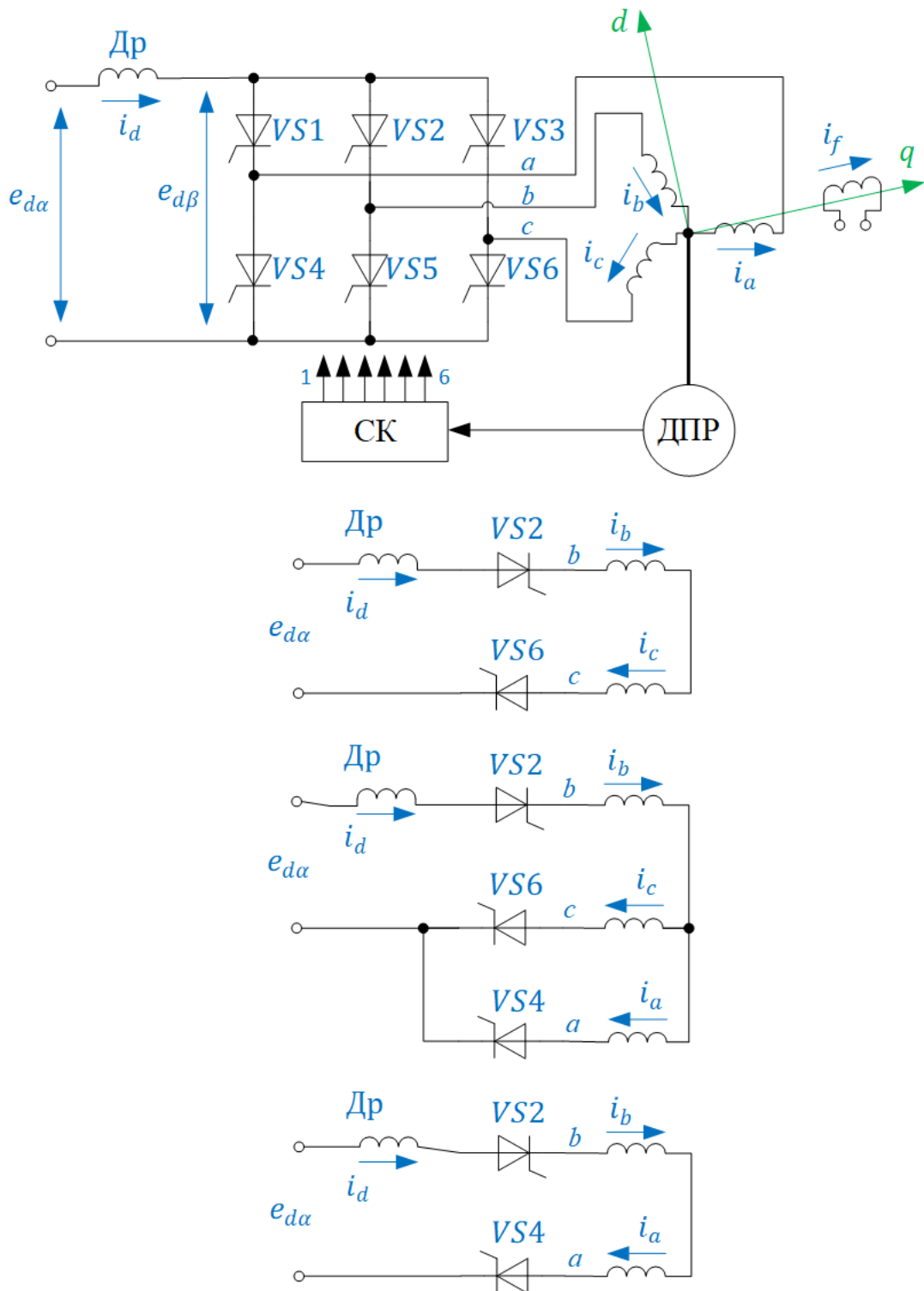


Рис. 16.2. Схеми електричних кіл ВД постійного струму

Схеми електричних кіл електроприводів постійного струму зображені на рис. 16.2.

У будь-який момент часу, що відповідає черговому міжкомутаційному періоду, тиристри 2 і 6 відкриті, а інші закриті. Синхронна машина навантажена за двома колами:

$$i_a = 0; \tag{16.1}$$

$$i_b = I_d;$$

$$i_c = -I_d;$$

де I_d – середнє значення струму двигуна.

Коли лінійна ЕРС E_{ca} змінює знак, на тиристорі 4 анодна напруга стає додатною, і після подачі імпульсу на керуючий електрод розпочинається режим комутації:

$$i_a = -i_k;$$

$$i_b = I_d;$$

(16.2)

$$i_c = -I_d + i_k;$$

де i_k – струм комутації.

Коли $i_c = 0$, тиристор 6 запирається і розпочинається новий міжкомутаційний період:

$$i_a = -I_d;$$

$$i_b = I_d;$$

(16.3)

$$i_c = 0.$$

Порівняння виразів свідчить, що вони відрізняються лише індексами, які циклічно змінюються відповідно до положення ротора. Початок комутаційного періоду зумовлений кутовим положенням ротора відносно осей фаз статора і визначається системою керування інвертором або датчиком положення ротора. Початок міжкомутаційного періоду залежить від тривалості комутаційного процесу та визначається значеннями струмів і комутаційних опорів.

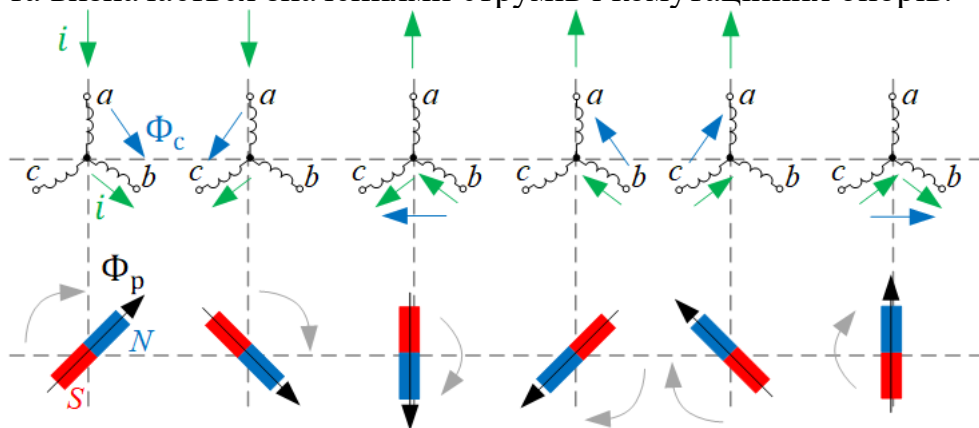


Рис. 16.3. Утворення результуючого магнітного потоку залежить від кута обертання ротора ВД

Формування підсумкового магнітного потоку залежно від кута обертання ротора ВД ілюструє рис. 16.3.

Робота синхронного двигуна зі вентиляним комутатором, що керується за положенням ротора, є циклічною послідовністю нормального функціонування двох фаз і коротких замикань між ними. У періоди між комутаціями магніторушійна сила статора залишається незмінною, а під час

комутації повертається на 60° . У повітряному зазорі машини виникають два магнітні потоки – індуктора та реакції якоря, які рівномірно обертаються в статичному режимі з кутовою швидкістю ротора. У шестипульсній схемі МРС статора протягом одного оберту вала займає шість дискретних положень. Завдяки згладжувальному ефекту магнітної системи двигуна, у діапазоні частот машинної комутації в обмотках статора індукуються майже синусоїдальні ЕРС.

Існують наступні методи керування комутатором ВД. Найпростіший з них (рис. 16.4) полягає в утриманні сталого значення кута випередження

$$\beta_0 = const, \quad (16.4)$$

де $\beta_0 = \beta + \theta$; θ – кут навантаження синхронної машини; $\beta = \gamma + \delta$; γ – кут комутації, який враховує перекриття фаз під час комутації, δ – кут запасу, який враховує похибку системи керування та час, необхідний для відновлення замикаючих властивостей тиристорів.

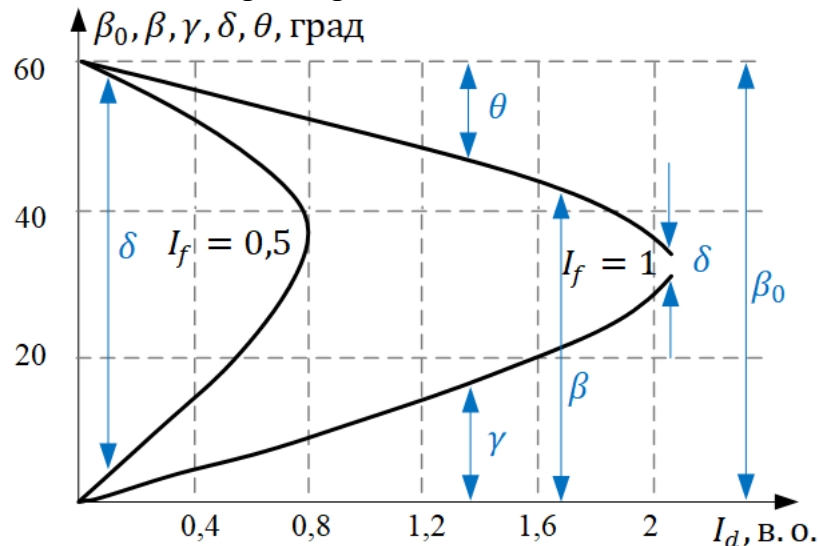


Рис. 16.4. Кутові характеристики ВД при способі керування $\beta_0 = const$

Для реалізації **першого способу** потрібен лише датчик положення ротора, при цьому статор зсувається на необхідний кут випередження $40 \dots 60$ ел. град у напрямку проти обертання машини. Величина кута пропорційна максимальному значенню струму, і кут залишається постійним у всіх режимах роботи двигуна, хоча процес реверсування швидкості не автоматизується.

Другий спосіб керування передбачає підтримку постійного кута випередження $\beta = const$. Для синхронізації необхідний датчик напруги статора, а для задання кута випередження – система керування. Частота розгортки змінюється в діапазоні $0 \dots 50$ Гц.

Третій спосіб керування полягає у підтримці постійної величини кута запасу на мінімальному рівні:

$$\begin{aligned} \beta_0 &= \beta_{0min} = f(\gamma, \theta) & \text{при} & \delta = \delta_{min} = const; \\ \beta &= \beta_{min} = f(\gamma) & \text{при} & \delta = \delta_{min} = const. \end{aligned} \quad (16.5)$$

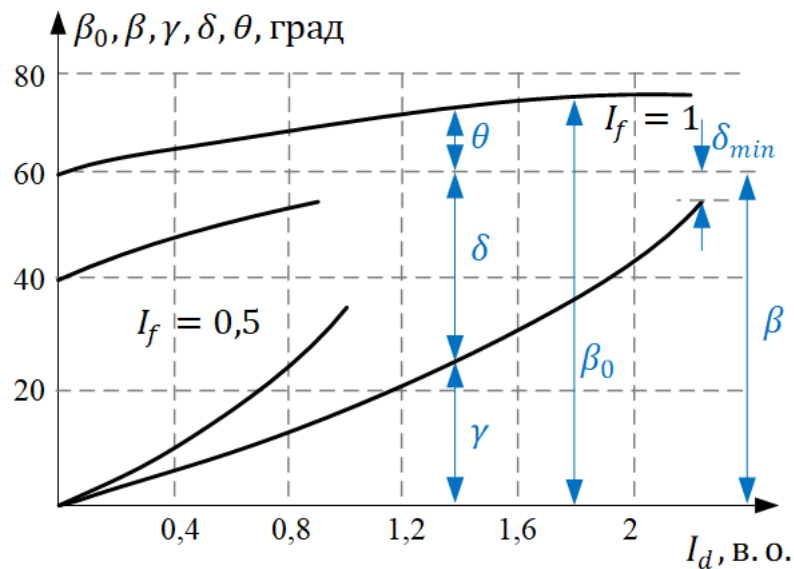


Рис. 16.5. Кутові характеристики ВД при способі керування $\beta = const$

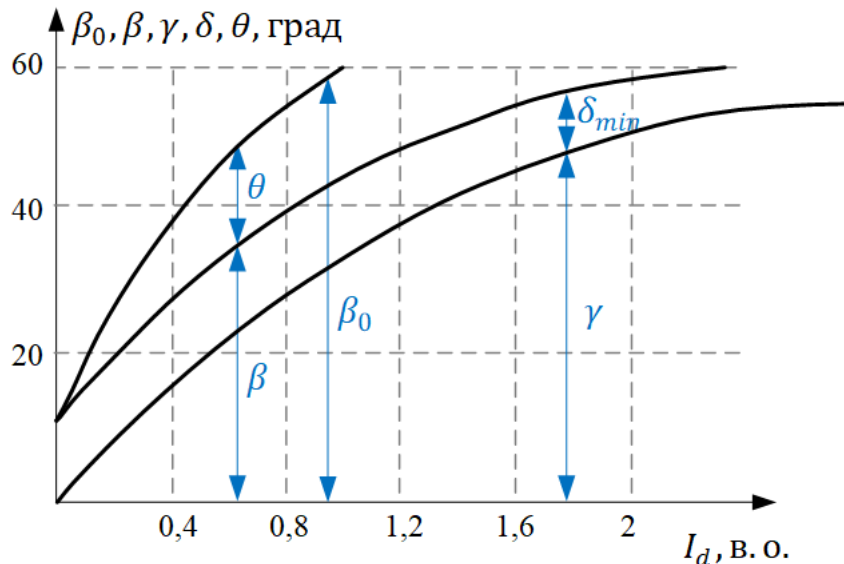


Рис. 16.6. Кутові характеристики ВД при способі керування $\beta_0 = \beta_{min} = f(\gamma, \theta)$

Цей спосіб вимагає наявності датчиків кутів комутації та навантаження, а також системи керування, синхронізованої з ДПР чи напругою статора.

Аналіз кутових характеристик ВД для різних способів керування показує, що жорсткість характеристик і максимальний струм, при якому відбувається перекидання комутатора, зростають із підвищенням струму збудження і кута випередження. За перевантажувальною спроможністю найкращим є третій спосіб керування. Мінімальний кут запасу обмежений комутаційною стійкістю перетворювача і знаходиться в межах 5...10 ел.град частоти мережі живлення.

При першому і другому способах керування кут випередження залишається сталим у всіх режимах роботи приводу і розраховується відповідно до максимальної величини навантаження. У цьому випадку струму холостого ходу відповідає максимальний кут запасу ($40^\circ \dots 50^\circ$), хоча для відновлення замикаючих властивостей тиристорів достатньо $3^\circ \dots 5^\circ$.

Якщо кут випередження залишати постійним, то $\cos\varphi$ буде залежати від навантаження

$$\varphi = \beta - \frac{\gamma}{2} \quad (16.6)$$

і двигун працює з найвищим коефіцієнтом потужності та оптимальними енергетичними показниками лише в номінальному режимі. В усіх інших режимах, тобто при зменшенні навантаження, привод функціонує з погіршеними енергетичними характеристиками.

Натомість реалізація способу керування $\beta_{min} = f(\gamma)$ за мінімального δ забезпечує роботу СД з максимально можливим коефіцієнтом потужності:

$$\varphi = \delta_{min} + \frac{\gamma}{2}, \quad (16.7)$$

тобто з мінімальним споживанням реактивної енергії та з найкращими енергетичними характеристиками для будь-яких частот обертання й рівнів навантаження. За реальних значень кутів комутації та малого часу відновлення вентилів коефіцієнт потужності наближається до одиниці, а ККД вентильного двигуна – до ККД синхронного двигуна, що живиться від мережі.

