

О. А. АВДЄЄВА, О. С. САДОВИЙ

ЕЛЕКТРОПРИВІД І АВТОМАТИЗАЦІЯ

КУРС ЛЕКЦІЙ

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

О. А. АВДЕЄВА, О. С. САДОВИЙ

ЕЛЕКТРОПРИВІД І АВТОМАТИЗАЦІЯ

КУРС ЛЕКЦІЙ

**Миколаїв
2018**

УДК 621.313.13
Е50

Автори: О. А. Авдєєва, О. С. Садовий

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Миколаївського національного аграрного університету від 25 січня 2018 р, протокол № 6.
Конспект лекцій для здобувачів вищої освіти денної та заочної форми навчання спеціальності 208 «Агроінженерія»

Рецензенти:

І. П. Атаманюк – доктор технічних наук, професор кафедри вищої та прикладної математики Миколаївського національного аграрного університету

І. С. Білюк – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматики, НУК ім. адм Макарова.

Авдєєва О. А.

Е50 **Електропривід і автоматизація / О. А. Авдєєва, О. С. Садовий.** – Миколаїв : МНАУ, 2018. – 98с

У курсі викладено теоретичний матеріал з дисципліни **Електропривід і автоматизація**. наведено конкретні приклади регулювання електроприводом

УДК 621.313.13

© Миколаївського національного аграрного університету, 2018
© Авдєєва О.А.Садовий О.С., 2018

ЗМІСТ

Загальна характеристика конспекту лекцій

Автоматизований електропривод - основа розвитку продуктивних сил України.....	6
Лекція 1.	
1.1. Розвиток електроприводу як галузі науки і техніки.....	6
1.2. Принципи побудови систем управління автоматизованим електроприводом.....	8
Лекція 2.	
1.3. Класифікація систем управління АЕП.....	13
Механіка електроприводу.....	18
Лекція 3.	
2.1. Приведення моментів і сил опору, моментів інерції.....	18
Лекція 4.	
2.2. Рівняння руху електроприводу.....	21
Лекція 5.	
2.3. Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження. Руховий режим.....	26
Лекція 6.	
2.4. Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження. Режим електричного гальмування.....	33
Лекція 7.	
2.5. Механічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження. Руховий режим.....	44
Лекція 8.	
2.6. Механічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження. Режим електричного гальмування..	48
Лекція 9.	
2.7. Механічні характеристики асинхронних двигунів. Руховий режим.....	52

Лекція 10.	
2.8. Механічні характеристики асинхронних двигунів. Режим електричного гальмування.....	57
Лекція 11.	
2.9. Механічні та електричні характеристики синхронних двигунів	66
Типові вузли схем автоматичного управління двигунами.....	72
Лекція 12.	
3.1. Принципи автоматичного керування пуском і гальмуванням двигунів.....	72
Лекція 13.	
3.2. Типові вузли схем автоматичного управління пуском ДПС.	77
Лекція 14.	
3.3. Типові вузли схем автоматичного управління гальмуванням ДПС.....	82
Лекція 15.	
3.4. Типові вузли схем автоматичного управління пуском двигунів змінного струму.....	90
Лекція 16.	
3.5. Типові вузли схем автоматичного управління гальмуванням двигунів змінного струму.	95
Лекція 17.	
3.6. Вузли електричного захисту двигунів і схем управління. . .	98

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД - ОСНОВА РОЗВИТКУ ПРОДУКТИВНИХ СИЛ УКРАЇНИ

Лекція 1.

1.1. Розвиток електроприводу як галузі науки і техніки

З давніх часів людина прагнула замінити важка фізична праця, який був джерелом механічної енергії (МЕ), на роботу механізмів і машин. Для цього на транспорті та на сільськогосподарських роботах, на млинах і зрошувальних системах він використовував мускульну силу тварин, енергію вітру і води, а пізніше - хімічну енергію палива. Так з'явився привід - пристрій, що складається з трьох істотно різних частин: двигуна (Д), механічного передавального пристрою (МПП) та технологічної машини (ТМ).

Призначення двигуна: перетворення енергії різних видів в механічну енергію. МПУ призначене для передачі МЕ від двигуна до ТМ. Воно не впливає на кількість переданої МЕ (без урахування втрат), але може змінювати її параметри і для узгодження видів руху виконується у вигляді пасової, ланцюгової, зубчастої або інших механічних передач.

У технологічній машині МЕ використовується для зміни властивостей, стану, форми або положення оброблюваного матеріалу або виробу.

В сучасних приводах як джерело МЕ використовуються різні електричні двигуни (ЕД). Вони перетворюють електричну енергію (ЕЕ) в механічну і тому привід отримав назву електроприводу (ЕП). Його функціональна схема приведена на рис. 1.1. До її складу, крім названих елементів, входить керований перетворювач (П), за допомогою якого ЕЕ від мережі подається до ЕД.

Змінюючи сигнал управління перетворювачем U_y , можна змінювати кількість ЕЕ, що надходить від мережі до ЕД. В результаті цього буде змінюватися кількість МЕ, що виробляється двигуном і одержуваної ТМ. Це, в свою чергу, призведе до зміни технологічного процесу, ефективність якого характеризується регульованою величиною $u(t)$.

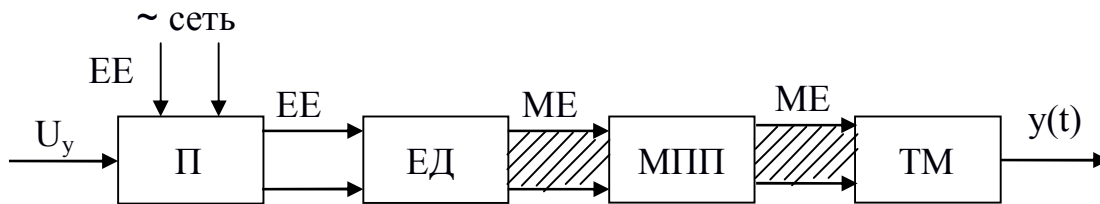


Рис. 1.1 - Функціональна схема електроприводу.

Пріоритет у створенні електроприводу належить російським ученим Б.С. Якобі і Е.Х. Ленцу, які в 1834 році винайшли двигун постійного струму, а в 1838 році застосували його для приведення в рух катера. Однак недосконалість двигуна і неекономічність джерела електричної енергії (гальванічної батареї) не дозволили цьому електроприводу знайти практичне застосування.

В середині ХІХ століття спроби застосування ЕП з двигуном постійного струму для друкарських і ткацьких машин робилися вченими Франції та Італії. Однак система постійного струму не давала задовільного рішення. До 1890 року тільки 5% загальної потужності двигунів приводів становили електричні двигуни.

Широке застосування електроприводу пов'язано з винаходом в 1889-1891 роках російським інженером Даліво-Добровольським системи трифазного змінного струму і трифазного асинхронного двигуна. Простота трифазної системи, можливість централізованого виробництва електроенергії, зручність її розподілу привели до того, що до 1927 року вже 75% загальної потужності двигунів приводів становили електричні двигуни.

В даний час в провідних галузях промисловості відношення встановленої потужності електроприводів до загальної встановленої потужності приводів з двигунами всіх видів (теплових, гідравлічних, пневматичних) наближається до 100%. Це залежить від того, що ЕГ виготовляються на різноманітні потужності (від сотих часток вата до десятків тисяч кіловат) і швидкості обертання (від часткою обороту вала в хвилину до декількох сотень тисяч обертів на хвилину);

ЕП працює в середовищі агресивних рідин і газів при низьких і високих температурах; завдяки керованості перетворювача, ЕП легко регулює хід технологічного процесу, забезпечуючи різні параметри руху робочих органів ТМ; він має високий к.к.д., надійний в експлуатації і не забруднює навколишнє середовище.

В даний час сумарна встановлена потужність електричних генераторів України перевищує 50 млн. КВт. Для розподілу такої потужності на всіх рівнях напруги створені і електричні мережі.

Однак у зв'язку зі спадом, в першу чергу, промислового виробництва забезпечення реального споживання електроенергії на Україні здійснюється за рахунок половини зазначеної потужності. Такий істотний енергетичний запас є надійною основою для розвитку виробничих сил України, пов'язаного з впровадженням нових енергозберігаючих технологій, випуском сучасної високотехнологічної продукції, подальшим розвитком автоматизації та механізації виробництва. Рішення всіх, без винятку, названих завдань забезпечується застосуванням різних систем електроприводу, збільшенням споживання електроприводом електричної енергії, яке в існуючій структурі споживання вже наближається до 70%.

1.2. Принципи побудови систем управління автоматизованим електроприводом

Відмінною особливістю сучасного електроприводу є те, що в ньому сигнал управління перетворювачем U_y формується спеціальним автоматичним керуючим пристроєм (АУУ) без безпосередньої участі людини. Таке управління називають автоматичним, а електропривод - автоматизованим (АЕП).

Систему управління АЕП, як і будь-яку іншу систему автоматичного управління, можна розглядати як систему, що сприймає і переробну інформацію.

У першому каналі формується інформація про необхідному значенні регульованої величини $q(t)$ (задає вплив).

У другому каналі за допомогою датчиків може бути отримана інформація про дійсне значення регульованої величини $y(t)$ або інших величинах, що характеризують ЕП.

Третій канал може подавати в систему управління інформацію про обурюють впливах $f_i(t)$ у вигляді сигналу $x_i(t)$.

Залежно від кількості використовуваних каналів інформації розрізняють три принципи побудови систем управління автоматизованим електроприводом:

- 1) принцип розімкнутого керування;
- 2) принцип замкнутого управління;
- 3) принцип комбінованого управління.

Розглянемо функціональні схеми систем управління АЕП.

Систему управління АЕП, побудовану за принципом разомкнутого управління, називають розімкнутої системою. У ній використовується тільки один канал інформації - про необхідному значенні регульованої величини $q(t)$. Функціональна схема такої системи управління приведена на рис.1.2.

У вузол підсумовування на вході АУУ, як і в попередньому випадку, від КО подається інформація про $q(t)$. Стрілка, що позначає $q(t)$, спрямована в незатемнєний сектор вузла підсумовування. Це означає, що задає сигнал надходить у вузол підсумовування зі знаком «+».

Автоматичне керуючий пристрій формує сигнал управління перетворювачем U_u , використовуючи тільки інформацію про величину задає впливу $q(t)$, яке на вхід АУУ подається від командного органу (КО). В результаті того, що на кожен елемент функціональної схеми впливають впливи $f_i(t)$, кількість що надходить до технологічної машині механічної енергії, а значить і хід

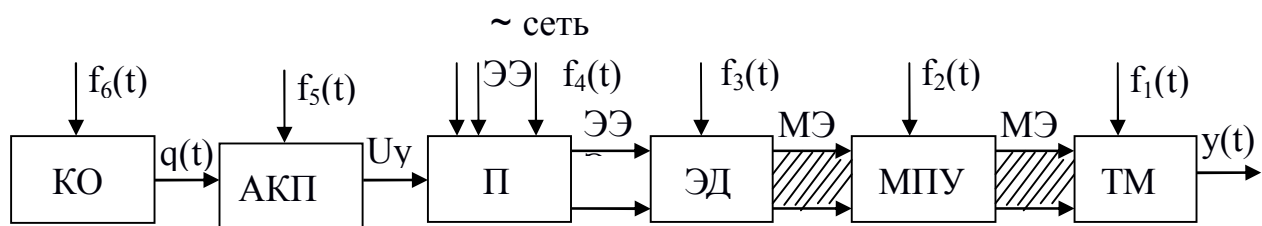


Рис 1.2 - Функціональна схема розімкнутої системи управління АЕП

технологічної операції будуть змінюватися. В результаті цього дійсне значення регульованої величини $y(t)$ може істотно відрізнятись від необхідного значення $q(t)$. Різниця між необхідним і дійсним значенням регульованої величини в сталому режимі (коли регульована величина $y(t)$ не змінюється в часі) називають помилкою управління $\Delta x(t) = q(t) - y(t)$.

Розірвані системи АЕП застосовуються в тому випадку, якщо поява помилки управління не призводить до суттєвих втрат в технології (зменшення продуктивності ТМ, зниження якості продукції та ін.)

В іншому випадку, коли поява помилки управління значно знижує ефективність технологічного процесу, для побудови системи управління АЕП використовують принцип замкнутого управління. Називають таку систему замкнутою.

У ній використовуються два канали інформації: до інформації про необхідному значенні регульованої величини $q(t)$ додається інформація про дійсне значення регульованої величини $y(t)$. Функціональна схема такої системи управління приведена на рис.1.3.

Інформація про дійсне значення регульованої величини $y(t)$ подається в вузол підсумовування за допомогою головної зворотного зв'язку (ДОС). Кажуть, що ДОС «замикає» систему управління, поєднуючи її вихід з входом.

Стрілка, що позначає $y(t)$, спрямована в затемнений сектор вузла підсумовування, тобто сигнал ГОС надходить у вузол підсумовування зі знаком «-» і тому ГОС називається негативним зворотним зв'язком.