Електромеханічні характеристики ВД для першого способу керування показані на рис. 16.7: а – при зміні напруги; б – при зміні кута випередження.

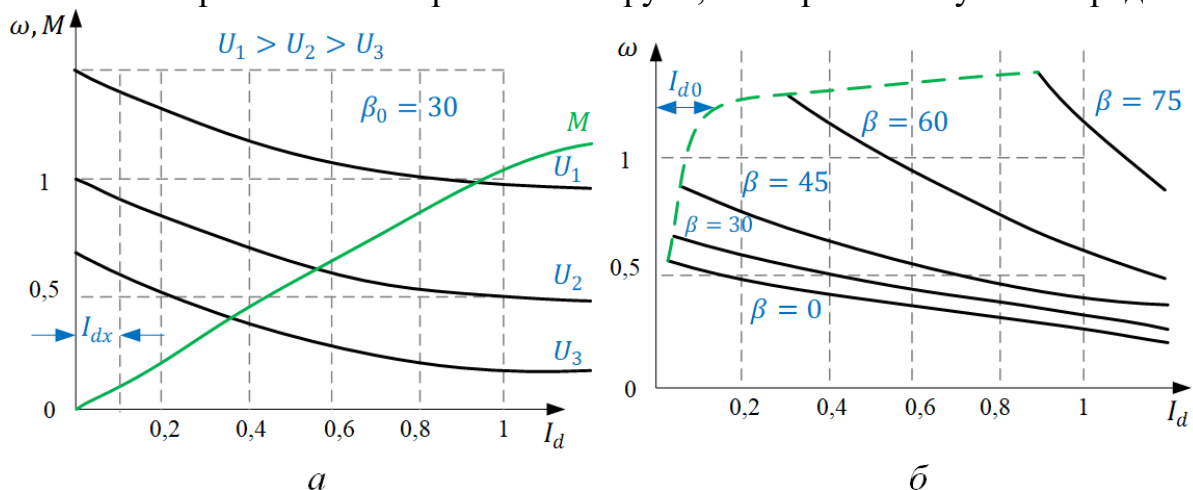


Рис. 16.7. Електромеханічні характеристики ВД за першого способу керування: а – при варіації напруги; б – при зміні кута випередження

Аналіз кривих свідчить, що жорсткість характеристик змінюється і зростає зі зменшенням кута випередження та збільшенням струму двигуна. При зміні підведеної напруги швидкісні характеристики зберігають свою жорсткість. Статичні характеристики для третього способу керування подібні, але відрізняються більшою жорсткістю та лінійністю.

На рисунку 16.8 подано залежність ЕРС вентильного двигуна від кута випередження. З нього видно, що в режимі холостого ходу при однаковій напрузі, підведеній до комутатора, середнє значення ЕРС дорівнює їй за малих кутів випередження і значно перевищує її зі збільшенням кута випередження β .

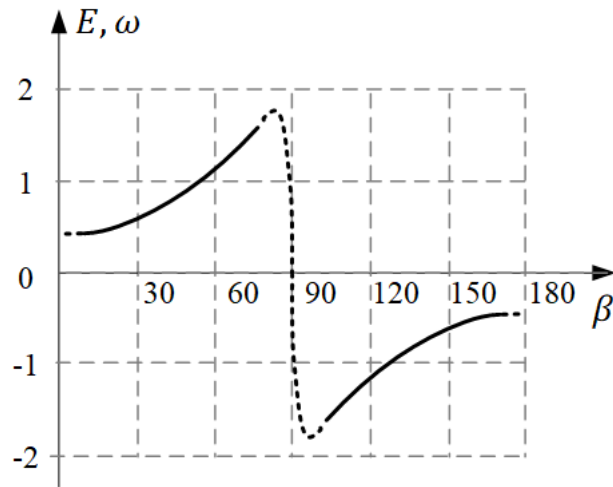


Рис. 16.8. Зміна ЕРС вентильного двигуна в залежності від кута випередження

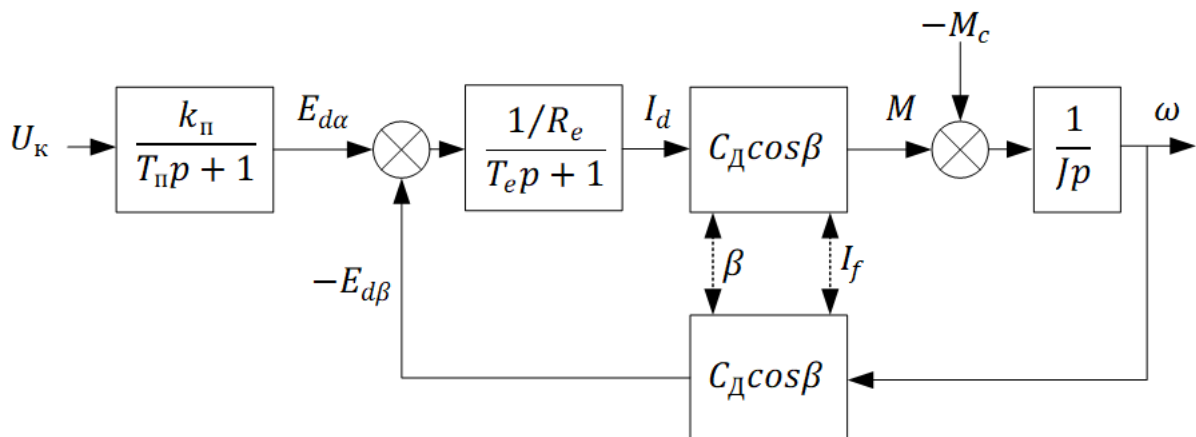


Рис. 16.9. Структурна схема електроприводу за системою вентильний двигун

Вентильний двигун описується системою нелінійних диференціальних та алгебраїчних рівнянь високого порядку, для яких неможливо отримати загальне аналітичне розв'язання. Проте розрахунки та експериментальні дані свідчать, що за сталих значень струму збудження і кута випередження, які знаходяться в межах

$$I_f \geq 0,8I_{fH} \quad \text{і} \quad 20^\circ \leq \beta \leq 60^\circ \quad (16.8)$$

вентильний двигун можна вважати лінійним об'єктом (рис. 16.9).

6.3.2. Оптимізація параметрів електрообладнання вентильних двигунів

З огляду на традиційне використання синхронних машин у потужних вентиляторних і компресорних установках, ВД є одним із найдоцільніших типів регульованого привода для турбомеханізмів. Тому з точки зору

енергозбереження важливо мінімізувати встановлену потужність силового обладнання.

Встановлена потужність електрообладнання ВД визначається технологічними вимогами, які впливають на вибір структури перетворювача, метод комутації вентилів, закон керування комутатором і спосіб керування випрямлячем.

Пуск турбомеханізмів зазвичай відбувається зі статичним навантаженням, що не перевищує номінального, тому для них доцільно використовувати найпростішу схему ВД із ланкою постійного струму. Застосування залежних інверторів струму, комутація вентилів яких відбувається за рахунок ЕРС двигуна, дещо знижує коефіцієнт використання, але дозволяє спростити силову схему і зменшити потужність обладнання. Використання автономних інверторів зі штучною комутацією, де комутація вентилів здійснюється за рахунок енергії, накопиченої в додаткових реактивних елементах – ємностях і індуктивностях, – підвищує коефіцієнт використання двигуна, але водночас ускладнює схему і збільшує встановлену потужність перетворювача. Використання інверторів на приладах, що мають здатність до запирання, значно підвищує вартість електрообладнання.

У таблиці 16.1 подано розрахункові дані для вибору синхронної машини та тиристорного перетворювача залежно від способу керування ($\beta = 60^\circ = const$ і $\beta_{min} = f(\gamma)$ при $\delta_{min} = 10^\circ$) за заданої розрахункової потужності $P_p = 3000$ кВт. Під час обчислення річного споживання електроенергії враховано, що вентиляторна установка головного провітрювання працює безперервно впродовж року.

Таблиця 16.1 – Розрахункові дані для вибору синхронної машини та тиристорного перетворювача.

Параметр	$\beta = 60^\circ$	$\beta_{min} = f(\gamma)$ при $\delta_{min} = 10^\circ$
P_p , кВт	3000	3000
C_{rmax}	2	1,4
$P_{pВД}$, кВт	6000	4200
U_H , В	6000	6000
k_c	0,67	0,93
I_H , А	861	435
I_d , А	1076	544
U_{dmax} , В	8100	8100
тип тиристора	T-500-15	T-320-15
N_B , шт	8	8
M_B , шт	1	1
$I_d U_{d0}$, кВА	8716	4406
W , кВт · год	52560000	36792000

Потужність синхронної машини у ВД порівняно з заданою потужністю при синусоїдальному живленні визначається коефіцієнтом габаритної потужності. Максимум цієї функції

$$C_{\Gamma} = f(\beta, \gamma) \quad (16.9)$$

визначає розрахункову потужність машини. Для способу керування $\beta = const$ і $\beta_{min} = f(\gamma)$ відповідно маємо 2 і 1,4 (рис. 16.10).

Розрахункова потужність СД у схемі ВД:

$$P_{pВД} = P_p C_{\Gamma max}. \quad (16.10)$$

Двигун вибирається за розрахунковою потужністю та максимальною швидкістю з каталогів:

$$\begin{aligned} P_H &\geq P_{pВД}; \\ n_H &\approx n_{max}. \end{aligned} \quad (16.11)$$

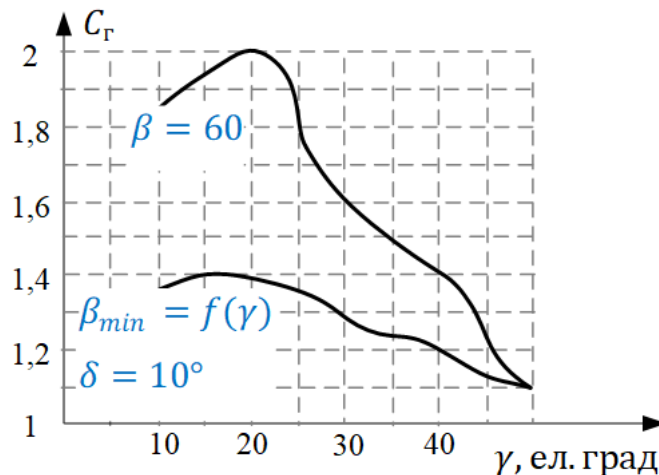


Рис. 16.10. Залежність коефіцієнта габаритної потужності ВД від кутових параметрів

Номінальний струм двигуна визначається за формулами:

– для способу керування, коли кут випередження є сталим ($\beta = const$):

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} U_H \cos\left(\beta - \frac{\gamma_H}{2}\right)}; \quad (16.12)$$

– для способу керування $\beta_{min} = f(\gamma)$ при $\delta_{min} = 10^\circ$:

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} U_H \cos\left(\delta_{min} + \frac{\gamma_H}{2}\right)}. \quad (16.13)$$

Графічна інтерпретація залежностей коефіцієнтів зсуву $k_z = \cos\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right)$ або $k_z = \cos\left(\delta_{min} + \frac{\gamma}{2}\right)$ вентильного двигуна від кутових параметрів і способів керування наведені на рис.16.11.

Середнє значення струму у вентиляльному перетворювачі визначається як середнє значення струму, що протікає через вентиля в процесі їх комутації:

$$I_d = \frac{\pi\gamma}{2\sqrt{3} \sin \frac{\gamma}{2}} I_H, \quad (16.14)$$

де $I_d = \sqrt{\frac{3}{2}} I_H$.

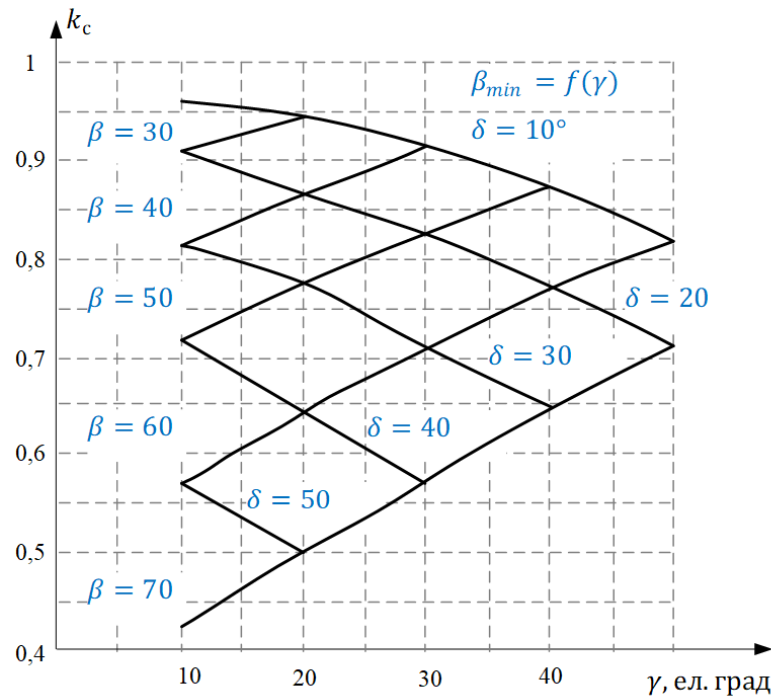


Рис. 16.11. Залежності коефіцієнта зсуву ВД від кутових параметрів та методів керування

Вибір перетворювача при відомій схемі включає визначення типу і параметрів вентилів. Для мостових трифазних схем максимальна величина середнього значення випрямленої напруги U_{d0} , номінальна лінійна напруга двигуна U_H і лінійна напруга мережі U_M взаємопов'язані таким чином:

$$\frac{U_{d0}}{U_H} = \frac{U_{d0}}{U_M} = 1,35. \quad (16.14)$$

Число вентилів, що послідовно включені в плечі моста перетворювача визначаються за формулою:

$$N \geq \frac{U_{d0}}{U_T} k_{зН}, \quad (16.15)$$

де U_T – максимальна напруга на тиристорі (транзисторі); $k_{зН}=1,5...2$ — коефіцієнт запасу по напрузі.

Число паралельних гілок:

$$M \geq \frac{I_{dmax}}{3I_{dT}} k_{зС}, \quad (16.16)$$

де I_{dT} – середнє значення струму вентиля; $k_{zc}=1,5...2$ – коефіцієнт запасу по струму.

Для першого варіанту можна застосовувати, наприклад, тиристори п'ятнадцятого класу Т-500, а для другого – Т-320.

Габаритна потужність тиристорного перетворювача визначається за формулою:

$$P_{тп} = I_d U_{d0}, \text{кВА.} \quad (16.17)$$

Річні витрати електроенергії, кВт·год/рік:

$$W = k_0 P T, \quad (16.18)$$

де T – кількість годин роботи приводу за рік, год/рік; k_0 – коефіцієнт, який враховує втрати енергії при зупинці приводу.

Аналіз таблиці 16.1 показує, що потужність електродвигуна та перетворювача з машинною комутацією значно менша для способу керування $\beta_{min} = f(\gamma)$, ніж при $\beta = const$.