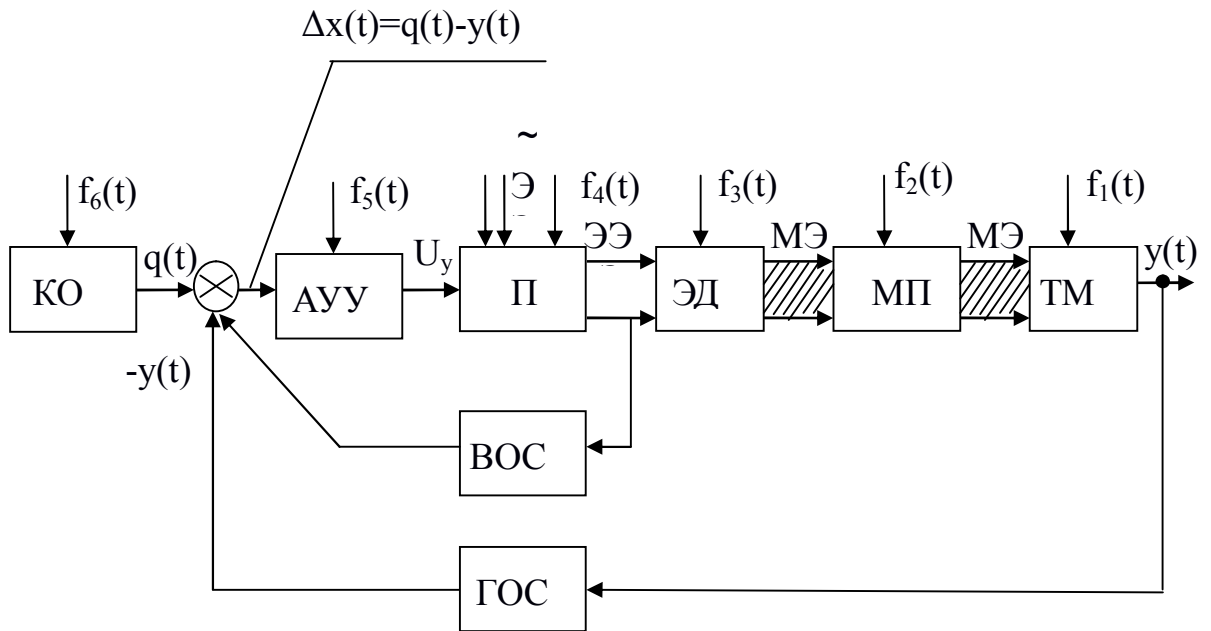


Рис. 1.3 - Функціональна схема замкнутої системи управління АЕП.

У вузлі підсумовування в результаті алгебраїчного (з урахуванням знака) складання сигналів $q(t)$ і $y(t)$ здійснюється визначення величини і знака помилки управління $\Delta x(t) = +q(t) - y(t)$. Сигнал помилки надходить на вхід АУУ. Завдяки цьому АУУ, формуючи сигнал управління перетворювачем П на підставі інформації про реально існуючому співвідношенні заданого і дійсного значення регульованої величини забезпечує подачу до ЕД такої кількості ЕЕ, а до технологічної машині МЕ, що помилка управління може бути зменшена до допустимої величини або зведена до нуля.

Крім ДОС, в системі управління можуть бути різні внутрішні по відношенню до ДОС зворотні зв'язки (ВОС). Вони контролюють проміжні параметри системи, що покращує якість процесу управління. Систему, яка містить тільки ДОС, називають одноконтурною, а має, крім ДОС, ще й ВОС - багатоконтурною.

В системі, побудованій з комбінованого принципу, об'єднані дві структури - замкнута і разомкнута. До замкнутій системі, яка є основною, додається разомкнута структура по третьому каналу інформації $x_1(t)$ про основне впливи, що обумовлюються $f_1(t)$. Функціональна схема системи приведена на Рисюнку 1.4.

Основним є вплив, що обурює, яке має найбільшу складову в величині помилки управління.

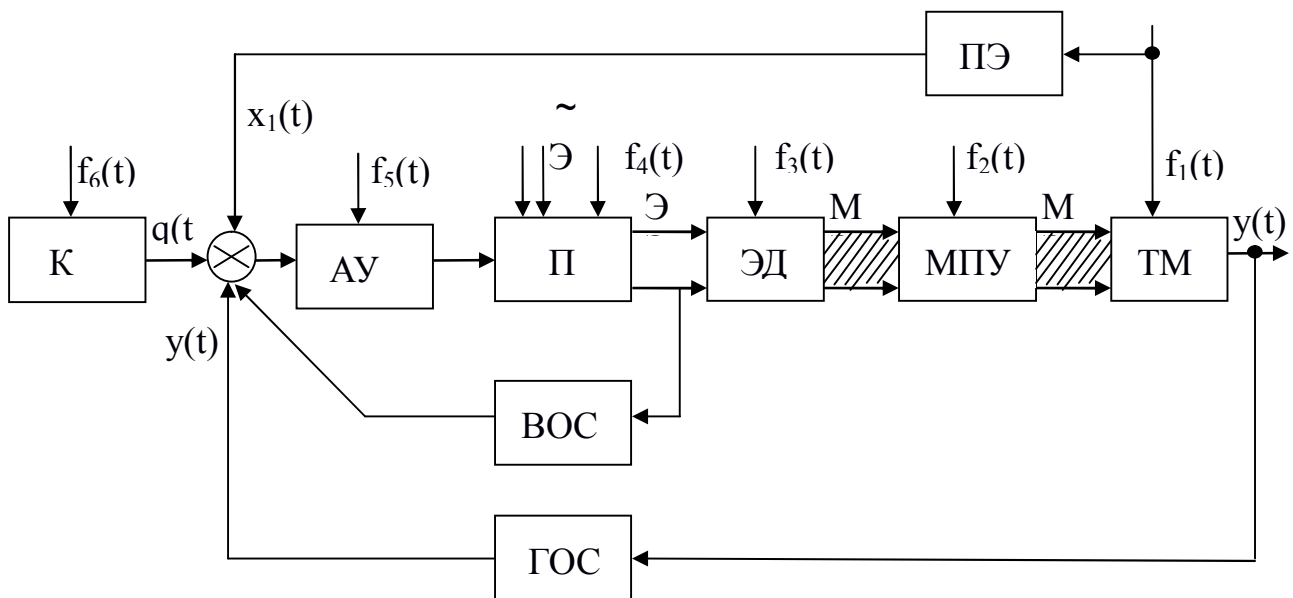


Рис. 1.4 - Функціональна схема комбінованої системи управління АЕП

На рис. 1.4 за основне, прийнято рівноваги вплив $f_1(t)$. Воно контролюється проміжним елементом (ПЕ) і інформація про нього $x_1(t)$ подається в вузол підсумовування. Завдяки цьому, АУУ вводить в сигнал управління перетворювачем складову, яка компенсує вплив $f_1(t)$ на технологічний процес і зменшує величину помилки управління. Вплив інших впливів, що обурюють на помилку ліквідує основна замкнута система.

Розглянуті приклади дозволяють дати визначення поняттю «автоматизований електропривод».

Автоматизований електропривод являє собою електромеханічну систему, в якій, по-перше, здійснюється перетворення електричної енергії в механічну. За допомогою цієї енергії приводяться в рух робочі органи технологічної

машини. І, по-друге, відбувається управління процесом перетворення енергії з метою забезпечення необхідних сталих і перехідних режимів роботи ТМ.

Лекція 2.

1.3. Класифікація систем управління АЕП

Класифікація систем управління АЕП може проводитися за багатьма ознаками: за родом струму двигуна системи поділяються на змінний і постійний струм. По виду сигналів інформації та управління - на безперервні і дискретні системи. Залежно від характеру рівнянь, що описують процеси управління - на лінійні і нелінійні системи. Часто їх поділяють з вигляду перетворювача або основної апаратури: система - генератор постійного струму-двигун (Г-Д); система - тиристорний перетворювач - двигун (ТП-Д); система - тиристорний перетворювач частоти - двигун (ТПЧ-Д) і ін.

Однак найбільшого поширення набула класифікація систем управління АЕП за функціями, що виконуються ними в технологічних процесах. Таких функцій можна виділити п'ять.

1. Системи управління процесами пуску, гальмування, реверсу. Серед них, в свою чергу, можна виділити три групи систем.

Системи першої групи розімкнуті. Застосовуються в електроприводах з асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором. Перетворювач складається з силового перемикає пристрої (СПУ), що підключає двигун безпосередньо до мережі. Вся апаратура управління - релейної дії (контактна або безконтактна).

Системи управління другої групи виконуються також роз'єднаними. Вони застосовуються в електроприводах з двигунами постійного струму і асинхронними двигунами з фазним ротором, мають більш складну структуру СПУ, що забезпечують ступінчасте перемикання резисторів або інших елементів в силових ланцюгах двигуна. Забезпечують управління автоматичним

пуском і гальмуванням, при якому обмежуються ток і момент двигуна. При ручному управлінні СПУ можливе регулювання швидкості в Рисому діапазоні.

Системи третьої групи призначені для здійснення оптиРисьних процесів пуску, гальмування, реверсу. Під оптиРисьними в даному випадку розуміють перехідні процеси, що протікають за мініРисьний час. Це забезпечується підтримкою в процесі пуску і гальмування величини крутного моменту двигуна на рівні допустимого значення.

Застосовуються такі системи в електроприводах з повторно-короткочасним режимом роботи, коли час усталеного режиму Рисо, або зовсім відсутній. Тому поява помилки керування не буде приводити до втрат в технології і система може не мати ДОС.

Замкнутий контур регулювання в такій системі утворюється негативним зворотним зв'язком по моменту (струму) двигуна. На рис.1.4 вона показана як ВОС. Регульованою величиною в даному випадку стає момент двигуна. Тому АУУ формує сигнал управління П таким чином, щоб в процесі пуску і гальмування момент підтримувався на необхідному рівні або змінювався в часі по необхідному закону.

2. Системи підтримки постійним заданого значення регульованої величини (системи стабілізації). Регульованими є величини, що характеризують рух робочого органу ТМ і вала двигуна - швидкість, прискорення, момент, потужність і ін.

Системи стабілізації побудовані по замкнутому принципом і можуть мати функціональну схему, наведену на рис.1.4. У такій системі задає сигнал $q(t) = \text{const}$. Тому зменшення регульованої величини $y(t)$, викликане появою обурює впливу $f_1(t)$, буде приводити до збільшення сигналу помилки управління на вході АУУ. Автоматичне керуючий пристрій формує сигнал управління перетворювачем в залежності від застосовуваного в ньому закону управління (типу регулятора). При пропорційному законі управління в якості регулятора використовується пропорційне (підсилювальний) ланка з коефіцієнтом посилення великим одиниці (П - регулятор). Тому при збільшенні сигналу

помилка на вході П - регулятора буде збільшуватися і сигнал управління перетворювачем. В результаті цього буде збільшуватися кількість ЕЕ і МЕ, що призведе до збільшення $u(t)$ і зменшення помилки управління. Однак вона не може бути компенсована повністю, так як в цьому випадку сигнали на вході і виході П - регулятора будуть дорівнюють нулю, до двигуну не буде подаватися ЕЕ і технологічний процес зупиниться.

Систему стабілізації, в якій помилка управління не зводиться до нуля, а тільки лише зменшується до допустимої величини, називають статичної.

При пропорційно - інтегральному законі управління регулятор складається з двох включених паралельно ланок - пропорційного і інтегрального (П-І - регулятор). Сигнал помилки надходить одночасно на вхід обох ланок. Пропорційна частина регулятора, як і в попередньому випадку, буде посилювати сигнал помилки. Інтегральна частина регулятора сигнал помилки буде підсумовувати, тобто її вихідний сигнал буде збільшуватися до тих пір, поки на вході регулятора є сигнал помилки. Оскільки вихідний сигнал регулятора (сигнал управління перетворювачем) є сумою вихідних сигналів пропорційної і інтегральної частин, то до тих пір, поки на вході регулятора буде сигнал помилки, його вихідний сигнал буде збільшуватися. В результаті цього буде збільшуватися кількість ЕЕ і МЕ в системі і зменшуватися помилка управління. Коли сигнал помилки на вході регулятора стане рівним нулю, сигнал на виході регулятора буде більше нуля, завдяки тому, що інтегральна частина регулятора після зникнення сигналу на її вході запам'ятовує сумарне значення вихідного сигналу. До двигуна буде подаватися ЕЕ і технологічний процес буде продовжуватися.

Систему стабілізації, в якій помилка управління зводиться до нуля, називають астатической.

При пропорційно - інтегрально - диференціальному законі управління паралельно П, І, - ланкам включають дифференцирующее ланка (П - І Д - регулятор).

Вихідний сигнал диференціальної частини прямопропорціонален швидкості зміни сигналу помилки управління. Підсумовуючись з сигналами П, І частин регулятора, він додатково збільшує сигнал управління перетворювачем і кількість ЕЕ, що надходить до двигуна. Це сприяє зменшенню динамічної помилки управління, тобто різниці між необхідним і дійсним значенням регульованої величини під час перехідного режиму в системі.

Застосовуються системи стабілізації у випадках необхідності особливо точного підтримки будь-якого параметра техпроцесу, а також при регулюванні швидкості двигуна у великому діапазоні.

Для формування процесів пуску і гальмування система стабілізації може мати внутрішню зворотний зв'язок по моменту двигуна (ВОС на рис. 1.4).

Розімкнутий канал управління по основному впливі, що обурює зменшує помилку управління в статичних системах.

3. Стежать системи. Як і системи стабілізації побудовані по замкнутому принципом. Однак задає сигнал $q(t)$ в них змінюється за випадковим законом і дійсне значення регульованої величини $y(t)$ має повторювати (відстежувати) цей закон.

Застосовуються в технологічних машинах, які вимагають, щоб при повороті вхідного вала на будь-який кут вихідний вал «стежив» за вхідним і повертався на такий же кут.

Коли становище валів збігається $q(t) = y(t)$ і помилка управління дорівнює нулю. При зміні положення вхідного вала $q(t) \neq y(t)$. На вході АУУ з'являється сигнал помилки, перетворювач подає ЕЕ на двигун і вихідний вал обертатиметься до тих пір, поки не займе положення вхідного.

4. Системи програмного керування. Застосовуються в технологічних машинах, що мають кілька електроприводів. Ці приводу можуть бути побудовані як за розімкненим, так і по замкнутому принципом. Загальним для них є пристрій, що змінює задане значення регульованої величини кожного електроприводу за заздалегідь заданою програмою. При цьому двигуни окремих робочих органів автоматично запускаються, працюють із заданими

швидкостями або реверсують, а переміщаються робочі органи технологічної машини не заважають один одному.

5. Адаптивні системи. Застосовуються в тих випадках, коли система, побудована по замкнутому принципом, в результаті непередбачених змін впливів, що обурюють не здатна виконати свою функцію, наприклад, стабілізацію регульованої величини.

Для забезпечення адаптації (приспосованості) замкнутої системи в її склад вводять додатковий контур, основу якого складає обчислювальний пристрій. Воно контролює величину $q(t)$, $y(t)$, впливи $f_i(t)$, аналізує роботу системи стабілізації і визначає необхідні для адаптації зміни параметрів або структури АУУ.

МЕХАНІКА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Лекція 3.

2.1. Приведення моментів і сил опору, моментів інерції і інерційних мас

До механічної частини електроприводу відносяться обертається частина двигуна, механічне передавальний пристрій і робочий орган технологічної машини.

Врашаюча частина двигуна (якір або ротор) служить джерелом механічної енергії.

За допомогою МПУ здійснюється перетворення обертального руху двигуна в поступальний рух робочого органу ТМ або за рахунок зміни співвідношення швидкостей вхідного і вихідного валів МПУ узгоджуються швидкості обертання двигуна і робочого органу. Як МПУ можуть використовуватися циліндричні і черв'ячні редуктори, планетарна передача, пара гвинт - гайка, кривошипно-шатунная, рейкова, ремінна і ланцюгова передачі.

Робочий орган ТМ є споживачем механічної енергії, яку він перетворює в корисну роботу. До числа робочих органів можна віднести шпindel токарного

або свердлувального верстата, рушійну частину конвеєра, ківш екскаватора, кабіну ліфта, гвинт теплохода і ін.

Елементи механічної частини ЕП пов'язані один з одним і утворюють кінематичну ланцюг, кожен елемент якої має свою швидкість руху, характеризується моментом інерції або інерційною масою, а також сукупністю діючих на нього моментів або сил. Механічний рух будь-якого з елементів визначається другим законом Ньютона. Для елемента, що обертається навколо нерухомої осі рівняння руху має вигляд:

$$\sum \vec{M} = J \frac{d\omega}{dt},$$

де $\sum \vec{M}$ - векторна сума моментів, що діють на елемент;

J - момент інерції елемента;

$\frac{d\omega}{dt}$ - кутове прискорення обертового елемента.

Для поступально рухається елемента рівняння руху має вигляд:

$$\sum \vec{F} = m \frac{dv}{dt},$$

де $\sum \vec{F}$ - векторна сума сил, що діють на елемент;

m - інерційна маса елемента;

$\frac{dv}{dt}$ - лінійне прискорення поступально рухається елемента.

За допомогою цих рівнянь може бути враховано взаємодію будь-якого елемента з іншою частиною кінематичного ланцюга. Це зручно здійснювати шляхом приведення моментів і зусиль, а також моментів інерції і інерційних мас. В результаті цієї операції (приведення) реальна кінематична схема замінюється розрахункової, енергетично еквівалентною схемою, основу якої становить той елемент, рух якого розглядається. Як правило, цим елементом є вал двигуна M . Це дозволяє найбільш повно досліджувати характер руху електроприводу і режим його роботи. Знаючи параметри кінематичної схеми, можна визначити і вид руху робочого органу технологічної машини.

Приведення моментів опору від однієї осі обертання до іншої проводиться на підставі балансу потужності в системі.

В ході технологічної операції робочий орган, що обертається на своїй осі зі швидкістю ω_M і створює момент опору M_{CM} , споживає потужність $P_M = M_{CM}\omega_M$. Втрати потужності в МПУ враховуються розподілом величини P_M на к.к.д. передачі η_P . Цю потужність забезпечує двигун, що обертається зі швидкістю ω і розвиває момент M_C , рівний наведеним до осі обертання вала двигуна моменту опору M_{CM} . На підставі рівності потужностей отримаємо:

$$\frac{M_{CM}\omega_M}{\eta_P} = M_C\omega$$

Тоді вираз для визначення приведенного моменту опору M_C має вигляд:

$$M_C = \frac{M_{CM}\omega_M}{\eta_P\omega} = \frac{M_{CM}}{\eta_P i}$$

де $i = \frac{\omega}{\omega_M}$ - передавальне число МПУ.

Приведення сил опору проводиться аналогічно. Якщо швидкість поступального руху робочого органу ТМ дорівнює v_M і в ході технологічної операції створюється сила опору F_{CM} , то з урахуванням к.к.д. МПУ рівняння балансу потужностей матиме вигляд:

$$\frac{F_{CM}v_M}{\eta_P} = M_C\omega$$

Наведений момент опору M_C буде дорівнює:

$$M_C = \frac{F_{CM}v_M}{\eta_P\omega} = \frac{F_{CM}}{\eta_P\rho}$$

де $\rho = \frac{\omega}{v_M}$ - радіус приведення МПУ.

Кожен з елементів, що обертаються кінематичної схеми характеризується моментом інерції J_i . Приведення моментів інерції до однієї осі обертання засноване на тому, що сумарний запас кінетичної енергії рухомих частин приводу, віднесений до однієї осі, залишається незмінним. При наявності обертових частин, що володіють моментами інерції $J_D, J_1, J_2, \dots, J_n$ і кутовими

швидкостями $\omega, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ можна замінити їх динамічна дія дією одного елемента, що володіє моментом інерції J і обертового зі швидкістю ω .

В такому випадку можна записати рівняння балансу кінетичної енергії:

$$J \frac{\omega^2}{2} = J_0 \frac{\omega^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + \dots + J_n \frac{\omega_n^2}{2} .$$

Сумарний момент інерції, приведений до валу двигуна буде дорівнює:

$$J = J_0 + J_1 \left(\frac{\omega_1}{\omega} \right)^2 + J_2 \left(\frac{\omega_2}{\omega} \right)^2 + \dots + \left(J_n \frac{\omega_n^2}{\omega^2} \right) ,$$

де J_0 - момент інерції ротора (якоря) M ;

J_1, J_2, \dots, J_n - моменти інерції інших елементів кінематичної схеми.

Приведення інерційних мас m , що рухаються поступально, здійснюється також на підставі рівності кінетичної енергії:

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

звідси момент інерції, приведений до валу двигуна буде дорівнює:

$$J = m \left(\frac{v}{\omega} \right)^2 .$$

В результаті виконання операцій приведення реальна кінематична схема замінюється розрахункової, енергетично еквівалентною схемою. Вона являє собою тіло, що обертається на нерухомій осі. Цією віссю є вісь обертання валу двигуна. На нього діють крутний момент двигуна M і приведений момент опору M_c . Обертається тіло зі швидкістю двигуна ω і володіє наведеним моментом інерції J .

В теорії електроприводу така розрахункова схема отримала назву одномасової механічної системи. Вона відповідає механічній частини АЕП з абсолютно жорсткими елементами і без зазорів.

Лекція 4.

2.2. Рівняння руху електроприводу

Рівняння руху одномасової механічної системи в теорії електроприводу отримала назву рівняння руху електроприводу.

У загальній формі записи воно має вигляд:

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

де $\frac{d\omega}{dt}$ - кутове прискорення одномасової системи.

У рівнянні руху «+» ставиться в тому випадку, коли напрямок M або M_c збігається з напрямком швидкості обертання ω , а знак «-», коли вони спрямовані протилежно.

Знак «+» перед M відповідає руховому режиму роботи електричного приводу: двигун перетворює EE в ME , розвиває крутний момент M і обертає одномасову систему в напрямку крутного моменту.

Знак «-» перед M відповідає режиму електричного гальмування. Для перекладу в цей режим працює електроприводу схема його включення або її параметри змінюється таким чином, що змінюється на протилежний зміст крутного моменту M . А., оскільки напрямок обертання зберігається під дією інерційних сил, крутний момент двигуна починає гальмувати рух одномасової системи. Двигун переходить у генераторний режим роботи. Він забирає запасені в механічній частини приводу ME , знижуючи тим самим швидкість обертання, перетворює її в EE і або повертає EE в мережу, або вона витрачається на нагрів двигуна.

Знак «+» перед M_c говорить про те, що M_c сприяє обертанню.

Знак «-» говорить про те, що перешкоджає.

Всі моменти опору можна розділити на дві категорії: 1 реактивні M_c ; 2 - активні або потенційні M_c .

В першу категорію входять моменти опору, поява яких пов'язана з необхідністю долати тертя. Вони завжди перешкоджають руху електроприводу і змінюють свій знак при зміні напрямку обертання.

До другої категорії входять моменти від сили тяжіння, а також від розтягування, стиснення або скручування пружних тіл. Вони пов'язані зі зміною потенційної енергії окремих елементів кінематичної схеми. Тому вони можуть

як перешкоджати, так і сприяти руху, не змінюючи свого знака при зміні напрямку обертання.

Права частина рівняння руху носить назву динамічного моменту M_d і проявляється тільки під час перехідних режимів. При $M_d > 0$ і $\frac{d\omega}{dt} > 0$, тобто має місце прискорення механічної частини приводу. При $M_d < 0$ і $\frac{d\omega}{dt} < 0$ має місце уповільнення. При $M = M_c$, $M_d = 0$ і $\frac{d\omega}{dt} = 0$ тобто в даному випадку привід працює в сталому режимі, тобто механічна частина обертається з постійною швидкістю.

На прикладі електроприводу підйомної лебідки можна розглянути всі чотири форми запису рівняння руху електроприводу.

В першому випадку електропривод включений в напрямку підйому вантажу. Двигун працює в руховому режимі. Вантаж, підвішений на гаку, створює момент опору, що перешкоджає обертанню. Тоді рівняння руху буде мати вигляд:

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

У другому випадку в кінці підйому вантажу двигун переводиться в режим електричного гальмування і його момент, як і момент опору, буде перешкоджати обертанню. Рівняння руху в цьому випадку має вигляд:

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

У третьому випадку електропривод включений в напрямку опускання вантажу, тобто двигун працює в руховому режимі. Оскільки момент опору, який створюється піднятим вантажем, є активним, то при опусканні вантажу він буде не перешкоджати, а сприяти обертанню. Рівняння руху має вигляд:

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

У четвертому випадку в кінці опускання вантажу двигун знову переводиться в режим електричного гальмування, а момент опору продовжує обертати двигун в напрямку спуску. У цьому випадку рівняння руху має вигляд:

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

При прискоренні чи уповільненні електропривод працює в перехідному режимі, вид якого повністю визначається законом зміни динамічного моменту M_d . Останній, будучи функцією крутного моменту M і моменту опору M_c , може залежати від швидкості, часу або положення робочого органу ТМ.

При дослідженні перехідного режиму знаходять залежності $M(t)$, $\omega(t)$ а також тривалість перехідного режиму. Останнє становить особливий інтерес, тому що час прискорення і уповільнення можуть істотно впливати на продуктивність механізму.

Визначення часу роботи електроприводу в перехідному режимі засноване на інтегруванні рівняння руху електроприводу.

Для режиму пуску, коли має місце прискорення приводу, рівняння руху електроприводу має вигляд:

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

Розділивши змінні рівняння, отримаємо:

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

Тоді час, необхідне для збільшення швидкості від ω_1 до ω_2 , $t_{1,2}$ можна знайти, проінтегрувавши останні рівняння:

$$t_{1,2} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} J \frac{d\omega}{M - M_c} .$$

Для вирішення цього інтеграла необхідно знати залежності моментів двигуна і механізму від швидкості. Такі залежності $\omega = f(M)$ і $\omega = f(M_c)$ називаються механічними характеристиками відповідно двигуна і технологічної машини.

Механічну характеристику всіх ТМ можна розділити на чотири категорії: 1 величина M_c не залежить від швидкості. Такий характеристикою володіють

підйомні механізми, конвеєри з постійною масою переміщуваного матеріалу, а також всі механізми, у яких основним моментом опору є момент тертя; 2 - M_c лінійно зростає з ростом швидкості. Таку характеристику має генератор постійного струму з незалежним збудженням; 3 - M_c нелінійно зростає з ростом навантаження. Таку характеристику має вентилятор, гребний гвинт корабля, відцентровий насос; 4 - M_c нелінійно спадає зі збільшенням швидкості. Такий характеристикою володіють деякі металорізальні верстати.

Механічні характеристики двигунів докладно будуть розглядатися в подальшому. Однак, якщо пуск двигуна відбувається в системі зі зворотним зв'язком по моменту, то момент двигуна не залежить від швидкості.