Контрольні запитання

1. Що таке вентиляльний двигун і чим така схема відрізняється від частотно-регульованого електроприводу?
2. Які переваги вентиляльного двигуна? Навести схеми для вентиляльного двигуна постійного та змінного струму.
3. Які існують способи пуску ВД постійного струму?
4. Які існують способи керування комутатором вентиляльного двигуна?
5. Пояснити принцип керування ВД при $\beta = const$.
6. Пояснити принцип керування ВД при $\beta_{min} = f(\gamma)$.
7. Навести структурну схему електроприводу за системою ВД.
8. Чому вентиляльні двигуни вважаються доцільними для використання в турбомеханізмах з точки зору енергозбереження?
9. Як визначається номінальний струм двигуна для способів керування $\beta = const$ та $\beta_{min} = f(\gamma)$?
10. За якими параметрами обирається синхронна машина для системи ВД?

Рекомендована література

[2] – с. 118-134

Лекція 17. Вентильно-індукторний двигун. Схеми приводів постійного струму. Зменшення впливу на мережу перетворювачів електропривода

Тема 6.4. Вентильно-індукторний двигун

Тема 6.5. Електропривод з двигунами постійного струму

Тема 6.6. Зменшення впливу на мережу перетворювачів електропривода

Тема 6.4. Вентильно-індукторний двигун

Вентильно-індукторний двигун (ВІД), один із можливих варіантів якого зображено на рис. 17.1, складається зі спеціальної чотирьохфазної електричної машини, електронного комутатора на силових транзисторних модулях і мікроконтролерного блоку керування.

У ВІД магнітна індукція в кожній точці робочого зазору змінюється лише за величиною, залишаючись постійною за напрямком. Як результат, індукція в зазорі таких машин має пульсуючий характер і включає змінну (робочу) та постійну (неробочу) складові. Зміна магнітного потоку в обмотці якоря відбувається завдяки періодичній зміні магнітного опору в робочому колі при обертанні зубчастого ротора, що дозволяє збільшити кількість зубців на ньому. ВІД працює на підвищених частотах струму $f = 400 \dots 30000$ Гц.

Статор і ротор мають шихтовану явнополюсну конструкцію, причому кількість полюсів у них різна: 6/4, 8/6 тощо. Статор оснащений обмотками, які підключені через електронний комутатор до джерела постійного струму (випрямляч або акумулятор).

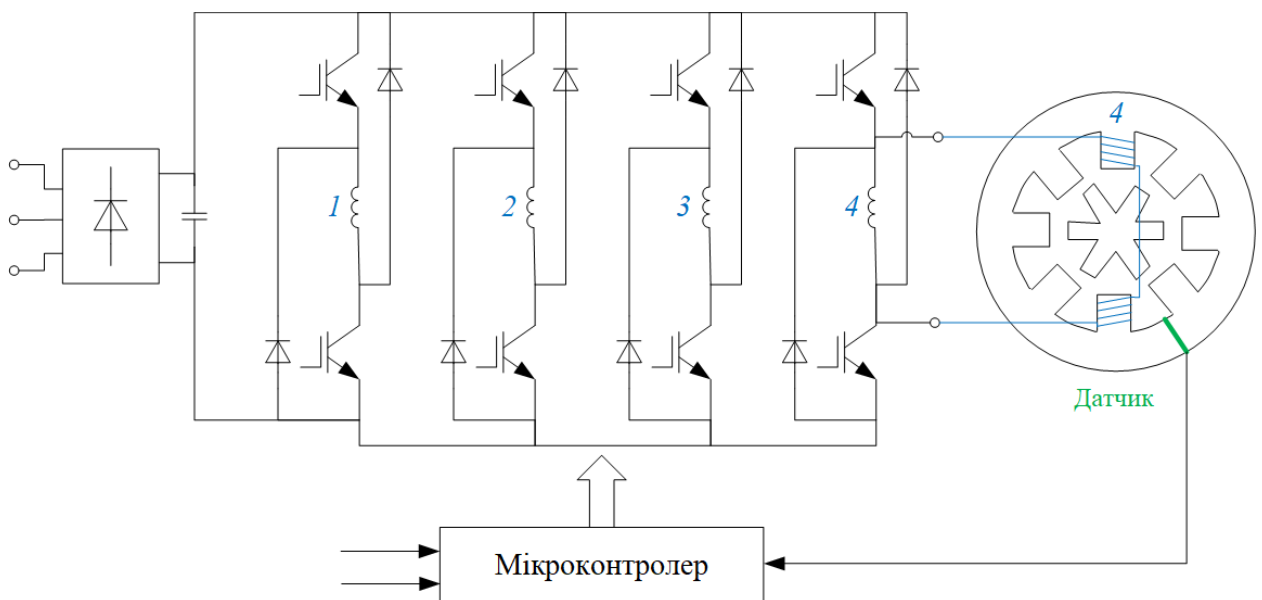


Рис.17.1. Схема вентильно-індукторного двигуна

Комутатор складається з набору електронних ключів, стан яких (відкритий або закритий) визначається положенням пасивного явнополюсного ротора, зафіксованим за допомогою датчика і сигналів мікропроцесорного керування, що забезпечує формування потрібних струмів у обмотках.

Робота приводу базується на магнітному притяганні найближчого полюса ротора до активованого полюса статора з котушкою. Наприклад, перемикання струму з котушки A статора, до якої був притягнутий полюс a ротора, на котушку B (у напрямку за годинниковою стрілкою) спричиняє обертання ротора, при якому полюс b притягується до полюса B (проти годинникової стрілки). Повторюване перемикання, що визначається положенням ротора, забезпечує безперервне обертання з заданою частотою.

Отже, електромеханічне перетворення енергії (створення моменту) в такому приводі ґрунтується на примусовій зміні магнітного опору шляхом перемикання струмів у котушках статора, що й зумовлює виникнення моменту.

Формування струмів необхідної величини в кожен момент часу забезпечує плавність руху, дозволяючи досягати потрібних моментів із мінімальними пульсаціями. Це формування реалізується за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), яка здійснюється сигналами мікропроцесорного пристрою, що надходять на основні ключі комутатора. Ефективна робота приводу за простої конструкції машини забезпечується завдяки високоякісним ключам комутатора та розвиненій мікропроцесорній системі управління.

Переваги ВІД полягають у наступному:

- висока технологічність і, відповідно, низька трудомісткість виготовлення двигуна (спрощена магнітна система, відсутність колектора, білячої клітки, постійних магнітів);

- до 30% економії активних матеріалів, використання тільки доступних і недорогих матеріалів (без застосування дорогих рідкоземельних магнітів);

- низька собівартість виробу – у 1,7...2 рази менша порівняно з найдешевшим асинхронним короткозамкненим двигуном;

- екологічна безпечність як виробництва, так і утилізації (просте розділення заліза та міді, відсутність складних у переробці рідкоземельних магнітів);

- спрощена та надійніша в порівнянні з частотним перетворювачем для асинхронного приводу схема і конструкція силового комутатора завдяки однополярній комутації;

- розширені функціональні можливості – здатність працювати як на низьких (десятки–сотні об/хв), так і на високих (десятки тисяч об/хв) обертах з широким діапазоном регулювання та забезпеченням високих моментів на низьких частотах;

- високі енергетичні характеристики, що не поступаються аналогічним системам;

- висока загальна надійність приводу.

Деякі характеристики трьох типів електроприводів для машини з висотою від центру осі валу до опори 112 мм наведені в таблиці 17.1.

Сукупність властивостей вентиляно-індукторного приводу дає змогу визначити найбільш перспективні **напрями його використання:**

- електричний транспорт, зокрема автономний з акумуляторним живленням, а також міський транспорт;
- відцентрові механізми – вентилятори, насоси, де ВІД може кардинально змінити традиційні конструкції та режими роботи, забезпечуючи значний ефект у сфері енергозбереження та ресурсної ефективності;
- верстати та інші обробні машини;
- побутова техніка.

Таблиця 17.1 – Показники різних типів електродвигунів для виконання із висотою валу 1112 мм

Тип електропривода	Номінальна потужність, кВт	Номінальна потужність до об'єму активних матеріалів	ККД
Постійного струму	7	1	76
Асинхронний	9	1,2	81
Вентильно-індукторний	11	1,7	85

Дуже перспективним є вбудовування елементів ВІД безпосередньо в технологічне обладнання – мотор-колесо, вентиляторну крильчатку, поєднану з ротором оберненої машини тощо.

Тема 6.5. Електропривод з двигунами постійного струму

На рис. 17.2, а показано схему вентильного привода постійного струму з трифазним мостовим тиристорним перетворювачем.

Електромеханічна характеристика ВП описується рівнянням такого вигляду:

$$\omega = \frac{E_d}{k\Phi} - \frac{IR}{k\Phi}, \quad (17.1)$$

де $E_d = E_{d0} \cos \alpha$ – середнє значення ЕРС на виході перетворювача; α – кут керування перетворювачем.

На рис. 17.2, б показані електромеханічні характеристики приводу при різних значеннях кута керування α .

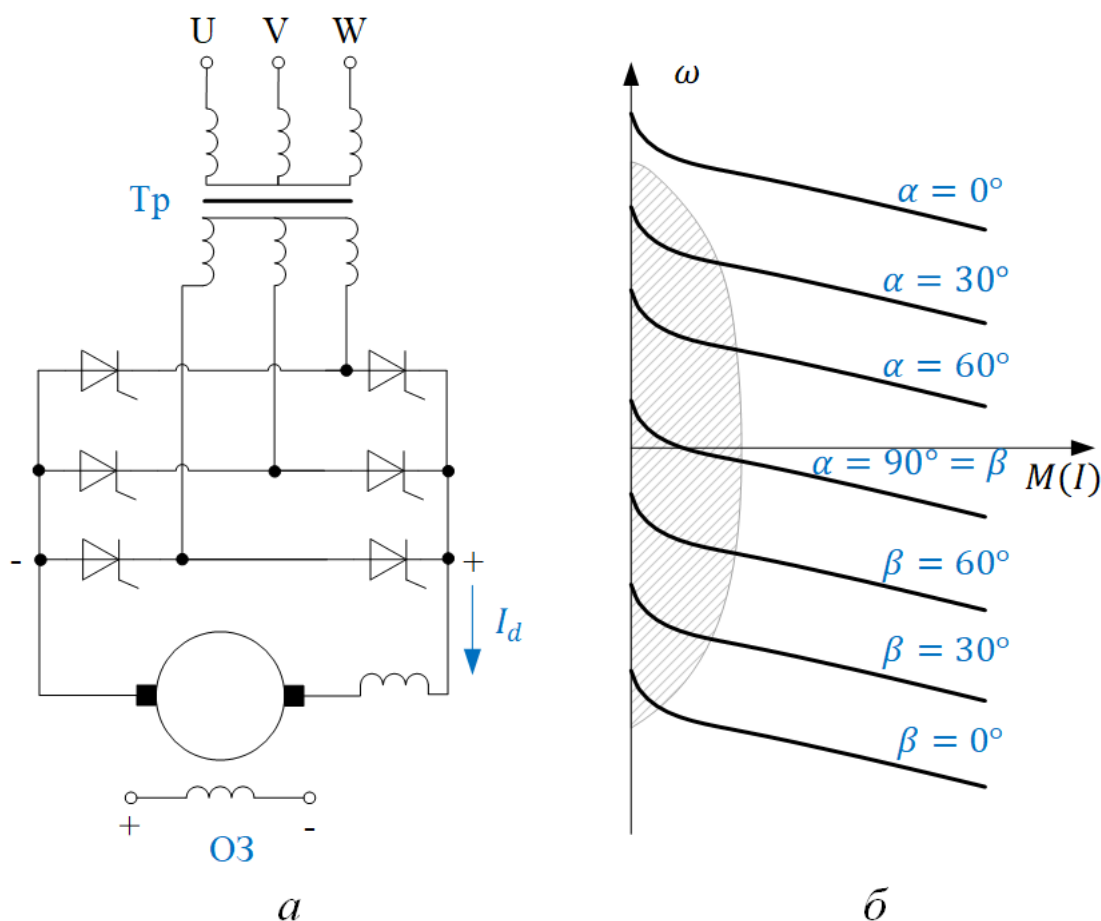


Рис.17.2. Вентильний привод із ДПС:
 а – схема підключення; б – механічні характеристики

Поява області переривчастих струмів (нелінійність характеристик) зумовлена тим, що миттєві значення ЕРС перетворювача в деякі інтервали часу стають меншими за ЕРС двигуна. Підтримка безперервності струму в цих інтервалах здійснюється завдяки накопиченій в індуктивностях якоря та згладжуючому дроселю електромагнітній енергії, що пропорційна квадрату струму двигуна. При струмах холостого ходу цієї енергії недостатньо для підтримки безперервності струму, що призводить до його переривання та обнулення обертаючого моменту двигуна.

Зміна швидкості залежить від моменту інерції системи, навантаження на валу і параметрів схеми. Зі збільшенням кута керування α область переривчастих струмів розширюється. Ця область характеризується підвищеним вмістом вищих гармонічних у кривій струму, які через узгоджуючий трансформатор потрапляють в мережу. Тому доцільно обмежувати режим холостого ходу в часі.

Для отримання характеристик ДПС, розташованих у всіх чотирьох квадрантах, використовуються реверсивні перетворювачі, які складаються з двох комплектів випрямлячів. На рис. 17.3 зображені перехресна (а) і зустрічно-паралельна (б) схеми ВП з реверсивними перетворювачами.

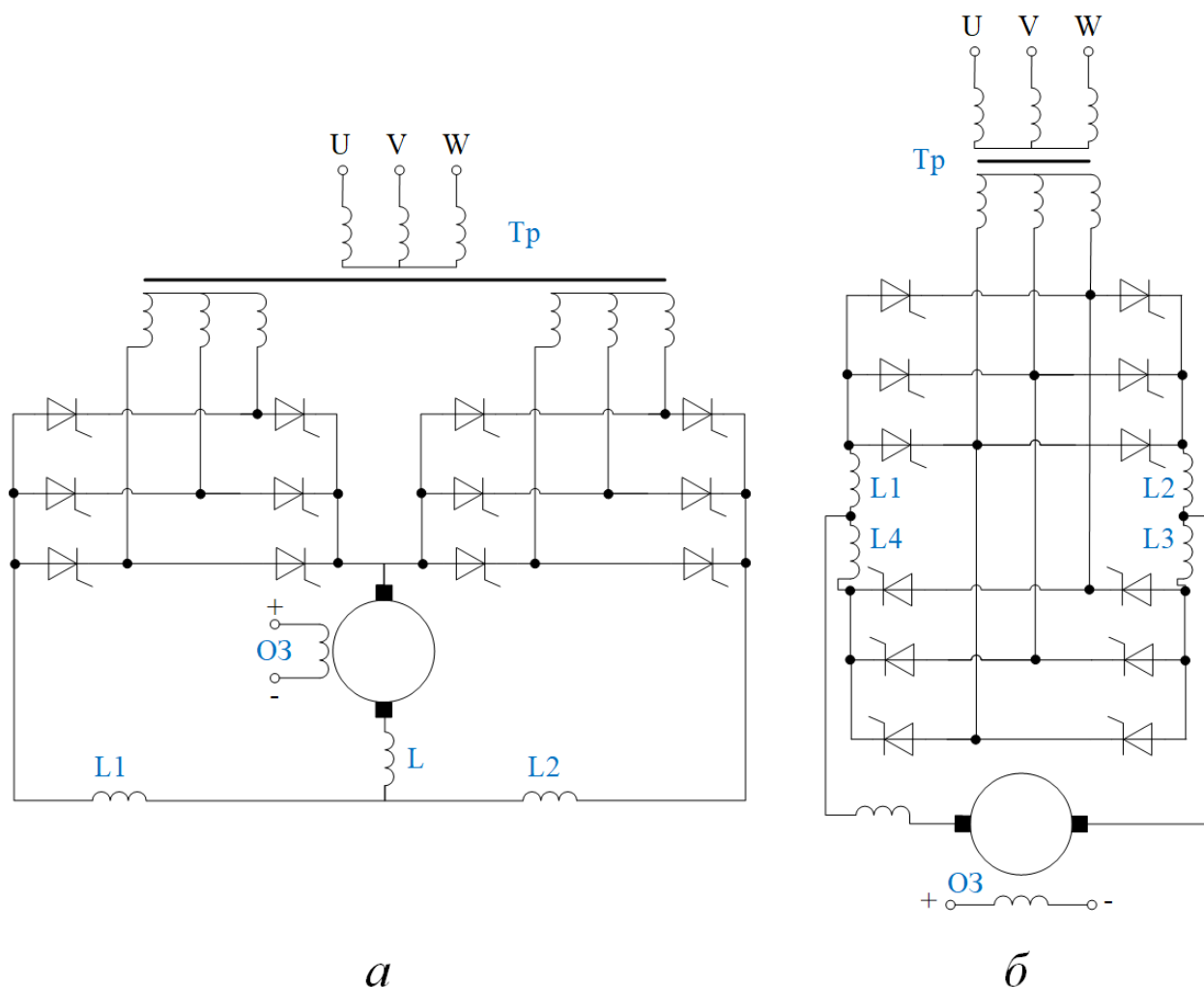


Рис.17.3. Схеми ВП з реверсивними перетворювачами:
 а – перехресна; б – зустрічно-паралельна

В наведених схемах використовуються два основних принципи керування комплектами вентилів: **спільне і роздільне**.