Прийнявши M і M_c незалежними від швидкості величинами, отримуємо простий випадок рішення інтеграла. Величина часу розгону $t_{1,2}$ буде дорівнює:

$$t_{1,2} = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{M - M_c} .$$

Для режиму електричного гальмування, коли має місце уповільнення приводу, рівняння руху має вигляд:

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

Розділивши змінні, отримаємо:

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

Час, необхідний для зменшення швидкості від ω_2 до ω_1 $t_{2,1}$, дорівнюватиме:

$$t_{2,1} = \int_{\omega_2}^{\omega_1} J \frac{d\omega}{-(M + M_c)} .$$

Знак «-» з підінтегрального виразу можна прибрати, помінявши місцями межі інтегрування. отримаємо:

$$t_{2,1} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} J \frac{d\omega}{M + M_c} .$$

При $M = \text{const}$, $M_c = \text{const}$ час гальмування дорівнюватиме:

$$t_{2,1} = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{M + M_C}.$$

Якщо величини M і M_C знаходяться в складній залежності від швидкості, то рівняння руху аналітично не наважується. Необхідно використовувати наближені методи рішення.

Лекція 5.

2.3. Механічні характеристики двигунів постійного струму незалежного збудження. руховий режим

Електричний двигун, на відміну від двигунів інших типів, здатний сам автоматично розганятися до швидкості усталеного режиму роботи, знижувати швидкість при збільшенні моменту опору і з усталеного режиму з більшою швидкістю переходити в усталений режим з меншою швидкістю, збільшувати швидкість при зменшенні моменту опору і переходити з усталеного режиму з меншою швидкістю до сталого режиму з більшою швидкістю. Ця особливість електричного двигуна пояснюється тим, що між швидкістю обертання і обертовим моментом двигуна існує залежність $\omega = f(M)$, відповідно до якої зі збільшенням моменту швидкість зменшується і навпаки. Називають цю залежність механічною характеристикою двигуна.

За допомогою механічної характеристики можна визначити основні властивості електричного двигуна і перевірити їх відповідність вимогам технологічної машини.

Осі абсцис і ординат, за якими відкладаються відповідно величини M і ω , поділяють площину на чотири квадрати. Перший номер прийнято привласнювати верхньому правому квадрату, а решта нумерувати проти годинникової стрілки.

У першому квадраті знаки M і ω , а значить і напрямки величин, збігається. Тому в ньому розташовуються механічні характеристики для рухового режиму роботи електричної машини. Аналогічні характеристики для

протилежного напрямку обертання розташовуються і в третьому квадранті, так як знаки M і ω негативні.

У другому квадраті швидкість ω позитивна, а момент M має негативний знак. Тому в ньому розташовуються механічні характеристики, відповідні режиму електричного гальмування, коли під дією інерційних сил напрямок обертання зберігається, а напрямок моменту за рахунок зміни схеми включення двигуна змінюється на протилежне. Аналогічні характеристики для протилежного напрямку обертання розташовуються і в четвертому квадранті, так як в ньому ω має негативний знак, а M - позитивний.

Схема включення двигуна постійного струму (ДПС) з незалежним збудженням приведена на рис. 2.1.

Якір двигуна і обмотка збудження LM отримує харчування від незалежних джерел напруги U і U_B . Тому струм в обмотці збудження I_B не залежить від струму якоря I_A . Потужність джерела U_B не перевищує 15% від потужності джерела U .

При обертовому якорі в його обмотці наводиться е.р.с. обертання E . На схемі включення двигуна напрямок E зустрічно по відношенню до напрямку U , що відповідає руховому режиму роботи. Величина E дорівнює:

$$E = k\Phi \omega,$$

де ω - кутова швидкість двигуна;

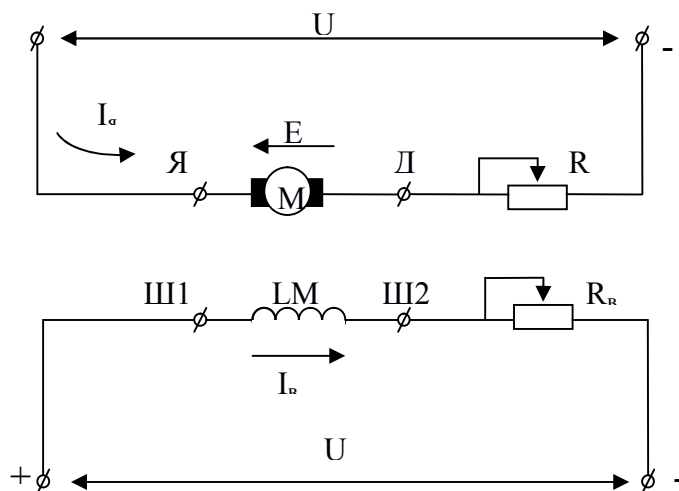


Рис. 2.1 - Схема включення двигуна постійного струму з незалежним збудженням

Φ -поток двигуна;

$\kappa = \frac{pN}{2\pi a}$ - конструктивний коефіцієнт двигуна, дані, для розрахунку якого

наводяться в довідниках.

Тут p - число пар полюсів двигуна; N - число активних провідників обмотки якоря; a - число пар паралельних гілок обмотки якоря.

Напрямок якірного струму $I_{я}$, як і напрямок E , на схемі включення показано для рухового режиму роботи.

Допустиме значення якірного струму двигуна $I_{я.доп.}$ обмежується умовами комутації і механічною міцністю якоря і не повинно перевищувати номінальний струм $I_{я.н.}$ більш ніж в 2,5 рази - $I_{я.доп.} \leq 2,5 \cdot I_{я.н.}$..

Відповідно до рівняння рівноваги напруг при сталому режимі роботи двигуна напруга U , прикладена до якірного ланцюга двигуна, врівноважується падінням напруги в якірного ланцюга ІЯРЯЦ і наведеної в обмотці якоря е.р.с. обертання E :

$$U = I_{я} R_{яц} + E ,$$

де $R_{яц} = R_{я} + R_{дп} + R_{ко} + R_{п}$ - сумарний опір якірного ланцюга.

Тут $R_{я}$ - опір обмотки якоря; $R_{дп}$ - опір обмотки додаткових полюсів; $R_{ко}$ - опір компенсаційної обмотки; $R_{п}$ - опір пускового реостата.

Величина $I_{я}$ в сталому режимі буде дорівнює:

$$I_{я} = \frac{U - E}{R_{яц}} .$$

У режимі пуску $E = 0$, тому через невеликого опору обмоток пусковий струм $I_{яп}$ може перевищувати допустиме значення. Для обмеження пускового струму служить пусковий реостат, опір якого $R_{п}$ вибирається таким чином, щоб $I_{яп} \leq I_{я.доп.}$..

$$I_{яп} = \frac{U}{R_{я} + R_{дп} + R_{ко} + R_{п}} \leq 2,5 I_{я.н.} .$$

У ланцюзі харчування ЛМ включений реостат з опором R_B . З його допомогою зменшується струм в обмотці збудження. В результаті потік двигуна Φ послаблюється, стаючи менше номінального значення $\Phi \leq \Phi_n$.

З рівняння рівноваги напруг для якірного ланцюга можна отримати аналітичний вираз для механічної характеристики двигуна.

Підставивши в нього замість е.р.с. обертання E , її значення і вирішивши отримане рівняння щодо швидкості, отримаємо залежність швидкості двигуна ω від струму якоря $I_a \omega = f(I_a)$, яка називається електромеханічної характеристикою:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I_a R_{яц}}{k\Phi} .$$

Момент, що обертає двигуна M пов'язаний зі струмом якоря і магнітним потоком залежністю $M = k\Phi I_a$. Підставивши в рівняння електромеханічної характеристики значення для струму $I_a = M / k\Phi$, отримаємо вираз для механічної характеристики $\omega = f(M)$:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR_{яц}}{k^2 \Phi^2} \quad \text{або} \quad \omega = \frac{U}{c} - \frac{MR_{яц}}{c^2} ,$$

де $c = k\Phi$ - коефіцієнт, який приймається постійним і не залежним від струму якоря, якщо у двигуна є компенсаційна обмотка або якщо реакцію якоря не враховувати.

При незмінних параметрах U , Φ , $R_{яц}$ рівняння механічної характеристики є рівняння прямої лінії.

У режимі ідеального холостого ходу $M_c = 0$ і $M = 0$, оскільки в сталому режимі двигун працює з $M = M_c$. тоді

$$\omega = \omega_0 = \frac{U}{k\Phi} ,$$

де ω_0 -швидкість ідеального холостого ходу.

При збільшенні моменту опору швидкість усталеного режиму зменшується на величину статичного падіння швидкості $\Delta\omega_c$, що дорівнює:

$$\Delta\omega_c = \frac{MR_{яц}}{k^2 \Phi^2} .$$

Таким чином, рівняння для механічної характеристики двигуна можна записати в наступному вигляді:

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

Механічна характеристика двигуна, яка виходить при відсутності зовнішніх опорів в якірного ланцюга ($R_{п} = 0$) і номінальних значеннях потоку

двигуна ($\Phi = \Phi_H$) і напруги на якорі ($U = U_H$) називається природною характеристикою. Слід зазначити, що виконання двох перших умов не викликає труднощів. Третя умова ($U = U_H$) виконується в тому випадку, якщо якорний ланцюг двигуна живиться від джерела нескінченної потужності або в замкнутій системі перетворювач-двигун зі зворотним зв'язком по напрузі перетворювача і астатическим регулятором напруги.

Побудувати природну характеристику, враховуючи її лінійність, можна за двома точками - точці ідеального холостого ходу з координатами ($M = 0$; $\omega = \omega_0$) і точці, що відповідає номінальному режиму роботи ($M = M_H$; $\omega = \omega_H$). На підставі паспортних даних двигуна (P_H, U_H, I_H, n_H) можна знайти:

$$\omega_H = \frac{2\pi n_H}{60}; M_H = \frac{P_H}{\omega_H}; \omega_0 = \frac{U_H}{k\Phi_H}.$$

Природна характеристика приведена на рис. 2.2.

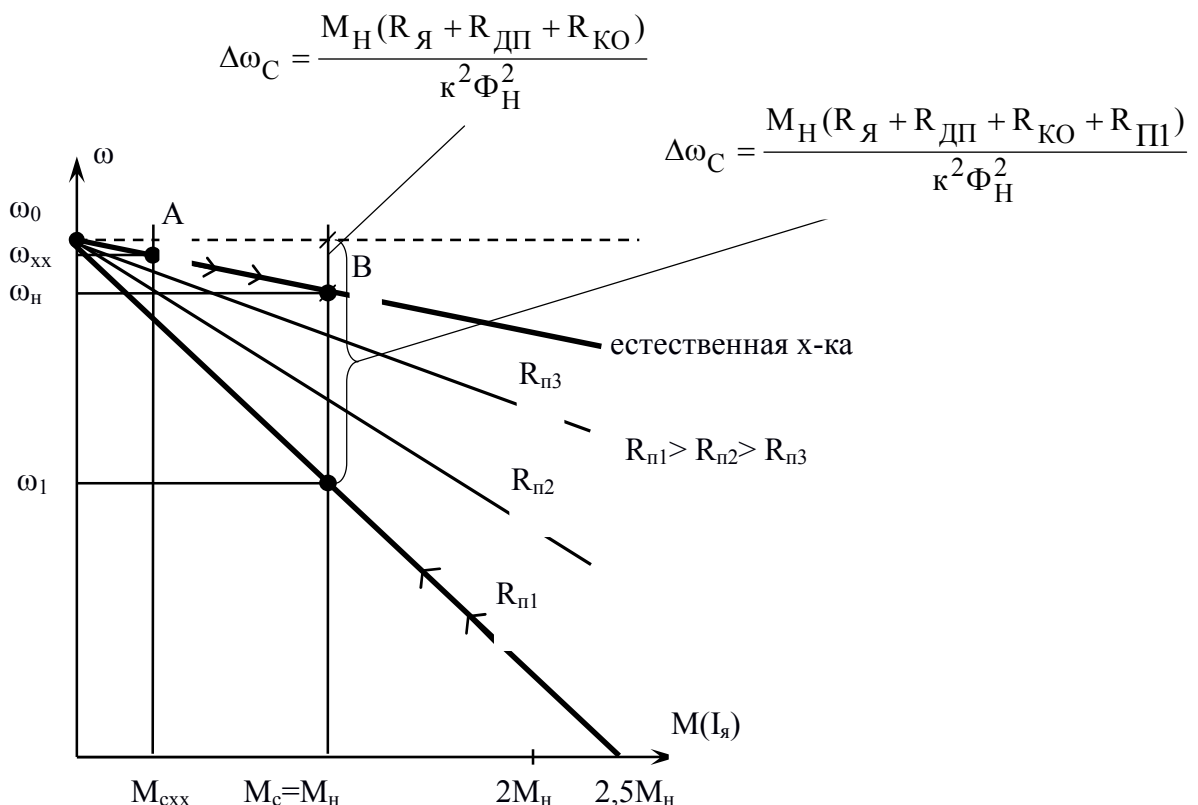


Рис. 2.2 - Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження.

При швидкості двигуна струм $\omega = \omega_0$ ІЯ = 0, так як е.р.с. обертання $E = U$ і спрямована по відношенню до нього зустрічно. Працювати в руховому режимі зі швидкістю $\omega = \omega_0$ двигун не може, так як навіть при відсутності навантаження з боку технологічної машини тертя в підшипниках і крильчатка вентилятора створюють момент опору холостого ходу $M_{схх}$. Двигун в сталому режимі буде працювати з $M = M_{схх}$ і $\omega = \omega_{хх} < \omega_0$. При цьому $E < U$, а $I_{я} > 0$.