Спільне керування передбачає подачу імпульсів керування від системи імпульсно-фазового управління (СІФУ) одночасно на вентиля обох випрямлячів. За рахунок зсуву між імпульсами двох перетворювачів, близького до 180° , один працює у випрямному, а інший – інверторному режимі. Між середніми значеннями ЕРС випрямляча $E_{dв}$ і інвертора $E_{dі}$ витримується співвідношення $E_{dі} \geq E_{dв}$, однак через різницю миттєвих значень ЕРС між перетворювачами протікають зрівнювальні струми. Для їх обмеження передбачені зрівнювальні реактори $L1-L4$.

На рис. 17.4 зображені характеристики ВП при спільному лінійному (а) і нелінійному (б) узгодженні кутів керування перетворювачів. При лінійному узгодженні

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \pi \quad (17.2)$$

характеристики лінійні і аналогічні характеристикам системи ГД.

Для зменшення зрівняльних струмів використовують нелінійне узгодження, при якому

$$\alpha_1 + \alpha_2 \neq \pi. \quad (17.3)$$

При цьому спостерігається значне збільшення швидкості ДПС при переході від рушійного режиму до генераторного, що обмежує застосування цього способу.

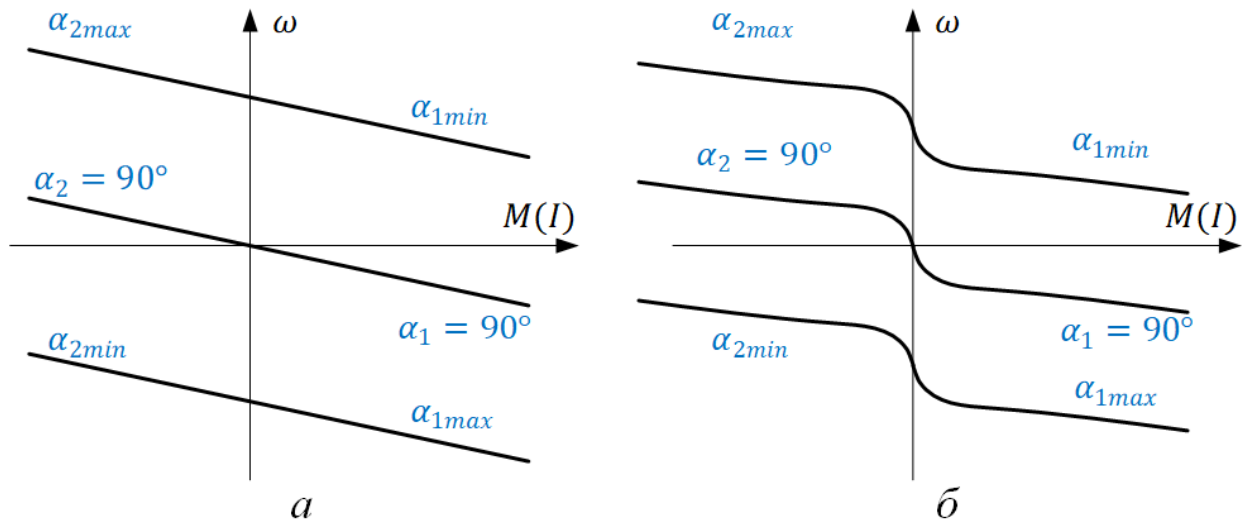


Рис.17.4. Характеристики ВП при спільному узгодженні кутів керування перетворювачів: а – лінійному; б – нелінійному

Роздільне керування застосовується для усунення зрівняльних струмів між перетворювачами. У цьому випадку відсутні згладжувальні дроселі. Суть керування полягає в тому, що імпульси подаються лише на один з перетворювачів, а інший не працює. При переході від рушійного режиму до гальмівного припиняється подача сигналів на випрямляч. Після зникнення струму в якірному колі (безструмова пауза складає 5...10 мс) подаються сигнали на другий перетворювач з кутом регулювання $\alpha > 90$, що забезпечує його роботу в інверторному режимі.

Щоб струм якірного кола при включенні перетворювача не перевищував припустимі значення, його кут керування повинен відповідати необхідному режиму роботи привода. Тому перетворювачі зазвичай працюють у режимі лінійного узгодження (рис. 17.5), але сигнали відкриття подаються тільки на перетворювач, що знаходиться в роботі. Через безструмову паузу при переході з одного енергетичного режиму в інший поблизу осі ординат спостерігається режим переривчастих струмів, що відображається на статичних характеристиках.

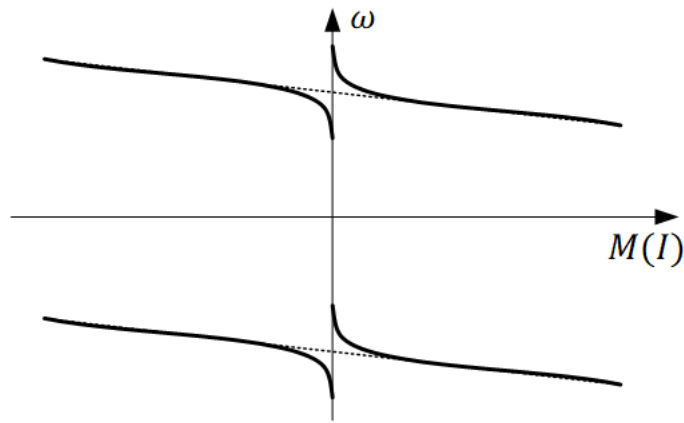


Рис.17.5. Характеристики ВІ при роботі перетворювача в режимі лінійного узгодження

З наведених двох способів керування реверсивними перетворювачами, роздільне керування має кращі енергетичні показники. При спільному керуванні зрівняльний струм, минаючи двигун, додатково навантажує вентилі та трансформатор, що знижує ККД привода та вимагає збільшення габаритної потужності перетворювачів і трансформаторів.

Тема 6.6. Зменшення впливу на мережу перетворювачів електропривода

Регульований електропривод з перетворювачем частоти є нелінійним навантаженням для мережі змінного струму, джерелом реактивної потужності та генератором вищих гармонік (ВГ), кратних частоті мережі та несучій частоті широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) інвертора. Зниження коефіцієнта потужності призводить до збільшення реактивної потужності в електропостачальній системі, що викликає додаткові втрати напруги та енергії, а також вимагає збільшення пропускної здатності її елементів. Підвищений рівень електромагнітних перешкод може призвести до збоїв в роботі інших електронних систем, що знаходяться поруч із перетворювачем частоти та мають спільні з ним шини змінного струму.

На даний час застосовують такі методи забезпечення якості електроенергії:

- зниження рівнів вищих гармонік засобами мережі живлення;
- використання традиційних засобів компенсації реактивної потужності (СД і конденсатори, а також батареї конденсаторів);
- застосування багатофункціональних пристроїв;
- використання спеціальних способів керування і схемних рішень вентильних перетворювачів регульованого електропривода.

Зниження рівнів вищих гармонік (ВГ) засобами мережі живлення досягається раціональною побудовою енергосистеми, що забезпечує припустимий рівень ВГ напруги на шинах споживача. Найбільш поширеними засобами є:

- застосування трансформаторів з підвищеною первинною напругою 110...220 (330) кВ;

– живлення нелінійних навантажень від окремих трансформаторів або підключення їх до окремих обмоток триобмоточних трансформаторів чи окремих обмоток двообмоточних трансформаторів з розщепленою вторинною обмоткою;

– підключення синхронних двигунів паралельно нелінійним навантаженням.

Застосування в перетворювальних агрегатах трансформаторів з первинною напругою 110...220 кВ дозволяє виключити вплив різкозмінних навантажень на споживачів розподільних мереж 0,38...10 кВ. Перешкодою до використання таких засобів може бути поява неприпустимих напруг 11, 13-ї гармонік (меншою мірою 17, 19-ї) в мережах енергосистеми живлення.

Синхронні двигуни (СД) є ефективними засобами компенсації реактивної потужності в електропостачальній системі. Виконуючи свою основну функцію приводного двигуна, вони одночасно можуть генерувати реактивну потужність для мережі, працюючи з випереджальним $\cos\varphi$. Це забезпечується відповідним регулюванням струму збудження.

Синхронні компенсатори використовуються для компенсації реактивної потужності мережі і підтримки номінального рівня напруги в районах з високою концентрацією споживчих навантажень. Їхній нормальний режим роботи – Perezбуджений, при якому компенсатор віддає реактивну потужність в мережу. Синхронні компенсатори не мають приводних двигунів, і з погляду режиму роботи є синхронними двигунами, які працюють на неробочому ході. Тому вони споживають невеликий активний струм з мережі для покриття своїх втрат.

Однак у періоди зниження споживчих навантажень, наприклад, вночі, синхронні компенсатори можуть працювати в недозбудженому режимі, коли вони споживають з мережі індуктивний струм і реактивну потужність. Це призводить до того, що напруга в мережі має тенденцію до зростання. Для підтримки напруги на номінальному рівні потрібно завантажити мережу індуктивними струмами, що спричиняють її додаткове зниження. Для цього кожен синхронний компенсатор оснащується автоматичним регулятором збудження, який підтримує стабільну напругу на затискачах компенсатора.

Конденсатори є спеціальними ємностями для генерування реактивної потужності. Вони мають ряд переваг, таких як низькі втрати реактивної потужності, простота монтажу та експлуатації. Однак їхні недоліки включають залежність генерованої реактивної потужності від напруги, недостатню стійкість до перевантажень за струмом і напругою, а також погіршення роботи в мережах з підвищеним вмістом вищих гармонік.

Прикладом багатофункціональних пристроїв є **фільтрокомпенсуючі та фільтросиметруючі пристрої**. Перші, окрім зниження рівня вищих гармонік (ВГ), генерують у мережу реактивну потужність. Другі використовуються для симетрування системи нелінійних напруг в електричній мережі. Резонансні фільтри можуть застосовуватися для поділу лінійних і нелінійних навантажень (загороджувальні фільтри) або для шунтування (поглинання) струмів вищих гармонік.

Поділ лінійних і нелінійних навантажень можна здійснити за допомогою фільтрів низьких частот чи смугових фільтрів. Останні є більш складними порівняно з низькочастотними фільтрами. Найпростішим фільтром низької частоти є Г-подібний фільтр, контур якого складається з індуктивності трансформатора перетворювача і ємності батареї конденсаторів, підключеної до шин підстанції. Для запобігання резонансним підвищенням напруги на частотах ВГ резонансна частота контуру "мережа - батарея конденсаторів" повинна бути нижчою за частоту найменшої ВГ в амплітудному спектрі струму нелінійного навантаження. Однак для ефективного зниження рівнів ВГ за допомогою Г-подібного фільтра необхідна потужність батареї конденсаторів має бути такого ж порядку, що й потужність трансформатора живлення.

Зниження розмахів коливань напруги в енергосистемі може досягатися за допомогою високошвидкісних пристроїв компенсації. **Статичні тиристорні компенсатори (СТК) або активні фільтри (АФ)** будуються з використанням компенсаційних перетворювачів зі штучною комутацією вентилів. Такий перетворювач має на стороні випрямленого струму реактор (індуктивний акумулятор енергії) або батарею конденсаторів (ємнісний акумулятор енергії). Поєднання перетворювача з реактивним елементом дозволяє створити пристрій для регулювання реактивної потужності в енергетичній системі.

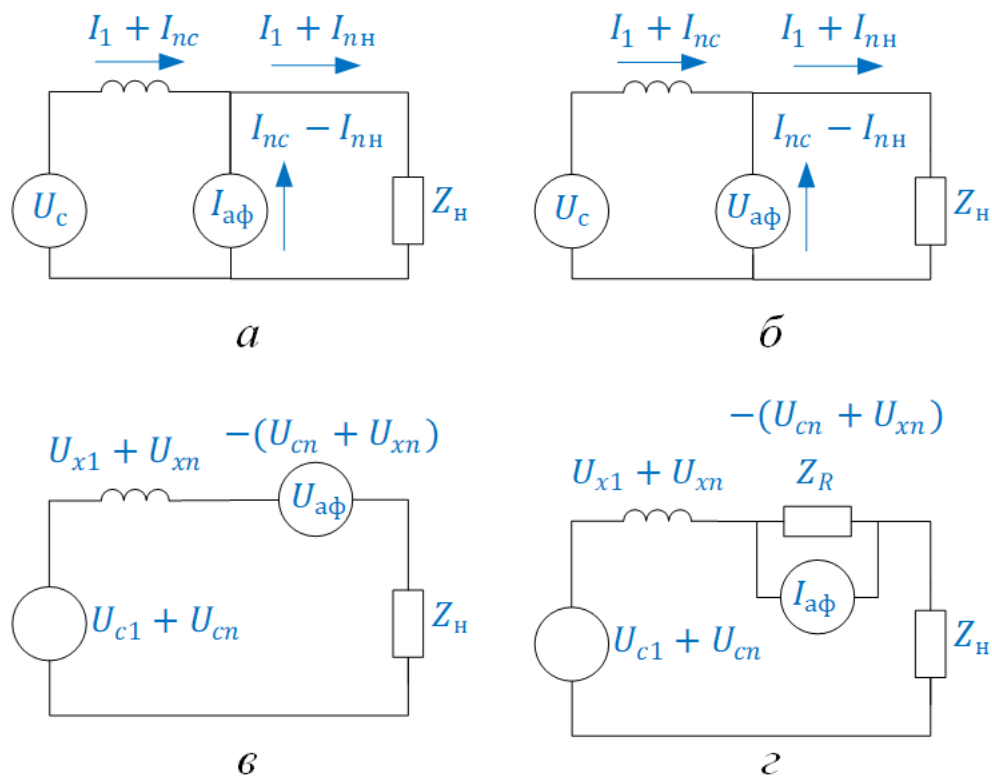


Рис.17.6. Типи активних фільтрів

АФ може підключатися паралельно чи послідовно до нелінійного споживача. Основні типи активних фільтрів (рис. 17.6): а – паралельне джерело струму; б – паралельне джерело напруги; в – послідовне джерело напруги; г – послідовне джерело струму. На рисунку позначено: U_c – напруга мережі;

I_1, I_{nc} – відповідно струми першої та n -ї гармонік мережі; U_{c1}, U_{cn} – відповідно напруги першої та n -ї гармонік мережі; $U_{aф}, I_{aф}, Z_R$ – відповідно напруга, струм та внутрішній опір активного фільтра; Z_n – внутрішній опір нелінійного навантаження; $I_{нн}, U_{xn}$ – відповідно струм та напруга n -х гармонік нелінійного навантаження.