Знайти величину $\omega_{хх}$ можна, зобразивши в одному квадраті з механічною характеристикою двигуна механічну характеристику технологічної машини. Якщо припустити, що M_c не залежить від швидкості, то через точку з координатами $(\omega = 0; M = M_{схх})$ необхідно провести вертикальну пряму до її перетину з механічною характеристикою двигуна (точка А). У точці А $M = M_c$, а її проекція на вісь ординат дорівнює $\omega_{хх}$.

При збільшенні моменту опору від $M_{схх}$ до $M_c = M_n$ з'явиться негативний динамічний момент $M_D < 0$ і швидкість двигуна почне зменшуватися. Наслідком цього буде зменшення е.р.с. обертання $E = k\omega\Phi$, збільшення якірного струму $I_{я} = (U - E) / R_{яц}$ і крутного моменту $M = kI_{я}\Phi$. Зниження швидкості і збільшення моменту двигуна триватиме до тих пір, поки M_D не стане рівним нулю, тобто момент двигуна M_D не стане рівним $M_c = M_n$..

Завдяки тому, що в обмотці якоря наводиться е.р.с. обертання E , двигун при збільшенні M_c автоматично, знизивши швидкість обертання і збільшивши крутний момент, перейшов з усталеного режиму з більшою швидкістю ($\omega_{х.х.}$ в точці А) в усталений режим з меншою швидкістю (ω_n в точці В).

Статично падіння швидкості на природній характеристиці одно:

$$\Delta\omega_c = \frac{M_n(R_{я} + R_{дп} + R_{ко})}{k^2\Phi_n^2} .$$

Якщо опір пускового реостата $R_{п} > 0$, то $\Delta\omega_c$ при одному і тому ж моменті двигуна буде більше, ніж на природній характеристиці:

$$\Delta\omega_c = \frac{M_n(R_{я} + R_{дп} + R_{ко} + R_{п})}{k^2\Phi_n^2} .$$

Оскільки величина ω_0 не залежить від величини РП, то одержувана в цьому випадку характеристика, яка називається штучної або реостатній, буде починатися в тій же точці, що і природна, але проходити з великим нахилом до осі абсцис.

Якірний струм I я і момент двигуна M пов'язані прямою пропорційною залежністю. Тому обмеження за допомогою R_p пускового струму значенням $I_{я.доп.} \leq 2,5 I_{ян}$ автоматично обмежує і допустиме значення пускового моменту $M_{доп} \leq 2,5 M_n$. Механічна характеристика на рис. 2.2 в цьому випадку перетинає вісь абсцис в точці з координатами ($\omega = 0$; $M = M_{доп} = 2,5 M_n$) і називається граничною пусковий. Реостатні характеристики, розташовані вище виходять при менших величинах РП. Запускаючись при $M_c = M_n$ по граничній пусковий характеристиці, двигун розженеться до швидкості ω_1 і перейде в усталений режим роботи. Для збільшення швидкості двигуна необхідно зменшити величину РП.

Лекція 6.

Механічні характеристики двигуна постійного струму з незалежним збудженням. Режим електричного гальмування

Для підвищення продуктивності технологічної машини або поліпшення якості продукції часто необхідно швидко і точно зупинити електропривод. На початку процесу гальмування, по-перше, закінчується перетворення ЕЕ в МЕ і подача її до робочого органу технологічної машини і, по-друге, починається відбір МЕ, запасеної в механічній частині приводу. Залежно від того, куди витрачається ця енергія, можна виділити три способи гальмування.

Гальмування в режимі вільного вибігу- збережена МЕ витрачається на подолання сил опору. Рух робочого органу може тривати ще досить довго.

механічне гальмування- збережена МЕ в механічному гальмівному пристрої перетворюється в теплову. Час гальмування може бути дуже

невеликим, але при цьому плавність гальмування регулюється погано, що призводить до появи значних динамічних навантажень.

Електричне гальмування- збережена МЕ, завдяки властивості оборотності електричної машини, перетворюється двигуном в ЕЕ і або віддається в мережу, або витрачається на нагрів двигуна. Керуючи процесом перетворення ЕЕ в МЕ можна забезпечувати плавне гальмування і обмежувати величину динамічних навантажень.

Існує три способи електричного гальмування: гальмування з віддачею енергії в мережу (рекуперативного гальмування), динамічне гальмування та гальмування противовключенням.

Рекуперативне гальмування можливо в тому випадку, коли швидкість двигуна буде вищою швидкості ідеального холостого ходу $\omega > \omega_0$ і е.р.с. обертання стає більше напруги якійного джерела $E > U$.

У приводі підйомної лебідки рекуперативного гальмування використовується при опусканні піднятого вантажу, який створює активний M_c . Двигун включається в напрямку опускання вантажу і в цьому ж напрямку його розкручує момент опору. Тому рівняння руху електроприводу матиме вигляд:

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

Оскільки $M_D > 0$, швидкість обертання двигуна буде збільшуватися. Зі збільшенням ω , буде збільшуватися е.р.с. $E = k\omega\Phi$ і, як наслідок, будуть зменшуватися якійний струм $I_{я} = (U - E) / R_{яц}$ і момент $M = kI_{я}\Phi$.

При $\omega = \omega_0$ E дорівнюватиме U , а тому вони спрямовані зустрічно, то $I_{я} = 0$ і $M = 0$. Рівняння руху в цьому випадку набуде вигляду:

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

Момент динамічний залишається позитивним $M_D > 0$ і під дію активного M_c швидкість обертання двигуна буде збільшуватися.

При $\omega > \omega_0$ E побільшає U і струм $I_{я}$ змінить свій напрям.

$$I_{я} = \frac{U - E}{R_{яц}} = \frac{-(E - U)}{R_{яц}}.$$

Отже, змінює напрямок і стає гальмівним момент двигуна $M = -k\Phi I_A$. Рівняння руху набуває вигляду:

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

Коли абсолютне значення $|M|$ досягне величини M_c , момент динамічний стане рівним нулю $M_D = 0$ і збільшення швидкості обертання двигуна і опускання вантажу припиниться.

Якщо характеристики двигуна при підйомі вантажу розташовуються в першому квадраті, то при опусканні для рухового режиму вони будуть розташовуватися в третьому квадраті, а для режиму електричного гальмування - в четвертому.

Рівняння механічної характеристики в режимі рекуперативного гальмування буде мати вигляд:

$$-\omega = -\left(\frac{U}{k\Phi} + \frac{M \square R_{яв}}{k^2 \Phi^2} \right)$$

Характеристика проходить через точку $-\omega_0 = -U / K\Phi$. Нахил її визначається співмножником другого доданка $R_{яв} / k^2\Phi^2$, який за абсолютним значенням при заданому опорі $R_{яв}$ залишається незмінним. Отже, нахил механічної характеристики буде таким же, як і в руховому режимі, і вона є продовженням характеристик для рухового режиму з III квадрата в IV. Характеристики наведені на рис. 2.3.

При роботі двигуна на природній характеристиці збільшення швидкості опускання вантажу припиниться при швидкості $(-\omega_1)$, а на реостатній - $(-\omega_2)$.

У режимі рекуперативного гальмування двигун працює як генератор, включений паралельно з мережею. Він перетворює МЕ в ЕЕ і віддає її в мережу.

Динамічне гальмування. Для перекладу працюючого двигуна в режим динамічного гальмування якірний ланцюг відключається від джерела якірного напруги і на затискачі якоря підключається реостат динамічного гальмування РДТ. Схема включення двигуна наведена на рис.2.4.

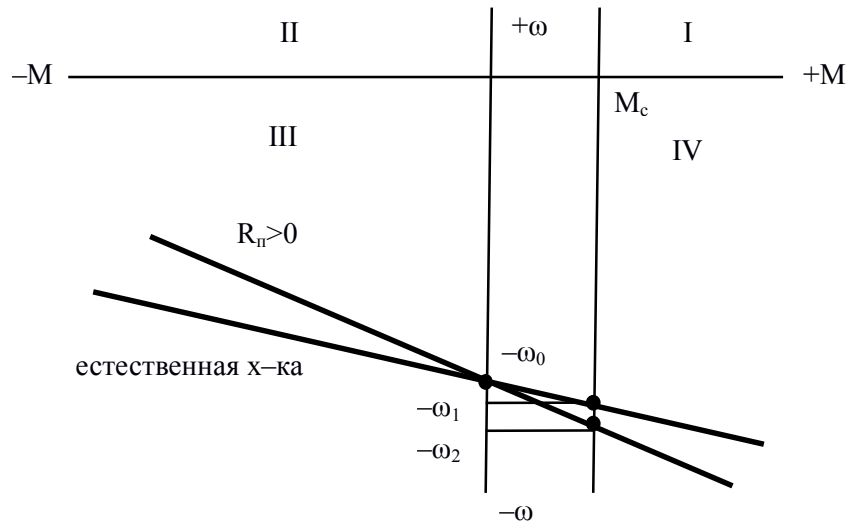


Рис. 2.3 - Характеристики двигуна постійного струму з незалежним збудженням в режимі рекуперативного гальмування.

Під дією інерційних сил якір продовжує обертатися в колишньому напрямі, а полярність напруги U_b , що прикладається до обмотці збудження, не змінюється. Отже, зберігає свій напрямок е.р.с. обертання E . У утворився контурі струм I я буде протікати під дією E . Оскільки E направлено зустрічно U , то і напрямок струму по відношенню до рухового режиму зміниться на протилежне:

$$I_{\text{ядт}} = - \frac{E}{R_{\text{я}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{ко}} + R_{\text{дт}}} .$$

Момент двигуна стає гальмівним $M = -k\Phi I$. Оскільки $U = 0$, рівняння механічної характеристики двигуна в режимі динамічного гальмування має вигляд:

$$\omega = - \frac{MR_{\text{яц}}}{k^2 \Phi^2} .$$

Механічні характеристики двигуна в режимі динамічного гальмування наведені на рис. 2.4б. Вони представляють розташовані у другому квадраті прямі лінії, що проходять через початок координат.

Двигун, який працював в точці А на природній характеристиці, в залежності від величини РДТ перейде в точку В або С на характеристиці динамічного гальмування. Зі зменшенням швидкості двигуна ω будуть

зменшуватися E , $I_{ЯДТ}$ і гальмівний момент двигуна M . При $\omega = 0$ дорівнюватимуть нулю E , $I_{ЯДТ}$, M , тому характеристика динамічного гальмування і проходить через початок координат.

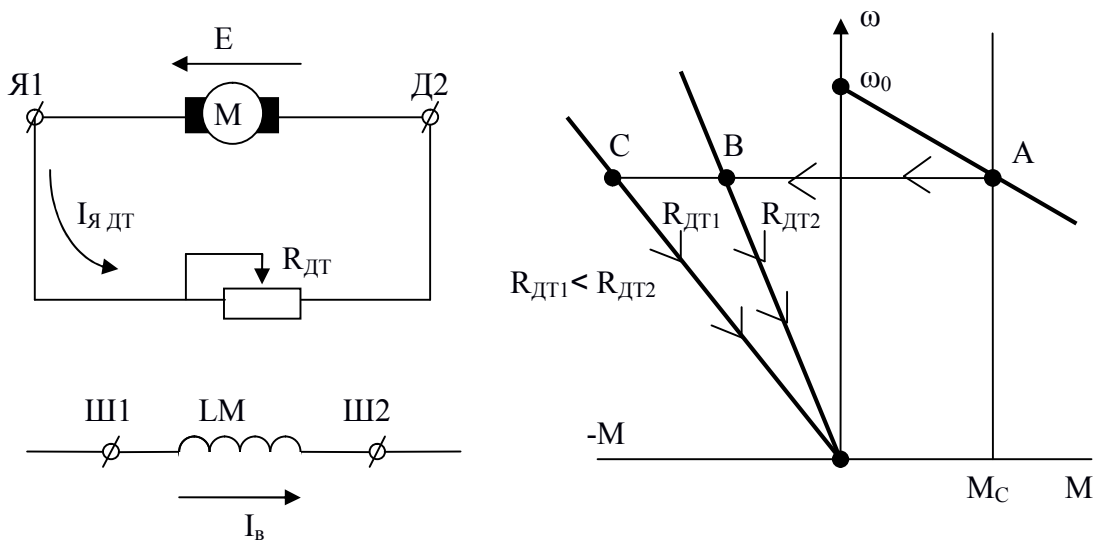


Рис. 2.4 - а) схема включення двигуна в режимі динамічного гальмування;
 б) характеристики двигуна в режимі динамічного гальмування.

Двигун в режимі динамічного гальмування працює як автономний генератор. Він перетворює ME в EE , яка виділяється у вигляді тепла на опорах, включених в ланцюг протікання $I_{ЯДТ}$.

Динамічне гальмування використовується для зупинки електроприводу при реактивному M с, при опусканні вантажу в підйомних механізмах.

Гальмування противключением. Здійснюється в тому випадку, коли обмотки двигуна включені для одного напрямку обертання, а обертається частина двигуна під впливом сил інерції або активного моменту опору M_c обертається в протилежну сторону - проти включення.