Для мінімізації реактивної потужності всіх гармонік струму, включаючи основну, перетворювач працює в режимі генератора антигармонік, що виключає чи обмежує їх надходження в електричну мережу. Таким чином, відбувається захист мережі від негативного впливу потужності ВГ, а також поліпшення коефіцієнта потужності основної гармоніки. Крім того, при необхідності може здійснюватися регулювання потоку не лише реактивної, але й активної потужності. У такому режимі перетворювач працює з імпульсною модуляцією параметра струму, що дозволяє регулювати потоки активної і реактивної потужності в мережі в залежності від її завантаження споживачами, одночасно обмежуючи рівень ВГ струму.

Почергове керування тиристорними перетворювачами полягає в тому, щоб при їх роботі переважали граничні випрямлювальні та інверторні режими з мінімальними кутами керування, що характеризуються малим споживанням реактивної потужності. Схема (а) та регулювальні характеристики (б) перетворювача з послідовним сполученням зображені на рис. 17.7. В одному з них установлюється мінімальний кут керування $\alpha_1 = 0$, а регулювання напруги здійснюється другим перетворювачем за рахунок зміни кута керування α_2 від 0 до 180° .

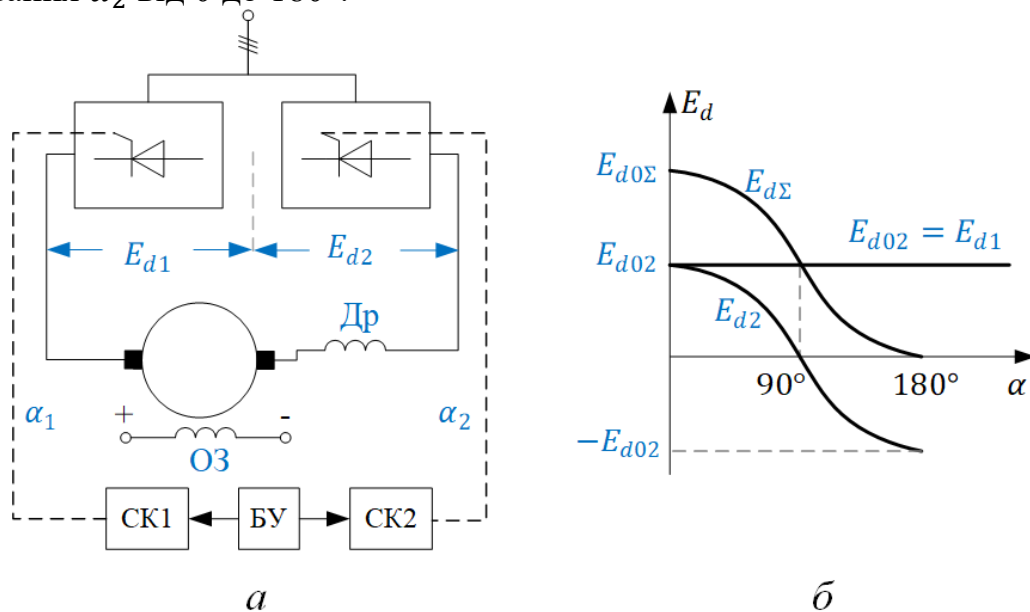


Рис.17.7. Схема та регулювальні характеристики перетворювача з послідовним сполученням

У схемі з почерговим керуванням коефіцієнт потужності змінюється шляхом регулювання кута керування α_2 :

$$\cos\varphi = \frac{\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2}{2} = \frac{1 + (0 \dots 1)}{2} = 0,5 \dots 1. \quad (17.4)$$

У неререверсивних електроприводах, де немає потреби в зміні полярності напруги, один із перетворювачів може бути побудований на некерованих вентилях (діодах), що відповідає куту керування $\alpha_1 = 0$.

У приводах з одним перетворювачем також можливо реалізувати почергове керування, для чого слід використовувати дві системи керування, що взаємодіють з катодною та анодною групами (рис. 17.8: а – схема; б – діаграма споживання реактивної потужності).

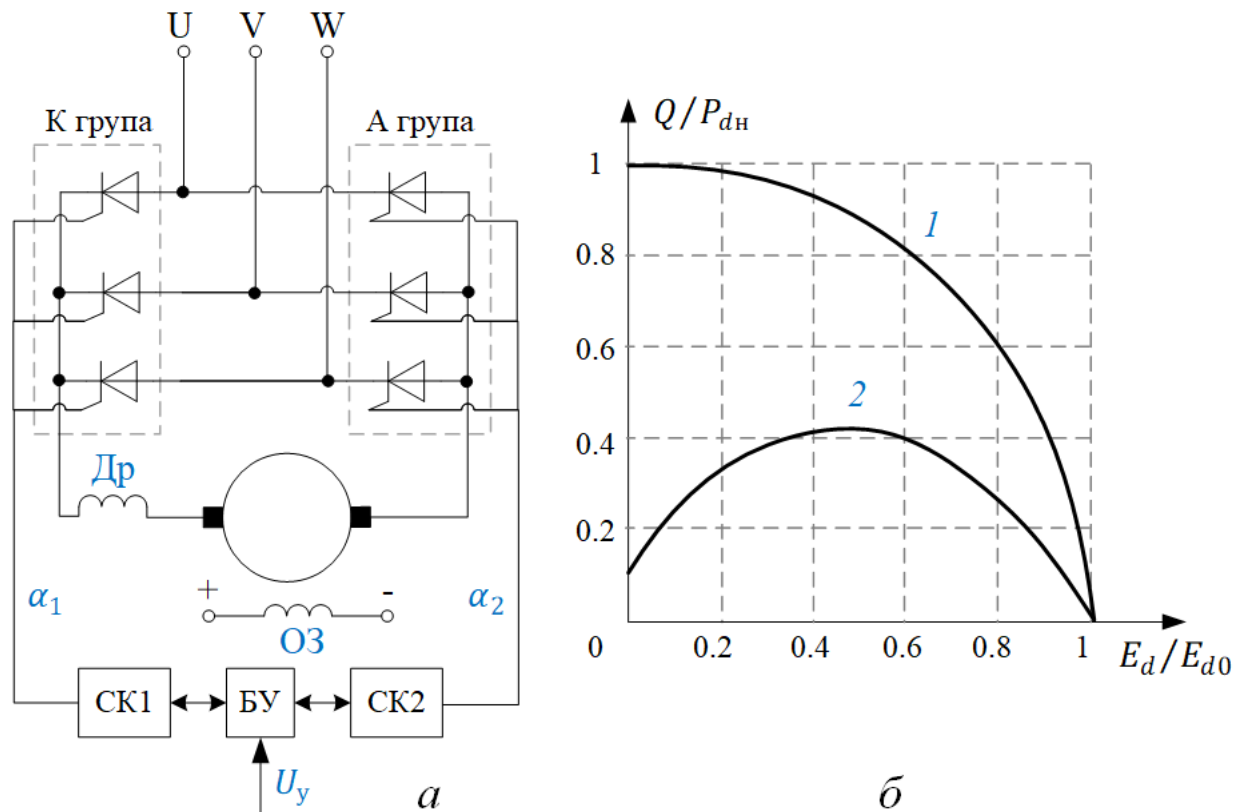


Рис.17.8. Перетворювач із окремими СК анодної і катодної груп

Рисунок 17.8, б демонструє зменшення споживання реактивної потужності електроприводом з почерговим керуванням. На діаграмі зображені залежності відносної реактивної потужності Q/P_{dH} від ступеня регулювання напруги E_d/E_{d0} трифазного мостового перетворювача: крива 1 – для звичайного симетричного керування, крива 2 – для почергового. Як видно, при почерговому керуванні споживання реактивної потужності значно нижче, особливо при глибокому зниженні напруги.

Один із перспективних методів зменшення несинусоїдальності в електричних мережах полягає в покращенні форми струму мережі перетворювачів. Це можливо шляхом компенсації вищих гармонік магнітного потоку трансформатора перетворювача, додаванням гармонік 3-ї, 9-ї, 15-ї та вищих порядків до струмів обмоток трансформатора або застосуванням спеціальних законів керування перетворювачами.

Схема компенсації вищих гармонік магнітного потоку трансформатора випрямляча показана на рис. 17.9.

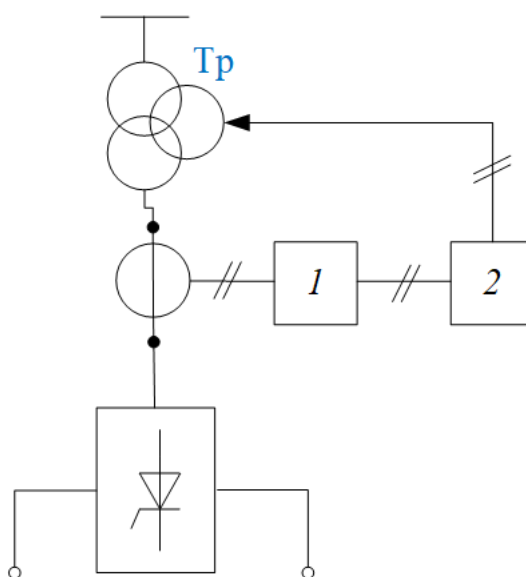


Рис.17.9. Схема компенсації вищих гармонік магнітного потоку трансформатора випрямляча

У третій обмотці трансформатора перетворювача створюється МРС вищих гармонік, при цьому зумовлений нею магнітний потік має напрям, протилежний основному потоку трансформатора, що призводить до компенсації вищих гармонік. Фільтр 1 блокує першу гармоніку, а підсилювач 2 підсилює струми вищих гармонік. Застосування схеми дозволяє зменшити як канонічні, так і аномальні гармоніки потоку та мережних струмів перетворювача. У деяких випадках, як-от для ліній електропередачі, вона може бути економічно вигіднішою за традиційні перетворювачі з резонансними фільтрами. Серед недоліків – складність реалізації, потреба у триобмоткових трансформаторах і менша, принаймні на порядок, швидкодія порівняно зі звичайними схемами автоматичного регулювання частоти обертання електропривода.

У складних перетворювальних системах, що включають послідовно або паралельно з'єднані одно- чи двомостові перетворювачі, можливо здійснювати керування гармонічним складом струму мережі. Для цього необхідно забезпечити певну різницю між кутами керування анодної та катодної груп вентилів. Згідно з експериментальними даними, для однієї з таких схем ця різниця повинна становити 36° для 5-ї гармоніки, 26° – для 7-ї, і 16° – для 11-ї.

Одним із заходів для зниження рівнів вищих гармонік, що генеруються мостовими перетворювачами, є збільшення фазності системи. Це можна досягти двома способами: використанням трансформаторів перетворювачів з особливим виконанням обмоток для реалізації багатофазного режиму перетворення, або забезпеченням еквівалентного багатофазного режиму для групи перетворювачів, кожен з яких має менше число фаз.

Еквівалентні або умовні багатофазні схеми забезпечують взаємну компенсацію вищих гармонік струму на шинах джерела живлення, які не є характерними для багатофазного режиму. Наприклад, в умовній 12-фазній схемі компенсуються 5, 7, 17, 19 та інші вищі гармоніки.

Вектори 5-ї гармоніки струму формують симетричну систему зворотної послідовності. Це означає, що вони обертаються з частотою, яка дорівнює 6ω , де ω – кутова частота мережі, відносно векторів напруги основної частоти. Вектори 7-ї гармоніки утворюють систему прямої послідовності та обертаються в тому ж напрямку, що і вектори напруги системи живлення. Частота обертання векторів струму гармонік відносно тієї ж системи векторів напруги також буде 6ω .

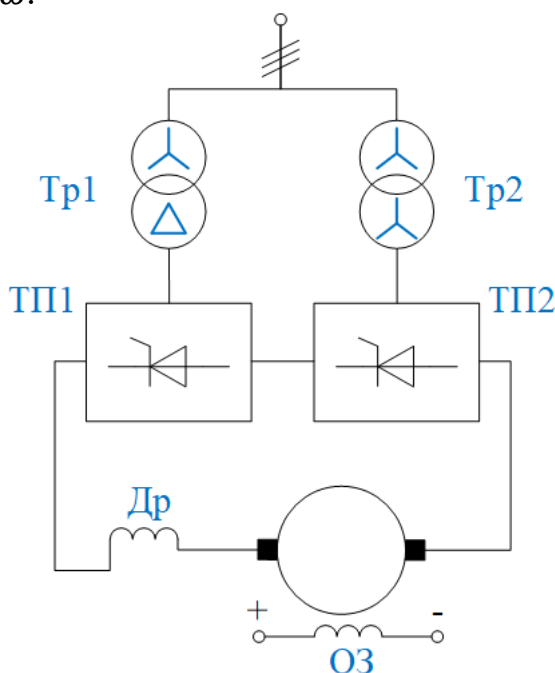


Рис.17.10. Схема з'єднання обмоток мережі двох перетворювачів у зірку і трикутник

При з'єднанні обмоток мережі двох перетворювачів у зірку та трикутник (рис. 17.10) зсув по фазі між векторами напруги становить 30° , тому вектори вищих гармонік струмів однойменних фаз, зсунуті на 180° , опиняються в протифазі та взаємно компенсуються на шинах підстанції. Це також стосується 17-ї та 19-ї гармонік.

Зсув по фазі між векторами напруги, підведеними до трансформатора, можна забезпечити за допомогою спеціального фазоповоротного трансформатора, що підключається перед трансформатором перетворювача. В цьому випадку реалізуються еквівалентні багатофазні режими з великою кількістю фаз (18, 24 тощо). Наприклад, при роботі двох 12-фазних перетворювачів можна отримати умовний 24-фазний режим перетворювача.

Ефект зниження рівнів вищих гармонік за допомогою умовних багатофазних схем проявляється повною мірою лише при однаковому завантаженні перетворювачів у групі та симетрії системи керування. Ці умови

виконуються під час паралельної роботи перетворювачів на стороні випрямленої напруги.

Згідно з технічними вимогами, промисловість виробляє фазоповоротні трансформатори для напруги 10 кВ, потужністю 32 МВА і кутом $\delta = 7,5^\circ$. Кут $\delta = 15^\circ$ досягається при каскадному з'єднанні двох фазоповоротних трансформаторів з $\delta = 7,5^\circ$. Еквівалентний багатофазний режим перетворювача можна також забезпечити, якщо однакові перетворювачі, підключені до одного вузла мережі, працюють з однаковим навантаженням. У разі розбіжностей у навантаженні повна компенсація гармонік, нехарактерних для багатофазного режиму, не відбувається.

У перетворювачах з природною комутацією вентилів, де моменти відкриття та закриття визначаються напругою мережі, повна компенсація реактивної потужності без спеціальних компенсаційних пристроїв неможлива. Проте використання штучної комутації вентилів (за рахунок енергії, накопиченої в реактивних елементах перетворювача) або приладів, що запираються, дозволяє створити перетворювач без споживання реактивної потужності, а за потреби – навіть з її віддачею в мережу. Такі перетворювачі з $\cos\varphi = 1$ називаються компенсованими. Найбільш оптимальним є використання складених перетворювачів, одна частина яких має штучну, а інша – природну комутацію.

Як стабілізатор напруги з АФ може бути використана схема, показана на рис. 17.11.

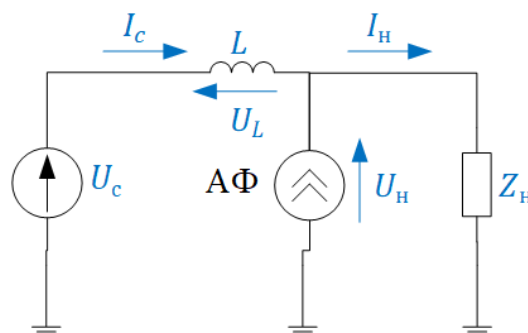


Рис.17.11. Стабілізатор напруги з активним фільтром

У цій схемі АФ компенсує вищі гармоніки струму нелінійного навантаження Z_n . Стабілізація напруги U_n здійснюється шляхом регулювання реактивної потужності основної гармоніки. При незначних відхиленнях напруги від заданого значення (5 %) вхідний коефіцієнт потужності по основній гармоніці залишається близьким до $\cos\varphi = 1$ завдяки повній компенсації реактивної потужності навантаження.

При незначному зниженні чи підвищенні вхідної напруги коефіцієнт потужності зменшується, одночасно змінюючи характер потужності. При зниженні напруги потужність стає ємнісною, а при підвищенні – індуктивною. Важливо, що наявність вхідного реактора L покращує захист схеми від різких коливань напруги. Ємнісний акумулятор в АФ забезпечує захист споживача під час короткочасних відхилень напруги від норми. Ефективність захисту залежить від ємності або інших акумуляторів енергії на стороні постійного

струму. Основним недоліком АФ є велика встановлена потужність перетворювачів, яка розраховується на потужність нелінійного споживача.

Більш перспективними є **гібридні фільтри**, які поєднують переваги традиційних пасивних фільтрів з реактивних елементів і активних фільтрів малої потужності. Зміна реального частотного спектру вищих гармонік струму чи напруги в мережі має стохастичний характер. Крім того, на параметри фільтрів впливають технологічні допуски та процеси старіння їх елементів, що практично виключає їх точне налаштування на строго фіксовані частоти. З іншого боку, точність налаштування і висока добротність фільтрів часто впливають на перехідні процеси, викликаючи, наприклад, перенапруги в мережі, що може призвести до виникнення явища «антирезонансу» на частотах, близьких до резонансної.

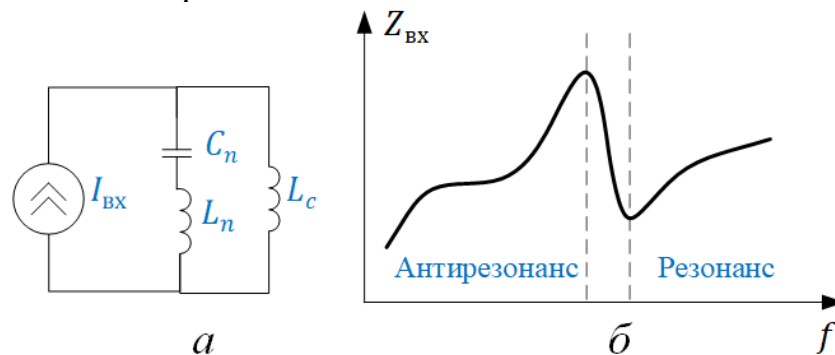


Рис.17.12. Гібридний фільтр: а – схема; б – перехідний процес

Використання активного фільтра (АФ) як регульованого імпедансу дозволяє уникнути антирезонансних явищ і покращити якість перехідних процесів при комутації навантаження. Завдяки цьому встановлена потужність перетворювача активного фільтра може бути знижена до 10 % і менше від потужності джерела гармонік струму. Наприклад, при коефіцієнті викривлення синусоїди струму навантаження 35,9 %, застосування двох пасивних LC -кіл і широкосмугового RLC -фільтра знижує цей коефіцієнт до 28 %, а при додаванні двох малопотужних коригувальних перетворювачів — до 3,9 %. Для керування параметрами фільтра до його пасивних елементів підключаються активні елементи (рис.17.13).

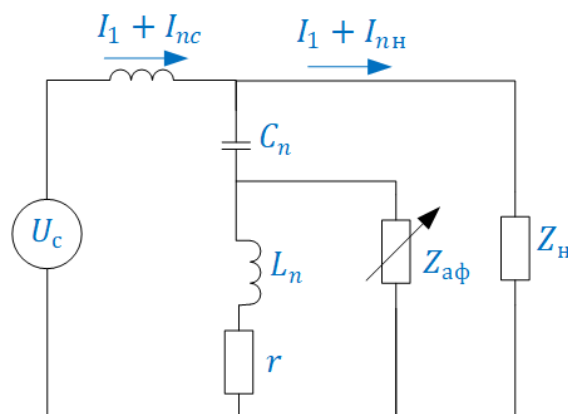


Рис.17.13. Схема АФ як регульованого повного опору

На рис. 17.14 зображено принцип роботи чотириквadrантного перетворювача, де напруга має синусоїдальну форму, а струм – трапецієподібну. Фазовий зсув між напругою та струмом відповідає квадранту площини на векторній діаграмі.

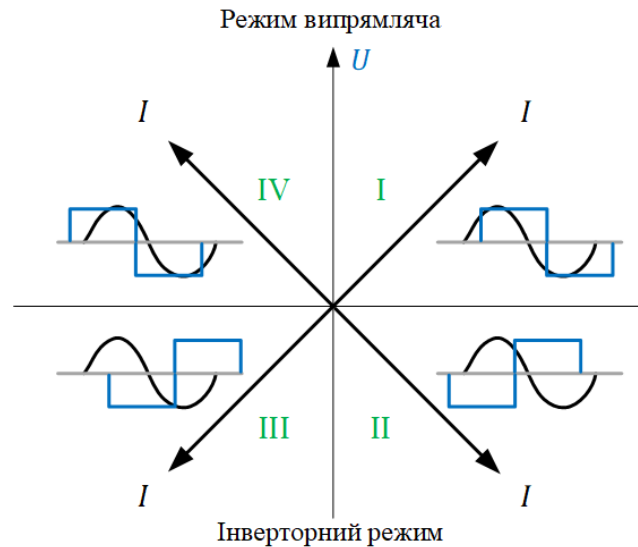


Рис.17.14. Принцип роботи чотириквadrантного перетворювача

На рис. 17.15 показано схему СТК з використанням біполярних транзисторів з ізольованим затвором IGBT. Транзистори працюють на частоті 15 кГц у режимі перемикачів трьох рівнів напруги, що на стороні постійного струму відповідає $+U$, 0 , $-U$. Завдяки високій частоті перемикання і заданому алгоритму, на стороні змінного струму формується майже синусоїдальна лінійна напруга. У цій схемі можливе як споживання, так і генерація реактивної потужності при мінімальній потужності конденсатора на стороні постійного струму. Це також дозволяє здійснювати швидке і незалежне пофазне регулювання амплітуди та частоти напруги мережі.

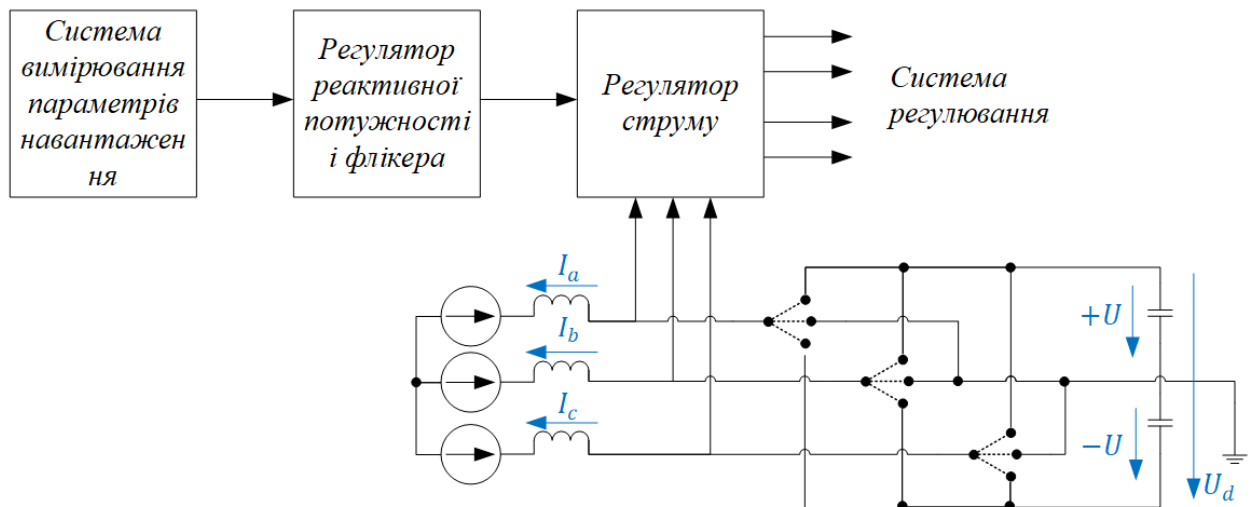


Рис.17.15. Схема статичного компенсатора на біполярних транзисторах з ізольованим затвором

У порівнянні зі стандартною технологією нові СТК працюють щонайменше в два-три рази ефективніше. На рис. 17.16 зображені криві залежності дози флікера від часу: 1 – стандартна технологія; 2 – нові СТК.

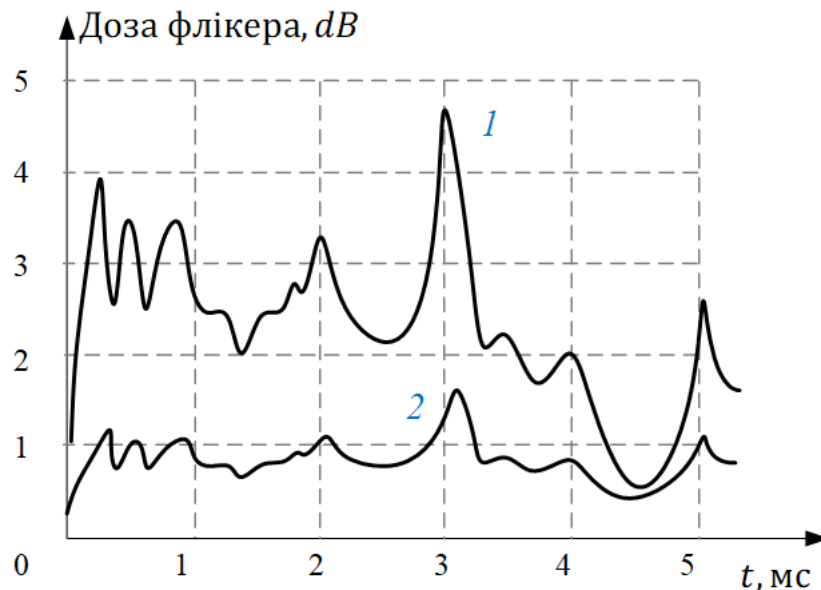


Рис.17.16. Залежності дози флікера від часу:
1 – стандартна технологія; 2 – нові СТК

На даний час спостерігається тенденція розширення функцій пристроїв «акумуляторна батарея – перетворювач» (АБП) для регулювання якості електроенергії в електричній мережі. Структура пристрою типу «on-line» дозволяє стабілізувати параметри напруги, яка живить споживачів. Однак такий пристрій рідко використовується через його відносно високу вартість. Структура пристрою включає мінімум дві перетворювальні ланки, кожна з яких розрахована на повну потужність споживача.

Для уникнення частого підмикання інвертора до батареї при низькій якості напруги мережі застосовують структури з додатковим стабілізатором напруги мережі, що забезпечує необхідний рівень напруги на навантаженні при відносно невеликих відхиленнях: +10...-15%. Наприклад, схема з вольтододавальним трансформатором і перемиканням обмоток. Для більш точного регулювання паралельно з ним ввімкнено реактор з малою індуктивністю. Також може використовуватись малопотужний інвертор, підключений до обмоток вихідного трансформатора послідовно з навантаженням для регулювання напруги у вузькому діапазоні. Основний перетворювач працює в режимі активного фільтра (АФ). Малопотужний інвертор також використовується для підзаряджування акумуляторної батареї.

Структуру АБП із такими функціями прийнято називати інтерактивною стосовно електричної мережі, тобто такою, що знаходиться у визначеній взаємодії з мережею. Відомі організації, як IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) та NEMA (National Electrical Manufacturers Association), ввели стандарти для термінології таких систем. Згідно з визначенням IEEE, в

АБП з інтерактивним зв'язком з мережею, що мають одноступінчасту структуру перетворювача, напруга змінного струму не перетворюється в постійний струм, а живлення навантаження здійснюється безпосередньо від мережі через трансформатор чи реактор. Регулювання напруги здійснюється за допомогою інвертора з ключовими елементами, що поєднуються з пасивними компонентами, такими як реактори, лінійні чи ферорезонансні трансформатори. Термін «інтерактивний АБП» означає, що його інвертор забезпечує підвищення і зниження напруги мережі чи її заміщення у разі провалу напруги.

У деяких нових структурах перетворювач при наявності мережі працює в режимі активного фільтра (АФ), обмежуючи вищі гармоніки нелінійного споживача і компенсуючи потужність основної гармоніки (рис.17.17).

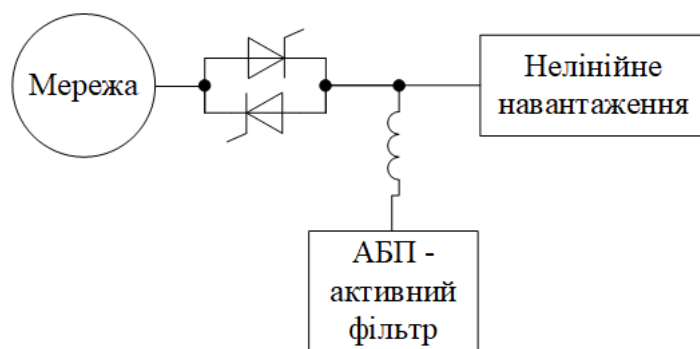


Рис.17.17. Схема підключення АБП

Виключити генерування вищих гармонік струму та поліпшити коефіцієнт потужності споживача за основною гармонікою можна на етапі розробки за допомогою різних схемотехнічних рішень, наприклад, шляхом підвищення числа фаз перетворювачів регульованого електропривода. Ряд фірм розробили коректори потужності, які вбудовуються безпосередньо в нелінійні споживачі. Такий коректор підключається на стороні постійного струму первинного випрямляча і забезпечує споживання струму, близького до синусоїдального, а також підтримує коефіцієнт потужності $\cos\varphi = 1$ у всіх режимах роботи. З урахуванням масового використання, ефект від коректорів потужності може бути значним.

При використанні перетворювачів частоти регульованого електропривода ефективним способом покращення електромагнітної сумісності є застосування пасивних фільтруючих пристроїв. Використання *LC*-фільтрів є вигідним як з технічної, так і з економічної точки зору. Припустимий рівень вищих гармонік, що генеруються перетворювачем частоти, регламентується міжнародними стандартами IEC (IEC 1800-3-EMC. Product Standard for Power Drive System), європейськими нормами EN 61800-3 та рекомендаціями Міжнародного Спеціального Комітету з Перешкод (CISPR).