Найбільш часто гальмування противключением використовується в реверсивних електроприводах, так як реверсу двигун обов'язково передус

процес гальмування. Реверсивна схема включення ДПС з незалежним збудженням приведена на рис. 2.5. Реверс здійснюється з боку якоря двигуна, для чого якір включений в реверсивний міст, утворений головними контактами контакторів напрямку обертання КВ («вперед» в електроприводах пересування або «верх» в електроприводах підйому) і КН («назад» і «низ» відповідно). При реверсі з боку обмотки збудження вона включається в реверсивний міст, утворений контактами електричних апаратів меншого габариту, так як споживана по ланцюгу харчування обмотки збудження потужність не перевищує 15% потужності, споживаної по ланцюгу харчування якоря. Однак реверс з боку якоря здійснюється набагато швидше,

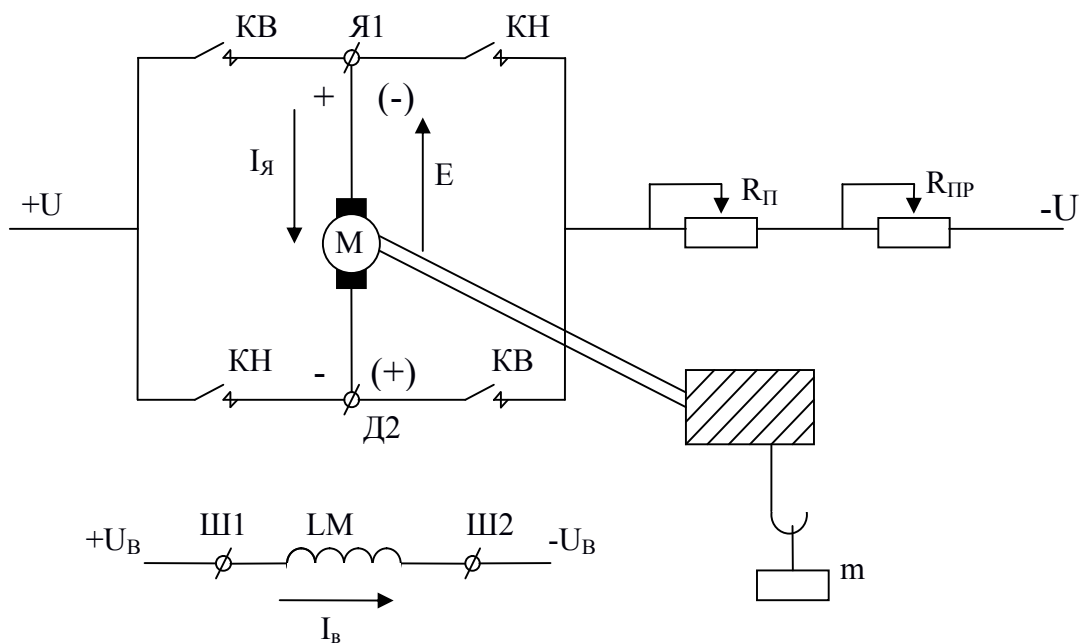


Рис 2.5 - Реверсивна схема включення ДПС з незалежним збудженням

У ланцюг протікання струму $I_{я}$ включені пусковий реостат з опором $R_{П}$ і реостат противовключення $R_{ПР}$. Така схема включення двигуна може бути в електроприводі підйомної лебідки, на гаку якої підвішений вантаж масою m .

Припустимо, що замкнуті контакти КВ, а РП і Рпр зашунтовані, тобто їх опору дорівнюють нулю. Затиск якоря Я1 підключений до + U, а Д2 до - U джерела якірного напруги. Струм в якорі Ія протікає від Я1 до Д2, а е.р.с. обертання Е направлено у зворотний бік, тобто від Д2 до Я1.

Розмикаються контакти КВ і замикаються КН. Якір двигуна підключається до джерела якірного напруги з зворотною полярністю. Це означає, що двигун включається для роботи в протилежному напрямку. У момент перемикання якір двигуна під дією інерційних сил зберігає напрямок обертання, тобто обертається проти включення. Залишається незмінним і напрямок струму в обмотці збудження LM. Тому зберігається і напрямок е.р.с. обертання $E = k\omega\Phi$.

Зі зміною полярності напруги на затискачах якоря змінює напрямок струм якоря і тому момент двигуна стає гальмівним. Так як величина Е в сталому режимі роботи двигуна становить близько 90% від величини U, то в момент перемикання напруги на затискачах якоря $U \approx 2U_n$ і струм на початку режиму гальмування противовключенням Ія ПР буде істотно перевищувати пусковий струм ІЯП. Тому для його обмеження, а також обмеження моменту двигуна, одночасно з замикачем КН в ланцюг якоря крім пускового реостата Рп необхідно включати і реостат противовключення Рпр. Опір реостата R пр має бути таким, щоб $I_{я ПР} \leq 2,5 I_{ян}$. Тоді струм І я ПР буде визначатися за формулою:

$$I_{я ПР} = \frac{-(U+E)}{R_{я} + R_{ДП} + R_{КО} + R_{Л} + R_{ПР}} \leq 2,5 I_{ян} .$$

Характеристики ДПС з незалежним збудженням, відповідні схемою включення двигуна на рис. 2.5, наведені на рис. 2.6. Оскільки схема включення двигуна реверсивна, характеристики розташовані в чотирьох квадрантах. При замкнутих контактах КВ і зашунтувати РП і Рпр двигун працює на природній характеристиці в першому квадраті в точці А.

У момент перемикання змінюється полярність напруги на затискачах якоря двигуна і він виявляється включеним для роботи в напрямку «назад».

Тому його характеристики будуть починатися в третьому квадранті в точці з координатами $(0; -\omega_0)$.

Змінюється напрямок струму якоря I_a і крутного моменту двигуна M . Однак швидкість двигуна ω залишається незмінною, так як постійна часу електромагнітного перехідного процесу набагато менше постійної часу електромеханічного перехідного процесу. Тому двигун з точки А переходить в точку В на характеристиці противовключення у другому квадраті по прямій, паралельній осі абсцис. Якщо величина $R_{пр}$ обрана правильно, то кидок струму якоря і гальмівного моменту при перемиканні не перевищать допустимого значення.

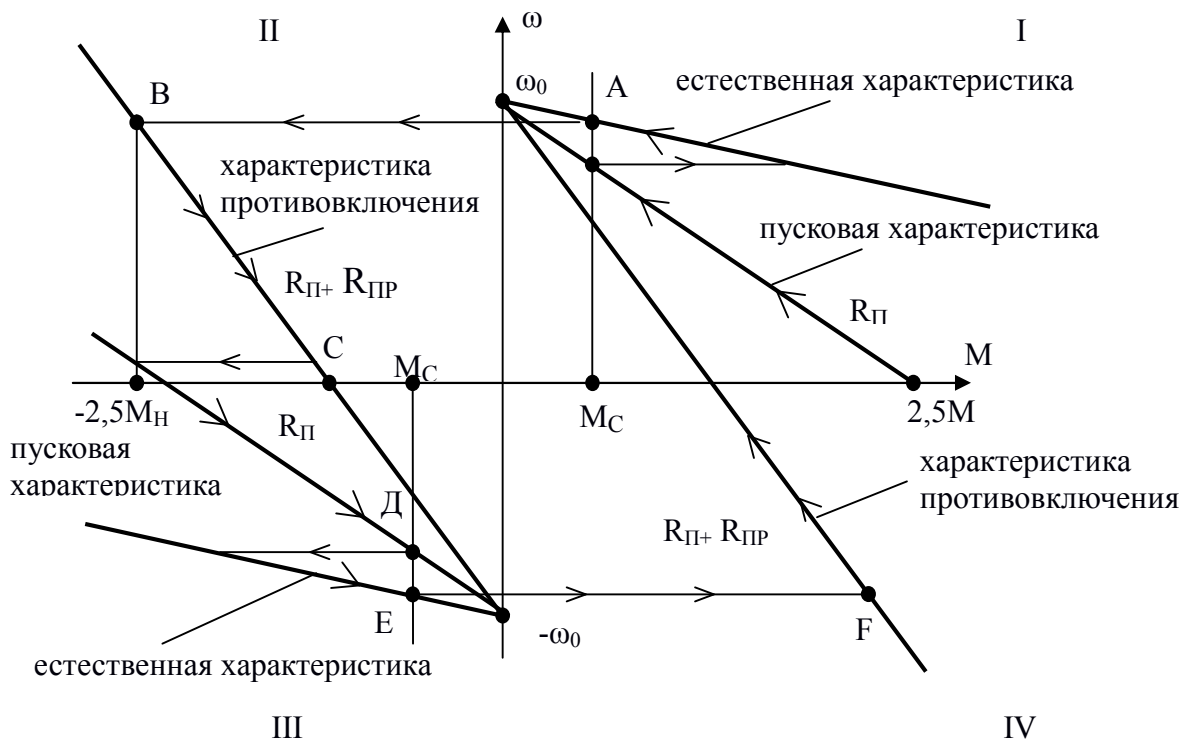


Рис. 2.6 - Характеристики ДПС з незалежним збудженням в режимі гальмування противовключенням

Під впливом гальмівного моменту швидкість двигуна зменшується і якщо він гальмується для зупинки, то в точці С необхідно розімкнути КН і відключити двигун від напруги джерела. Якщо ж відразу після зупинки починається розгін в протилежному напрямку, то при швидкості близькою до

нуля необхідно зашунтувати $R_{пр}$ і перевести двигун на граничну пускову характеристику. Це забезпечить розгін в напрямку «назад» з максимальним прискоренням і дозволить зменшити час розгону. У третьому квадранті двигун буде працювати в точці Д на пусковій характеристиці або в точці Е на природній.

Якщо ще раз змінити полярність напруги на затискачах якоря двигуна і ввести в якірний ланцюг $R_{п}$ і $R_{пр}$, двигун перейде з точки Е в точку F на характеристиці противовключення в четвертому квадранті. Процес гальмування і розгін в напрямку «вперед» будуть протікати аналогічно.

В електроприводах з активним M_c , наприклад, в електроприводі підйомної лебідки, де активний M_c створює вантаж масою m , підвішений на гаку, режим гальмування противовключенням можна отримати за рахунок зміни механічної характеристики двигуна. Схема включення двигуна наведена на рис. 2.5, а відповідні схемою включення механічні характеристики двигуна наведені на рис. 2.7. Вони розташовуються в першому і четвертому квадратах, так як активний M_c не змінює свого напрямку при зміні напрямку обертання двигуна.

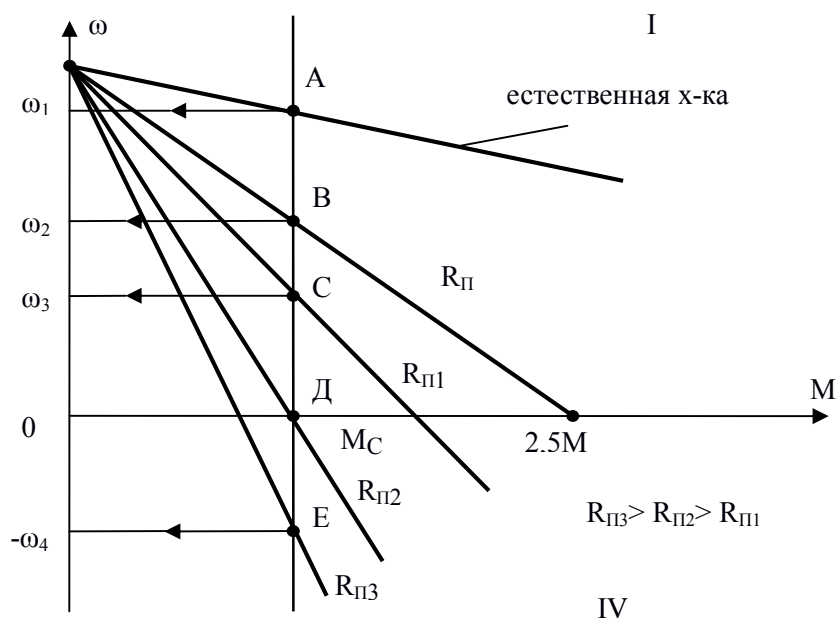


Рис. 2.7 - Характеристики ДПС з незалежним збудженням в режимі гальмування противовключенням при активному M_c

Припустимо, що замкнуті контакти КВ і зашунтовані РП і $R_{пр}$. Двигун зі швидкістю ω_1 працює в напрямку підйому на природній характеристиці в точці А.

При введенні в ланцюг струму якоря пускового реостата РП двигун перейде на граничну пускову характеристику і буде працювати в точці В зі швидкістю ω_2 . З введенням $R_{пр}$ нахил характеристики буде збільшуватися, а швидкість двигуна зменшуватися ($\omega = \omega_3$ при $R_{пр} = R_{ПР1}$).

Можна так підібрати величину $R_{пр}$, що M буде дорівнює M_c при швидкості двигуна ω , що дорівнює нулю. На рис. 2.7. цієї нагоди відповідає точка Д при $R_{пр} = R_{ПР2}$. Двигун зупиняється, і вантаж, що піднімається утримується в підвішеному стані за рахунок крутного моменту двигуна М. При

$R_{пр} = R_{ПР3}$ момент двигуна М стане менше M_c . Піднятий вантаж почне опускатися і двигун, включений для роботи на підйом, під дією активного М с буде обертатися в напрямку опускання - проти включення. Момент двигуна стає гальмівним. Оскільки якір двигуна тепер обертається в зворотну сторону, а напрямок магнітного потоку не змінилося, змінить свій напрямок е.р.с. обертання двигуна $E = k \Phi \omega$. Величина якірного струму $I_{я ПР}$ буде визначатися виразом:

$$I_{я ПР} = \frac{U + E}{R_{я} + R_{дп} + R_{ко} + R_{л} + R_{ПР3}}$$

Зі збільшенням швидкості опускання вантажу, будуть збільшуватися E , $I_{я ПР}$ і гальмівний момент двигуна М. При $\omega = -\omega_4$ (точка Е на рис. 2.7.) Величина гальмівного моменту двигуна М стане дорівнює величині активного M_c і збільшення швидкості опускання вантажу припиниться.

Такий режим гальмування широко використовується в електроприводах підйомних лебідок, так як він дозволяє отримати дуже низькі «посадкові» швидкості двигуна і встановлювати вантаж в необхідному місці без удару.

При гальмуванні противовключением е.р.с. обертання Е спрямована послідовно - погоджено з напругою якірного джерела U , тобто двигун працює в

режимі генератора, включеного послідовно з мережею. Він перетворює МЕ в ЕЕ, а також споживає ЕЕ з мережі. Вся ЕЕ виділяється у вигляді тепла в двигуні і на опорах, включених в ланцюзі протікання струму якоря. Тому гальмування противключением не економічно з точки зору витрат енергії, проте в порівнянні з іншими видами воно забезпечує мінімальний час гальмування.

Лекція 7.

Механічні характеристики двигуна постійного струму з послідовним збудженням. руховий режим

Схема включення двигуна наведена на рис. 2.8. Якір двигуна М і обмотка збудження LM включені послідовно і отримують живлення від одного джерела U. Тому струм якоря $I_{я}$ є і струмом збудження $I_{в}$. Ця обставина визначає єдину відмінність в конструкції двигуна з послідовним збудженням від двигуна з незалежним збудженням: обмотка збудження LM ДПС з послідовним збудженням виконана провідником того ж перетину, що і обмотка якоря.

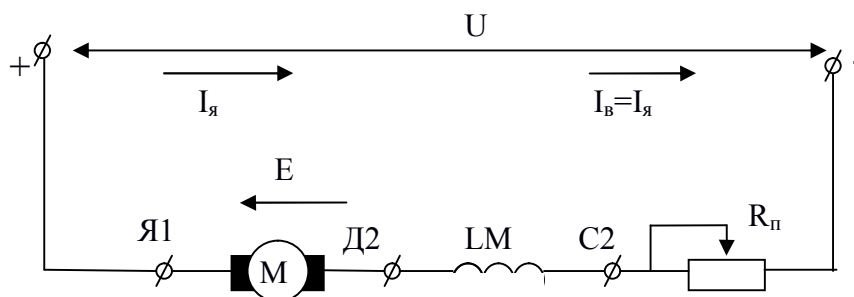


Рис. 2.8. Схема включення ДПС з послідовним збудженням.

При обертовому якорі в його обмотці наводиться е.р.с. обертання E. На схемі включення двигуна напрямок E зустрічно по відношенню напрямки U, що відповідає руховому режиму роботи. Величина E дорівнює:

$$E = k \Phi \omega$$

де ω - кутова швидкість двигуна; Φ - потік двигуна; $k = \frac{p N}{2 \pi a}$ -

конструктивний коефіцієнт двигуна дані для розрахунку, якого наводяться в

довідниках. Тут p - число пар полюсів двигуна; N - число активних провідників обмотки якоря; a - число пар паралельних гілок обмотки якоря.

Напрямок якірного струму $I_{я}$, як і напрямок E на схемі включення показано для рухового режиму роботи.

Допустиме значення якірного струму двигуна $I_{я доп}$ обмежується умовами комутації і механічною міцністю якоря і не повинно перевищувати номінальний струм $I_{ян}$ більш ніж в 2,5 рази $I_{я доп} \leq 2,5 I_{ян}$.

Відповідно до рівняння рівноваги напруг при сталому режимі роботи двигуна напруга U , прикладена до якірного ланцюга двигуна врівноважується падінням напруги в якірного ланцюга $I_{я}R_{яц}$ і наведеної в обмотці якоря е.р.с. обертання E :

$$U = I_{я} R_{яц} + E$$

де $R_{яц} = R_{я} + R_{дп} + R_{КО} + R_{В} + R_{П}$ - сумарний опір якірного ланцюга. Тут $R_{Я}$ - опір обмотки якоря; $R_{дп}$ - опір обмотки додаткових полюсів; $R_{КО}$ - опір компенсаційної обмотки; $R_{В}$ - опір обмотки збудження; $R_{П}$ - опір пускового реостата.

Величина $I_{я}$ в сталому режимі буде дорівнює:

$$I_{я} = \frac{U - E}{R_{яц}}$$

У режимі пуску $E = 0$, тому через невеликого опору обмоток пусковий струм $I_{я П}$ може перевищувати допустиме значення. Для обмеження пускового струму служить пусковий реостат, опір якого $R_{П}$ вибирається таким чином, щоб $I_{я П} \leq I_{я доп}$

$$I_{я П} = \frac{U}{R_{я} + R_{дп} + R_{КО} + R_{В} + R_{П}} \leq 2,5 I_{ян}$$

З рівняння рівноваги напруг для якірного ланцюга можна отримати аналітичний вираз для механічної характеристики двигуна.

Підставивши в нього замість е.р.с. обертання E її значення і вирішивши отримане рівняння щодо швидкості, отримаємо залежність швидкості двигуна ω від струму якоря $I_{я}$ $\omega = f(I_{я})$, яка називається електромеханічної характеристикою:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I_{\text{я}} R_{\text{яц}}}{k\Phi}$$

Оскільки обмотка збудження включена послідовно з якорем двигуна, створюваний нею магнітний потік Φ є функцією струму якоря $I_{\text{я}}$. Залежність $\Phi = f(I_{\text{я}})$ називається кривою намагнічування і носить нелінійний характер типу «зона насичення». Точного аналітичного опису цієї кривої не існує, тому немає і точного аналітичного опису механічної характеристики ДПС з послідовним збудженням. Якщо, нехтуючи насиченням магнітної системи, припустити лінійну залежність між Φ і $I_{\text{я}}$ з коефіцієнтом пропорційності α , тобто вважати $\Phi = \alpha I_{\text{я}}$, то крутний момент буде дорівнює:

$$M = k\Phi I_{\text{я}} = k\alpha I_{\text{я}}^2$$

Звідси величина струму якоря буде дорівнює:

$$I_{\text{я}} = \sqrt{\frac{M}{k\alpha}}$$

Підставивши в рівняння електромеханічної характеристики значення для $I_{\text{я}}$, отримаємо рівняння механічної характеристики:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega_c = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I_{\text{я}} R_{\text{яц}}}{k\Phi} = \frac{U}{k\alpha I_{\text{я}}} - \frac{I_{\text{я}} R_{\text{яц}}}{k\alpha I_{\text{я}}} = \frac{U}{k\alpha \sqrt{\frac{M}{k\alpha}}} - \frac{R_{\text{яц}}}{k\alpha} = \frac{A}{\sqrt{M}} - B$$

де $A = U / k\alpha$; $B = R_{\text{яц}} / (k\alpha)$ - постійні величини.

Аналіз отриманого рівняння показує, що вісь ординат є асимптотой для кривої і що в області малих значень моментів вона має велику крутизну

При $R_{\text{п}} = 0$ і $U = U_{\text{н}}$ двигун працює на природній характеристиці. Для побудови природної характеристики використовуються так звані універсальні характеристики, наведені в каталогах для кожної серії двигунів. Вони представляють залежності $n = f(I_{\text{я}})$ і $M = f(I_{\text{я}})$ у відносних одиницях. Знаючи номінальні дані двигуна, можна побудувати його характеристику в абсолютних величинах. Така характеристика приведена на рис. 2.9.

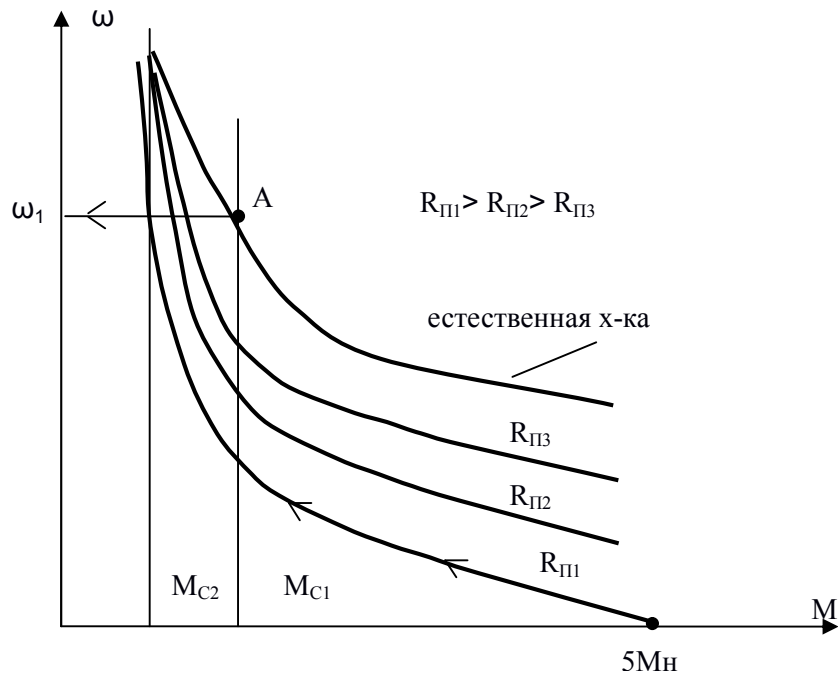


Рис. 2.9. Механічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження

Особливістю характеристики є різке збільшення швидкості при зменшенні моменту опору M_c . З цього двигун постійного струму з послідовним збудженням не можна запускати в тих випадках, коли $M_c < 15 \div 20\% M_H$, так як швидкість двигуна може перевищувати допустиме значення $\omega_{доп} = 2,5 \omega_n$. Пояснити цю особливість можна, розглянувши процеси, що протікають в двигуні при зменшенні навантаження. Припустимо, що двигун працював в точці А на природній характеристиці (див. Рис. 2.9.) В сталому режимі зі швидкістю ω_1 . При зменшенні моменту опору від величини M_{c1} наприклад, до величини M_{c2} , з'являється позитивний динамічний момент $M_D > 0$ і швидкість двигуна починає збільшуватися. При незалежному збудженні наслідком цього буде збільшення е.р.с. обертання $E = k\omega\Phi$ і зменшення струму якоря $I_{я} = \frac{U - E}{R_{яц}}$ і крутного моменту $M = kI_{я}\Phi$. Збільшення швидкості і зменшення моменту двигуна триватиме до тих пір, поки момент двигуна M не стане рівним M_{c2} і M_D стане рівним нулю.

При послідовному збудженні е.р.с. обертання E виявляється функцією двох величин - збільшується швидкості ω і зменшується потоку Φ . У результаті цього величина E , а значить і величини I я і M , з ростом швидкості істотно зміняться не буде, що призводить до збереження $MД > 0$ і подальшого зростання швидкості. Якщо опір пускового реостата $RП > 0$, то статичне падіння швидкості $\Delta\omega_c$ при одному і тому ж моменті двигуна буде більше, ніж на природній характеристиці. Тому реостатні характеристики матимуть великий нахил до осі абсцис.

При послідовному збудженні крутний момент пропорційний квадрату струму якоря $M = k\alpha I_{я}^2$ і обмеження пускового струму значенням $I_{я} ДОП \leq 2,5 I_{яН}$ дозволяє отримати набагато більше ніж при незалежному збудженні значення $M_{доп} = 5 MН$. Коефіцієнт перевантаження двигуна постійного струму з послідовним збудженням по моменту $КП = M_{доп} / MН$ дорівнює п'яти. Такий перевантажувальної здатністю не володіє більше не один електричний двигун. Саме завдяки цій властивості двигуни з послідовним збудженням використовуються в електричному транспорті та підйомних механізмах.

Лекція 8.

Механічні характеристики двигуна постійного струму з послідовним збудженням. Режим електричного гальмування.

Можливі два режими електричного гальмування: динамічне гальмування та гальмування противовключением. Рекуперативне гальмування здійснити не можливо, так як е.р.с. обертання E не може бути більше напруги якірного джерела U .

динамічне гальмування здійснюється двома способами: з самозбудженням і з незалежним збудженням. Схема включення двигуна і механічні характеристики для першого випадку наведені на рис. 2.10.

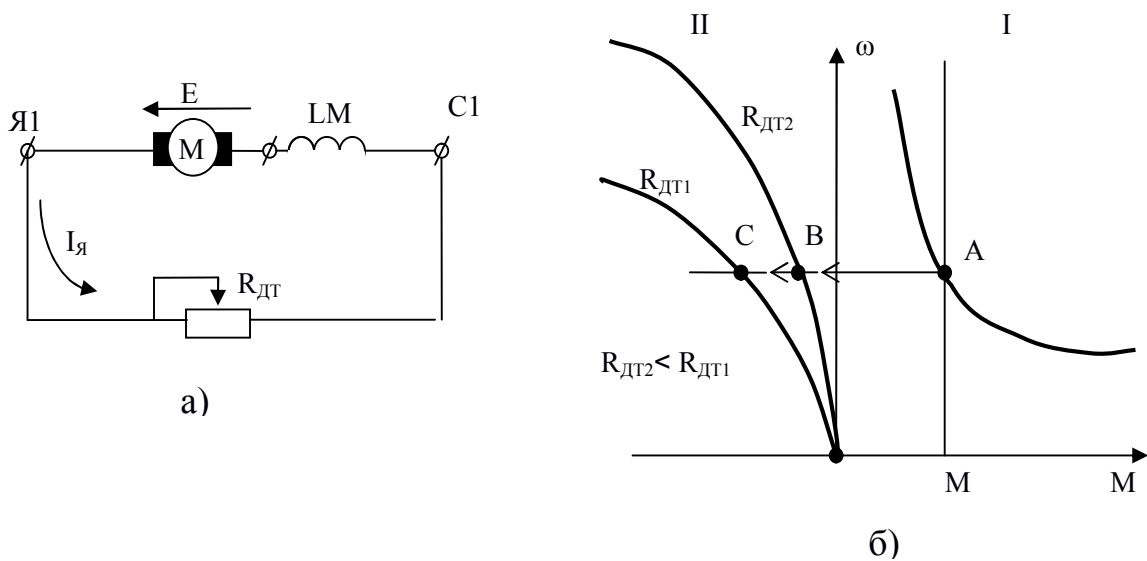


Рис. 2.10. а) схема включення двигуна в режимі динамічного гальмування з самозбудженням;
 б) характеристики двигуна в режимі динамічного гальмування з самозбудженням.