Контрольні запитання

1. Що таке "вентильно-індукторний двигун" і які особливості має цей тип електроприводу?

2. Якими перевагами володіє ВІД?
3. Які області застосування ВІД?
4. Чому у електроприводі постійного струму із тиристорним перетворювачем виникає область переривчастих струмів?
5. Які схеми з'єднання реверсивних тиристорних перетворювачів існують?
6. Які принципи керування вентилями в реверсивних тиристорних перетворювачах існують?
7. Навести механічні характеристики ВП постійного струму із спільним лінійним і нелінійним узгодженням кутів керування.
8. Яким чином силові напівпровідникові перетворювачі впливають на параметри мережі живлення?
9. Які пристрої використовують для компенсації реактивної потужності в мережі?
10. За допомогою яких пристроїв усувають коливання напруги в енергосистемі?
11. З якою метою силові перетворювачі вмикають в режим генератора антигармонік? Навести діаграми споживання реактивної потужності при симетричному і почерговому керуванні анодною і катодною групами перетворювача.
12. Пояснити принцип компенсації вищих гармонік магнітного потоку трансформатора випрямляча. Навести схему підключення до мережі.

Рекомендована література

[2] – с. 134-142; 174-188

Лекція 18. Аналіз умов експлуатації, вибір системи електропривода.

Тема 6.7. Аналіз умов експлуатації, вибір системи електропривода

Тема 6.7. Аналіз умов експлуатації, вибір системи електропривода

6.7.1. Аналіз умов експлуатації електропривода

Вибір оптимального типу електропривода для певної технологічної установки включає також:

– оцінку умов експлуатації та формування технічних вимог до електропривода;

– розгляд перспективних систем електроприводів, їх техніко-економічний аналіз і визначення оптимального варіанта.

Під умовами експлуатації мається на увазі сукупність зовнішніх чинників, що суттєво впливають на функціонування електропривода. До них належать температура повітря, вологість, тиск, вібрації, удари тощо. Відповідно до ДСТ 16.962-71, усі зовнішні впливи поділяються на механічні та кліматичні.

Механічні впливи можуть спричинити пошкодження окремих компонентів пристроїв і дефектних пайок, порушення контактів у реле та перемикачах, коротке замикання через пошкоджену ізоляцію проводів, самовідгвинчування болтів і гайок тощо.

Обладнання, що експлуатується в стандартних умовах, зазвичай зазнає механічних перевантажень під час транспортування. Апаратура, встановлена на рухомих об'єктах, піддається впливу вібрацій, ударів і прискорень, що може призводити до зміни характеристик пристрою або навіть його руйнування. Особливо небезпечним є механічний резонанс, який здебільшого викликає руйнування конструкції. Перевантаженням називають відношення сили механічного впливу F до сили ваги G пристрою:

$$\rho = \frac{F}{G}. \quad (18.1)$$

Типи окремих механічних чинників і їхні значення наведено в табл. 18.1.

Таблиця 18.1 – Типи механічних чинників

Фактори впливу		Діапазон частоти, Гц	Максимальне прискорення, м/с ²	Тривалість удару, мс
Вібраційні навантаження		1 – 5000 100 – 5000	4,91 – 392 (0,5 g – 40 g) 392 (40 g)	– –
Ударні навантаження	Багаторазові	–	147 – 1471 (15 g – 150 g)	2 – 15
	Поодинокі	–	39,2 – 29400 (4 g – 3000 g)	0,2 – 60

Електричні виводи мають витримувати дію осьової розтягуючої сили без механічних пошкоджень згідно з даними, поданими в таблиці 18.2.

Таблиця 18.2 – Допустимі сили розтягу провідників

Переріз виводів, кв.мм	Допустима сила розтягу, Н
0,1 – 0,2	4,9
0,2 – 0,5	9,8
0,5 – 2,0	19,81

Різьбові виводи мають витримувати дію крутного моменту без механічних пошкоджень (табл. 18.3).

Таблиця 18.3 – Допустимий момент різьбових з'єднань

Діаметр різьби, мм	Допустимий момент, Н·м
M2	0,14
M3	0,49
M4	1,17
M5	1,76

Апаратура, що функціонує без порушень під дією вібрацій, називається вібростійкою. Та, що здатна витримувати тривалі вібрації, прискорення та

удари без зміни характеристик, називається віброміцною та удароміцною. Для захисту апаратури від шкідливого впливу механічних перевантажень застосовують амортизатори або забезпечують її працездатність конструктивними рішеннями. Перевірку апаратури на механічні перевантаження проводять на спеціалізованих стендах.

Згідно з ДСТ 15150-69, визначено кліматичні варіанти виконання виробів та їх категорії залежно від умов експлуатації.

Позначення кліматичних виконань включають три категорії:

- вироби для макрокліматичних районів суші, річок і озер;
- для районів із морським кліматом;
- для експлуатації в усіх макрокліматичних районах на суші й на морі.

Наприклад, для першої категорії передбачено такі позначення:

- для помірного клімату – П;
- для помірного та холодного клімату – ПХК; тощо.

Умовні позначення категорій розміщення виробів охоплюють 5 категорій, наприклад:

- для використання на відкритому повітрі – 1;
- для застосування в приміщеннях із природною вентиляцією – 3; тощо.

ДСТ 15150-69 також визначає допустимі значення температури та відносної вологості повітря.

Захист елементів систем електропривода від впливу зовнішнього середовища регламентується ДСТ 14254-80. Відповідно до нього, маркування складається з літер IP та двох цифр: перша (від 0 до 6) вказує на рівень захисту персоналу від доступу до струмоведучих чи рухомих частин всередині пристрою і захисту виробу від потрапляння твердих предметів, а друга (від 0 до 8) – на ступінь захисту від вологи.

ДСТ 24682-81 встановлює загальні технічні вимоги щодо стійкості до впливу спеціальних середовищ (категорії хімічно стійкого виконання, пожежо- та вибухонебезпечних зон). Наприклад, електротехнічні вироби з напругою до 10 кВ можуть експлуатуватись у пожежонебезпечних зонах будь-якого класу за умови, що ступінь захисту їх оболонки не нижче IP44.

Нижче наведено приклад вимог до конструкції сучасного регульованого електропривода змінного струму, зумовлених особливостями параметрів і характеристик IGBT модулів:

- основний модуль електропривода – це навісна шафа блочного типу з однобічним обслуговуванням, з примусовим повітряним охолодженням силових напівпровідникових модулів;

- для всіх вентильних модулів перетворювача використовується спільний охолоджувач, що виконує функцію несучого елемента шафи; його геометрію оптимізують за результатами теплофізичних розрахунків і досліджень;

- індуктивність з'єднань між модулями інвертора та конденсаторами силового фільтра зведено до мінімуму завдяки їхньому взаємному розміщенню

і з'єднанню плоскими ізолюваними шинами або пластинами мінімального розміру;

- драйвери розташовані максимально близько до IGBT модулів і з'єднані з ними провідниками мінімальної довжини;

- силові та керуючі кола прокладено окремими джгутами, переважно у взаємно перпендикулярних площинах, з метою зменшення завад у мікроконтролерній системі керування.

З урахуванням технічних і економічних факторів очевидно, що парк електричних машин на підприємствах переважно складається з раніше відремонтованих агрегатів. Їхні характеристики суттєво відрізняються від параметрів нових машин, виготовлених на заводі. Це зумовлено змінами властивостей конструкційних матеріалів, зокрема електротехнічної сталі, що виникають під час експлуатації, підготовки до ремонту та самого ремонту. Такі зміни призводять до зниження індукції насичення сталі та зростання струму намагнічування, який набуває несинусоїдальної форми з включенням непарних гармонік 5, 7, 11 тощо.

Слід враховувати, що реальні втрати в сталі двигуна значною мірою залежать від рівня напруги живлення. Її підвищення спричиняє зростання потужності, споживаної на намагнічування, що, у свою чергу, призводить до збільшення теплових втрат і нагрівання ізоляції, внаслідок чого допустиме навантаження на асинхронний електропривод слід зменшувати.

Аналіз свідчить, що рівень напруги живлення є критичним параметром, що визначає працездатність обладнання. Крім того, на надійність електроустаткування впливають усі форми неякісної енергії як з боку джерела живлення, так і від самої електричної машини. Саме тому виникає необхідність у комплексній поточній діагностиці та моніторингу стану устаткування.

Розв'язання проблеми передбачає такі напрямки:

- запровадження періодичного діагностування працюючого обладнання з метою виявлення несправностей на ранніх стадіях, до виникнення аварійної ситуації;

- використання діагностичних методів для безперервного контролю найбільш критичних вузлів агрегату;

- розробка і впровадження мобільних діагностичних засобів для визначення фактичних параметрів електричних машин і залишкового ресурсу їхньої працездатності в реальних умовах експлуатації. Доцільно поєднувати такі роботи з проведенням капітального ремонту технологічного обладнання.

Вимоги до електропривода формуються на основі параметрів технологічного процесу з урахуванням умов експлуатації, при цьому необхідно:

- оцінити можливість застосування нерегульованих приводів як найбільш простих, надійних, економічних і недорогих рішень;

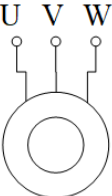
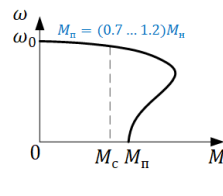
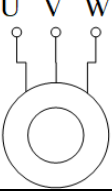
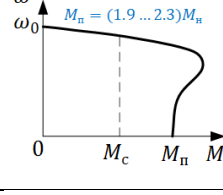
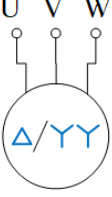
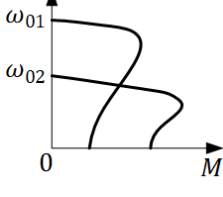
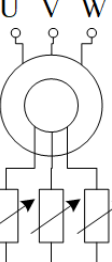
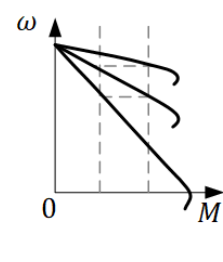
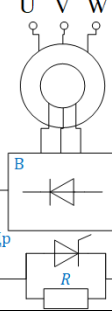
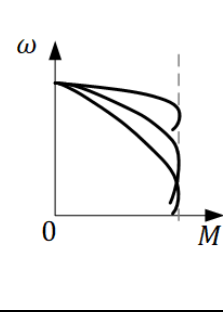
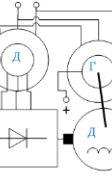
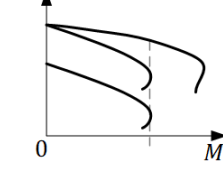
- проаналізувати доцільність створення безредукторного привода, а в перспективі – об'єднання виконавчого органа з двигуном в єдину конструкцію;

- визначити режими пуску, гальмування і зупину (плавний, ступінчастий або прямий пуск, тип гальмування тощо);
- за наявності вимог до регулювання швидкості уточнити необхідний діапазон регулювання;
- за навантажувальною діаграмою встановити тип теплового режиму (S1...S8);
- оцінити доцільність багатодвигунового привода для механізмів із частковим навантаженням або з очікуваним зростанням продуктивності чи потужності;
- сформулювати вимоги до систем захисту і блокування;
- встановити термін служби електропривода, рівень надійності, необхідність резервування тощо.

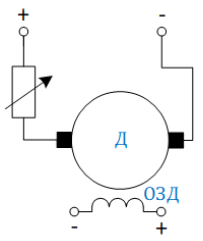
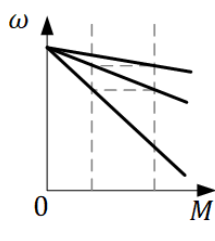
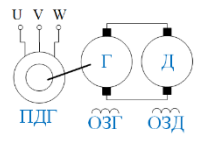
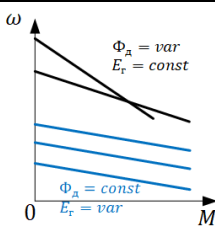
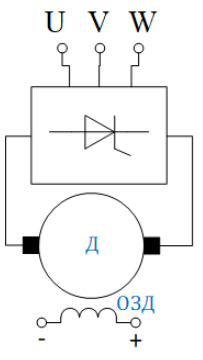
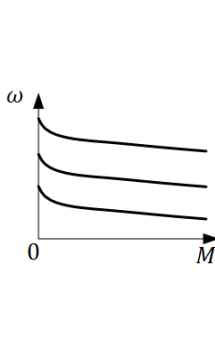
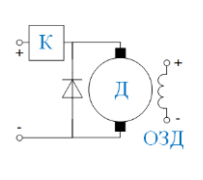
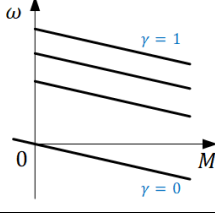
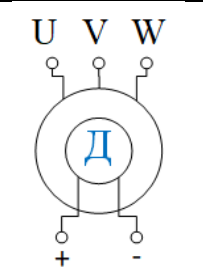
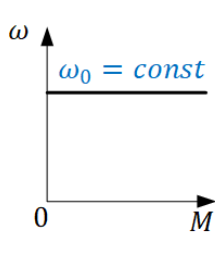
6.7.2. Вибір системи електропривода

У табл. 18.4 наведені основні характеристики систем електроприводів. Остаточний вибір системи електропривода здійснюється на основі техніко-економічного порівняння. Якщо витрати на різні варіанти приблизно однакові, перевагу слід надавати варіанту з меншими капітальними витратами, тобто з меншим початковим вкладенням коштів.

Таблиця 18.4 – Характеристики систем електроприводів

Тип системи електропривода		Характеристики систем електропривода		Механічна характеристика $\omega = f(M)$	ККД	$\cos\phi$	Пуск		Діапазон регулювання швидкості	Економічне регулювання
№	Найменування системи електроприводу	Позначення					ступінчатий	плавний		
1	Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором загального призначення	АД			0,8... 0,9	0,8... 0,9	-	-	1:1	-
2	Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором з підвищеним пусковим моментом	АД			0,75... 0,87	0,75... 0,87	-	-	1:1	-
3	Двошвидкісний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором	АД			0,75... 0,85	0,75... 0,85	+	-	2:1	+
4	Асинхронний двигун з реостатом у колі фазного ротора	АД			0,8... 0,9	0,8... 0,9	+	-	4:1	+
5	Асинхронний двигун з тиристорним комутатором у колі фазного ротора	АД			0,8... 0,9	0,8... 0,9	+	+	10:1	-
6	Вентильно-машинний каскад	ВМ К			0,4... 0,9	0,4... 0,9	+	+	10:1	+

Тип системи електропривода		Характеристики систем електропривода		Механічна характеристика $\omega = f(M)$	ККД	$\cos\varphi$	Пуск		Діапазон регулювання швидкості	Економічне регулювання
№	Найменування системи електроприводу	Позначення					ступінчатий	плавний		
7	Асинхронно-вентильний каскад	АВК			0,4... 0,9	0,4... 0,9	+	+	10: 1	+
8	Частотно-регульований привод (перетворювач частоти – асинхронний (синхронний) двигун)	ПЧ-АД (ПЧ-СД)		$\frac{U}{f} = const$ 	0,7... 0,9	0,5... 0,9	+	+	10: 1	+
					0,7... 0,9	≈ 1.0	+	+	10: 1	+
9	Частотно-регульований привод (перетворювач частоти з безпосереднім зв'язком – АД)	НПЧ-АД		$\frac{U}{f} = const$ 	0,7... 0,9	0,5... 0,9	+	+	10: 1	+
10	Система векторного управління	ВУ			0,7... 0,9	0,5... 0,9	+	+	10: 1	+

Тип системи електропривода		Характеристики систем електропривода		Механічна характеристика $\omega = f(M)$	ККД	$\cos\varphi$	Пуск		Діапазон регулювання швидкості	Економічне регулювання
№	Найменування системи електроприводу	Позначення					ступінчатий	плавний		
11	Двигун постійного струму з реостатним регулюванням	ДПС			0,5... 0,9	-	+	+	4:1	+
12	Генератор-двигун постійного струму	Г-Д			0,4... 0,75	-	+	+	10:1	+
13	Тиристорний перетворювач – двигун постійного струму	ТП-Д			0,4... 0,9	0,5... 0,9	+	+	10:1	+
14	Імпульсне регулювання двигуна постійного струму	ДПС			0,4... 0,9	≈ 1,0	+	+	10:1	+
15	Синхронний двигун	СД			0,8... 0,95	1	-	-	1:1	-

Тип системи електропривода		Характеристики систем електропривода		Механічна характеристика $\omega = f(M)$	ККД	$\cos\varphi$	Пуск		Діапазон регулювання швидкості	Економічне регулювання
№	Найменування системи електроприводу	Позначення					ступінчатий	плавний		
16	Вентильний двигун з ланкою постійного струму	ВД			0,7... 0,95	1	+	+	10: 1	+
17	Вентильний двигун із перетворювачем з безпосереднім зв'язком	ВД			0,7... 0,95	0,5... 0,9	+	+	10: 1	+

На практиці часто постає задача модернізації існуючого обладнання, яка виникає у таких випадках:

- коли вийшло з ладу застаріле обладнання, що більше не випускається або не відповідає технологічним вимогам;
- коли мають місце часті аварії механізмів;
- коли планується реконструкція всього технологічного ланцюга, до якого входить ця установка.

При проведенні модернізації існуючого устаткування необхідно дотримуватися таких вимог:

- максимальне використання діючого обладнання;
- мінімальні зміни в існуючій схемі.

Типи основних регульованих електроприводів з коротким описом наведені в табл. 18.5. МПЖ – машина подвійного живлення.

Таблиця 18.5 – Основні типи електроприводів

		ТП-Д	ПЧ-АД			ВД		АВ К	МП Ж	Фазове керуванн я ТРН- АД	Привод з електромагнітні ми муфтами
1. Тип двигуна		ДПС	АД КЗР			СД		АД з фазним ротором		АД КЗР	
2. Щітки чи колектор контактні кільця		+	-			-(+)		+		-	-
3. Керування з боку		якоря	статора			статора		статора		статора	
4. Регульований параметр		напруга	частота і напруга			напруга		напруга		напруга	
5. Структура перетворювача		КВ	КВ -ІН	КВ -ІС	ШІ М	КВ- ІС	БПЧ	І	БПЧ	-	-
6. Режим робот и:	Рушійний	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Гальмівни й	+	+	-	+	+	+	-	-	+	+
	Чотири квадранти	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-
	Часті пуски	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
	Часті реверси	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-
7. Можливий діапазон робочих частот		Зі збільшення м частоти зменшуєть ся гранична потужність	Верхня межа обмежена механічною міцністю машини			Верхня межа обмежена механічно ю міцністю машини. Усталена робота при низьких швидкостя х.		0-50 Гц	30-70 Гц	40-50 Гц	0-50 Гц

Системи регулювання швидкості на змінному струмі можна класифікувати за енергетичним принципом:

– системи з регулюванням кількості підведеної до електродвигуна енергії;

– системи з втратою енергії ковзання;

– системи з рекуперацією енергії ковзання.

До першого класу відносяться системи з регулюванням поданої на статор напруги і регулюванням частоти. Ці методи є порівняно простими і економічними. Їх недолік – це перетворення всієї підведеної енергії. Окрім того, пристрої плавного регулювання високої напруги на великому діапазоні є складними і дорогими.

До систем другого класу належать реостатна система, привод з поворотним статором, асинхронна муфта ковзання, гідромуфта і інші. Багато з цих систем важко реалізувати при великих потужностях, і вони є низькоекономічними.

До систем третього класу з рекуперацією енергії ковзання відносяться різні каскадні схеми ввімкнення асинхронного двигуна, при яких у роторне коло подається регульована напруга. Найбільш використовуваною є асинхронно-вентильна каскадна схема (АВК). Основний недолік цієї системи – зниження коефіцієнта потужності при збільшенні глибини

регулювання. Також максимальна швидкість асинхронного двигуна за цією схемою є меншою за номінальну, що зменшує зону економічної роботи, наприклад, для вентилятора.

Машини подвійного живлення мають перевагу активних каскадів в можливості регулювання швидкості як вгору, так і вниз від синхронного значення, що дозволяє знизити потужність перетворювальних пристроїв. Однак основний недолік – неповний діапазон регулювання.

При виборі типу електропривода перевагу слід віддавати системам електропривода змінного струму з таких причин:

- електроенергія виробляється і передається споживачам в основному на змінному струмі;

- електродвигуни постійного струму за габаритами, масою і вартістю в 1,5...2,5 рази перевищують двигуни змінного струму тієї ж потужності та частоти обертання;

- надійність ДПС через наявність колекторно-щіткового вузла та майже повну відсутність закритого виконання значно нижча, ніж у двигунів змінного струму;

- момент інерції ДПС у 1,5...1,7 рази вищий, ніж у АД з короткозамкненим ротором, що забезпечує більш високу швидкодію систем привода змінного струму;

- енергетичні показники і регульовальні властивості систем змінного струму з тиристорними перетворювачами не гірші, ніж у приводів постійного струму. Наприклад, переважувальна здатність у приводів із синхронними двигунами вища, ніж у двигуна постійного струму;

- вартість статичних перетворювачів для ДПС приблизно дорівнює вартості перетворювачів для приводів змінного струму, а система генератор-двигун постійного струму по масі і вартості в 1,5...2,0 рази перевищує масу і вартість перетворювачів тієї ж потужності, причому ККД системи Г-Д на 10...20% нижче.

Застосування електроприводів постійного струму доцільне лише в таких випадках:

- якщо на місці встановлення вже наявне джерело постійного струму з можливістю регулювання;

- якщо відсутні серійно вироблювані системи приводу. Наприклад, вентиляційний двигун із синхронною машиною може слугувати альтернативою безредукторному малошвидкісному приводу постійного струму, однак такий двигун у необхідному діапазоні потужностей серійно не виготовляється;

- для машин і механізмів, що працюють у складних умовах (наприклад, при високій вібрації), коли надійність систем зі статичними перетворювачами нижча порівняно з системою генератор-двигун (наприклад, у екскаваторах);

- у підйомно-транспортному обладнанні з потенційним навантаженням, де для енергозбереження привод тривалий час працює в режимі рекуперативного гальмування (як у підйомних механізмах, кранах тощо).

Із таблиці 18.5 видно, що вентильний двигун і частотно-регульований асинхронний привод є найбільш універсальними варіантами регульованих електроприводів із найкращими технічними характеристиками. Зокрема, за режимами роботи вентильний двигун не поступається приводу постійного струму, водночас маючи переваги у вигляді практично необмеженого діапазону потужностей і частот обертання, вищої надійності та простішої конструкції.

Застосування вентильного двигуна відкриває нові перспективи у запуску потужних синхронних машин (наприклад, на Київській ГАЕС п'ять синхронних генераторів по 45 МВт запускаються за схемою ВД) і створенні потужних регульованих безредукторних приводів як для низько-, так і високошвидкісних режимів.

Оснoву вентильного двигуна становить синхронна машина, яка перевершує інші за енергетичними показниками. Вона має високий ККД, здатна працювати з випереджаючим коефіцієнтом потужності, відзначається високою надійністю завдяки більшому повітряному зазору та прямо пропорційній залежності перевантажувальної здатності від напруги живлення.

Звичайний синхронний двигун надійніший за будь-яку іншу електричну машину, а за вартістю поступається лише асинхронному з короткозамкненим ротором. Його безконтактність забезпечується як традиційними засобами (безщітчні системи збудження з обертовими випрямлячами), так і новітніми (використання постійних магнітів на роторі, кігтеподібного ротора з обмоткою збудження на статорі тощо).

Частотний перетворювач разом із асинхронним двигуном може використовуватися як заміна для приводів постійного струму. У такому випадку значно знижуються витрати на експлуатацію, покращується перевантажувальна здатність і, відповідно, підвищується надійність системи. Застосування частотно-регульованого електропривода забезпечує енергозбереження за рахунок усунення непродуктивного споживання енергії в таких елементах, як дроселі, механічні муфти тощо. Заощадження енергії прямо залежить від рівня непродуктивних витрат і може досягати 80%.

Крім того, частотно-регульований привод має функцію енергозбереження, що дозволяє зменшити споживання електроенергії на 5–30% при виконанні тієї ж роботи завдяки підтриманню оптимального ККД двигуна. У цьому режимі перетворювач автоматично контролює струм, оцінює навантаження та знижує вихідну напругу, що зменшує втрати в обмотках і підвищує ефективність роботи двигуна.

Режим енергозбереження ефективно застосовується для таких завдань:

- регулювання швидкості обертання насосів і вентиляторів;
- керування обладнанням із змінним навантаженням;
- експлуатація машин, які більшість часу працюють при низькому навантаженні.

Серед основних об'єктів енергозбереження важливе місце займають системи теплопостачання та водопостачання. Ключові напрями економії:

- зниження споживання електроенергії обладнанням;

– зменшення непродуктивних втрат тепла та води.

Техніко-економічна ефективність частотно-регульованого електропривода забезпечується:

– впровадженням зворотного зв'язку за керуванням параметром (тиском, температурою, швидкістю обертання, зусиллям), що дозволяє автоматично змінювати потужність споживання електродвигуном відповідно до заданої програми;

– використанням функцій плавного пуску та зупинки двигуна;

– зменшенням потреби в установці додаткової регулюючої арматури;

– зниженням експлуатаційних витрат.

Порівняно з традиційними приводами, частотно-регульований електропривод має численні переваги, які особливо проявляються при необхідності регулювання об'єму, тиску, швидкості тощо на обладнанні з двигунами постійної швидкості. **Переваги** частотно-регульованого електропривода:

– економія електроенергії;

– високий рівень керованості (широкий діапазон регулювання, швидке реагування, високі прискорення і гальмування, можливість керування кількома двигунами, добра сумісність, плавний запуск);

– покращення якості продукції;

– підвищена якість устаткування;

– зниження витрат на технічне обслуговування;

– перспектива модернізації;

– менший час простоїв;

– стійкість до агресивного середовища.

Проте існують і **недоліки**:

– високі початкові грошові витрати;

– підвищені рівні гармонік струму і напруги;

– потреба у спеціальних фільтрах та ізолюючих трансформаторах;

– висока складність системи;

– потреба в додатковому просторі для електронних компонентів;

– зменшення ресурсу роботи двигуна.

Отже, існує низка чинників, які сприяють або перешкоджають застосуванню традиційного чи частотно-регульованого електропривода. Якщо переважають недоліки традиційного привода, їх можна зменшити, замінивши його частотно-регульованим електроприводом. Однак після впровадження частотно-регульованого привода також можуть виникати недоліки, раніше непомітні. До найтипівіших належать вібрація і шум.

Вібрація може стати серйозною проблемою, оскільки частотно-регульований електропривод може викликати небажані вібрації на різних частотах. Для їх усунення застосовують фільтри на вході й виході перетворювача.

Шум може походити з двох джерел. У традиційному приводі він зазвичай виникає від механічних частин, таких як муфти, редуктори тощо. При

використанні частотно-регульованого електропривода ці шуми зменшуються. Вентилятори, які тривалий час працюють на низьких швидкостях, створюють мінімальний шум. Проте сама електроніка частотно-регульованого привода може бути джерелом шуму. Отже, якщо традиційний привод був безшумним, після переобладнання рівень шуму може зрости.

Зазвичай залишають старий пускач і вимикач після встановлення частотно-регульованого електропривода. Схема часто проектується таким чином, щоб електроніку можна було замінити в разі виникнення проблем. Хоча це вважається перевагою частотно-регульованого електропривода, насправді це є наслідком переустаткування.

Небажані явища можуть виникати як у традиційному, так і в частотно-керованому приводі, але з ними значно легше справлятися за допомогою частотно-регульованого електропривода.

Сфера застосування частотно-регульованого електропривода:

- насоси холодної та гарячої води (від підкачувальних до магістральних);
- компресори, повітродувки, вентилятори систем охолодження, тягодуттєві вентилятори котлів;
- рольганги, конвеєри, транспортери та інші транспортувальні пристрої;
- дробильне устаткування, мішалки, екструдери;
- центрифуги різних типів;
- лінії виробництва металевого листа, плівки, картону, паперу та інших стрічкових матеріалів;
- бурове устаткування (насосне, підйомне);
- пристрої відкачки нафти зі свердловин (станки-качалки, заглиблювальні насоси тощо);
- електрорушійні та допоміжні механізми річкового і морського транспорту;
- крани (від тельферів до мостових);
- металообробні верстати, пилки, преси та інше технологічне устаткування;
- високообертові (до 90000 об/хв) механізми: шпинделі шліфувальних верстатів та ін.

Контрольні запитання

1. Навести визначення і класифікацію умов експлуатації електроприводів.
2. Яким чином маркується обладнання за ступенем захисту від навколишнього середовища?
3. Які заходи слід вживати для комплексної поточної діагностики і моніторингу устаткування?
4. На яких підставах визначається тип системи електроприводу для конкретної задачі? Які параметри електроприводу слід враховувати при його виборі?

5. У яких випадках доцільна модернізація вже наявного електромеханічного устаткування?

6. Навести класифікацію електроприводів змінного струму по енергетичному принципу.

7. У яких випадках доцільно використовувати електроприводи змінного струму?

8. У яких випадках слід використовувати електроприводи постійного струму?

9. Які типи електричних приводів є найбільш універсальними і чому?

10. Навести переваги і недоліки частотно-регульованого електроприводу.

11. Область застосування частотно-регульованого електроприводу.

Рекомендована література

[1] – с. 214-228

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Закладний О. М. Енергозбереження засобами промислового електропривода : навч. посіб. / О. М. Закладний, А. В. Праховник, О. І. Соловей. – К. : Кондор, 2005. – 408 с.
2. Закладний О. М. Електропривод : навч. посіб. / О. М. Закладний, В. В. Прокопенко, О. О. Закладний. – К. : НТУУ «КПІ», 2008. – 316 с.
3. Теорія автоматичного керування. Частина 1 : моделювання лінійних систем автоматичного управління [Електронний ресурс] : метод. вказівки до виконання лаб. робіт для студентів спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Системи управління виробництвом і розподілом електроенергії» / уклад.: А. А. Марченко, Д. В. Настенко, В. С. Гулий. – К. : НТУУ «КПІ», 2016. – 55 с.
4. Рогоза М. В. Сучасна перетворювальна техніка : конспект лекцій для студентів спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / М. В. Рогоза, Н. Ю. Рухлова, Є. В. Кошеленко, В. А. Бородай ; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д. : НТУ «ДП», 2022. – 84 с.
5. Победаш К. К. Силові напівпровідникові прилади і перетворювачі електричної енергії [Електронний ресурс] : навч. посіб. / К. К. Победаш, В. А. Святненко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл : 4,15 Кбайт). – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 244 с. – Назва з екрана.