Двигун відключений від напруги джерела, а обмотка збудження переключена таким чином, щоб напрямок струму ІВ в ній було таким же як а в руховому режимі (див. Рис. 2.8). Це збереження напрямку струму виключає знищення Рисого залишкового потоку, пов'язаного з намагнічуванням статора двигуна. Цей потік і є причиною самозбудження: в обмотці якоря, що обертається під дією інерційних сил в колишньому напрямі, наводиться е.р.с. Е, напрямок якої таке ж, як і в руховому режимі. Під дією Е в контурі динамічного гальмування з'являється струм, що призводить до збільшення потоку Φ , е.р.с. Е і струму І я. Оскільки струм І я по відношенню до рухового режиму має протилежний зміст, момент двигуна стає гальмівним. Двигун з точки А в першому квадранті переходить в точку В або С на характеристиці динамічного гальмування у другому квадранті. Спочатку процес самозбудження проходить дуже інтенсивно і це призводить до кидка гальмівного моменту, здатного викликати удари в механічній частині приводу. Тому частіше застосовують

динамічне гальмування з незалежним збудженням. Схема включення двигуна і механічні характеристики наведені на рис. 2.11.

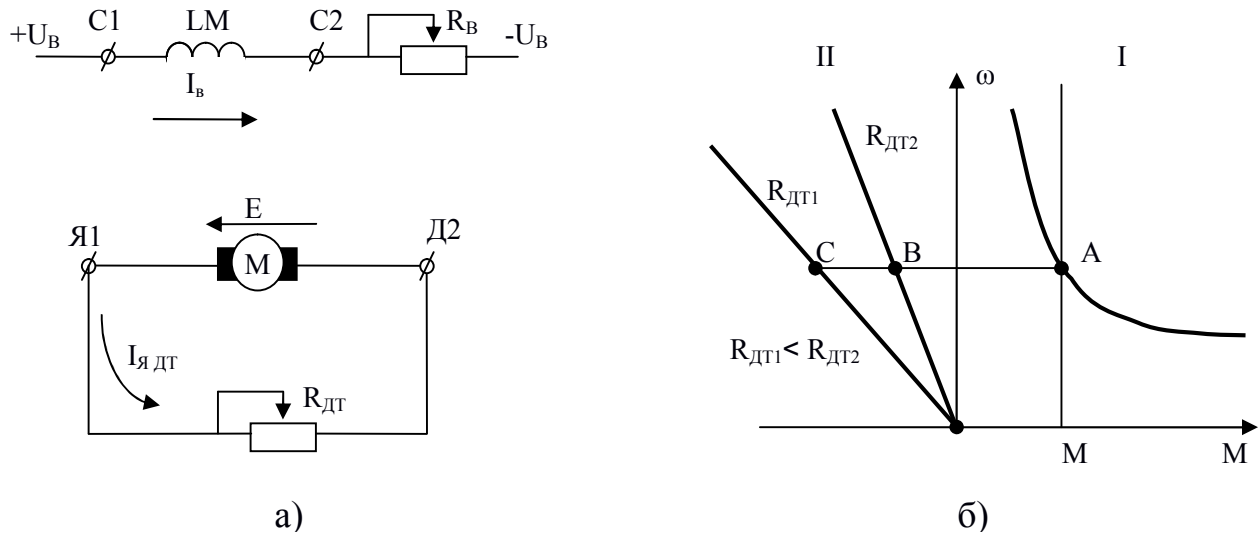


Рис. 2.11. а) схема включення двигуна в режимі динамічного гальмування з незалежним збудженням;
 б) характеристики двигуна в режимі динамічного гальмування з незалежним збудженням.

Затискачі якоря двигуна закорочуються на опір динамічного гальмування $R_{дт}$, а обмотка збудження підключається до напруги джерела через опір $R_{в}$. Струм в ній спрямований як і в руховому режимі і встановлюється рівним номінальному. Характеристики аналогічні характеристикам ДПС з незалежним збудженням: вони лінійні, розташовані у другому квадранті і проходять через початок координат.

гальмування протівоключенієм, Як і для ДПС з незалежним збудженням, здійснюється в тому випадку, коли обмотки двигуна включені для одного напрямку обертання, а якір двигуна під впливом сил інерції або активного моменту опору обертається в протилежну сторону - проти включення.

Реверсивна схема включення ДПС з послідовним збудженням приведена на рис. 2.12.

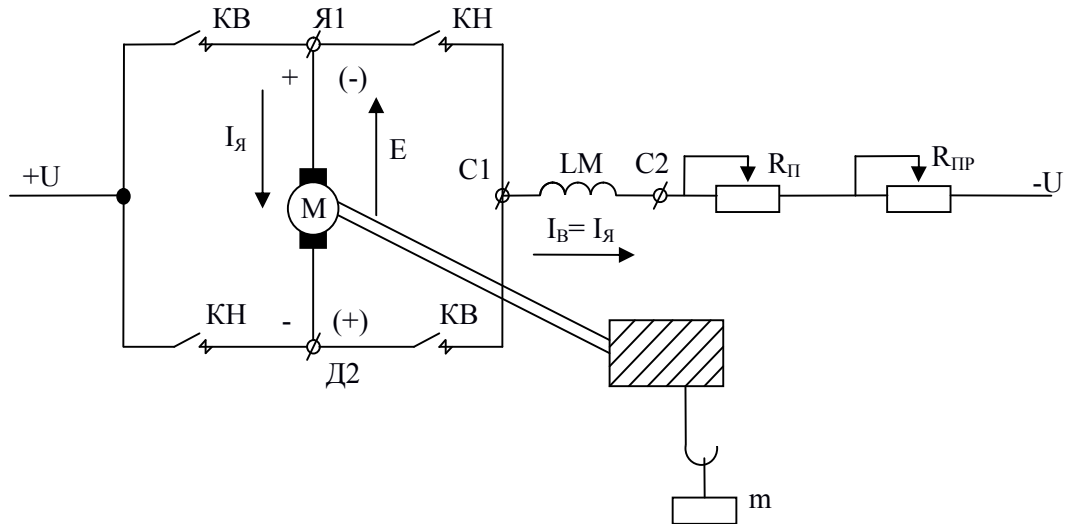


Рис. 2.12. Реверсивна схема включення ДПС з послідовним збудженням.

Призначення елементів таке ж, як і на схемі рис. 2.5. При реверсі двигуна з боку якоря напрямку струму в обмотці збудження LM зберігається. Тому всі процеси при гальмуванні аналогічні тим, що відбувається в схемі рис. 2.5. Характеристики двигуна наведені на рис. 2.13.

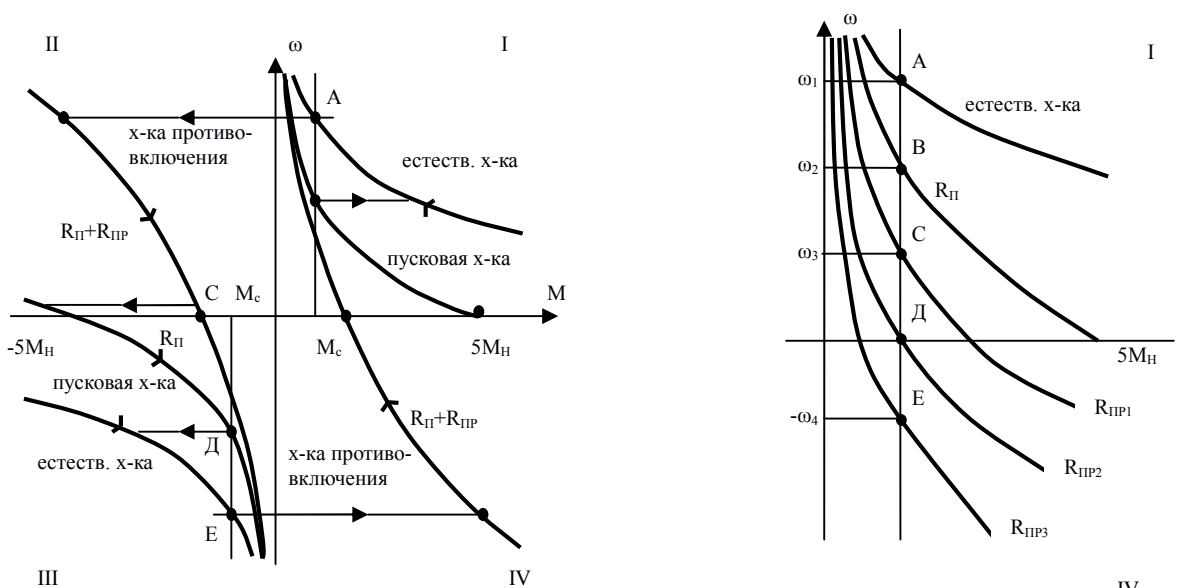


Рис. 2.13. а) характеристики ДПС з послідовним збудженням в режимі гальмування протівоквлюченієм. б) аналогічні характеристики при активному M_3 .

Лекція 9.

Механічні характеристики асинхронних двигунів. Руховий режим.

Асинхронні двигуни (АД) - найпоширеніший вид двигунів, тому що вони більш прості і надійні в експлуатації, при рівній потужності мають меншу масу, габарити і вартість в порівнянні з ДПС. Схеми включення АД наведені на рис. 2.14.

До недавнього часу АД з короткозамкненим ротором застосовувалися в нерегульованих електроприводах. Однак з появою тиристорних перетворювачів частоти (ТПЧ) напруги, що живить статорні обмотки АД, двигуни з короткозамкненим ротором почали використовуватися в регульованих електроприводах. В даний час в перетворювачах частоти застосовуються силові транзистори і програмовані контролери. Спосіб регулювання швидкості отримав назву імпульсного і його вдосконалення є надзвичайно важливим напрямом у розвитку електроприводу.

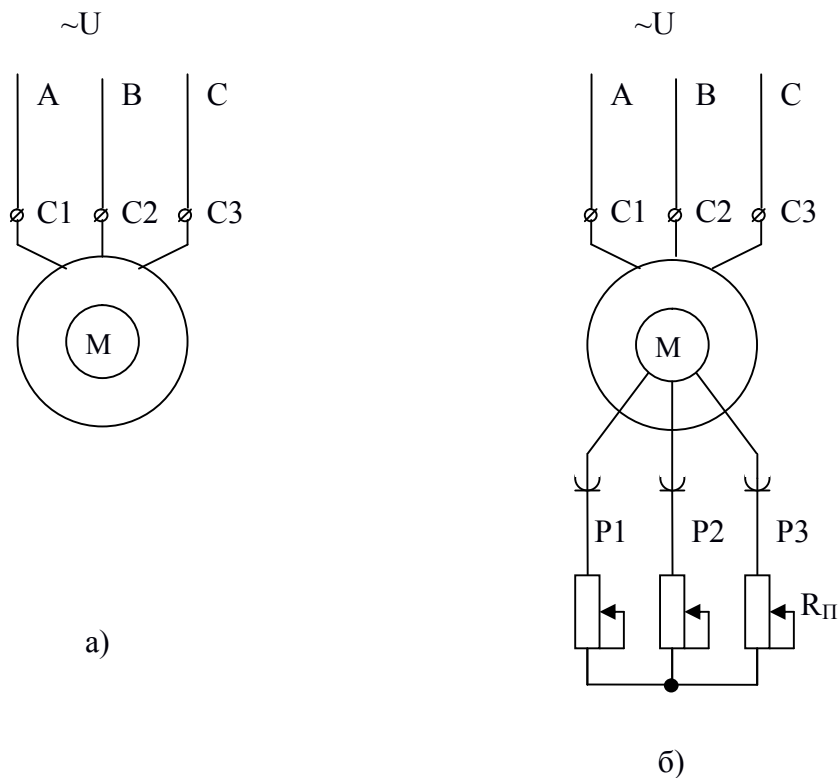


Рис. 2.14. а) схема включення АД з короткозамкненим ротором;
б) схема включення АД з фазним ротором.

Рівняння для механічної характеристики АД може бути отримано на підставі схеми заміщення АД. Якщо в цій схемі знехтувати активним опором статора, то вираз для механічної характеристики матиме вигляд:

$$M = \frac{2 M_k}{S/S_k + S_k/S},$$

де $M_k = \frac{3 U_\phi^2}{2 \omega_0 x_k}$; $S_k = \frac{R_2^1}{x_k}$.

Тут M_k - критичний момент; S_k - відповідне йому критичне ковзання; U_ϕ - діюче значення фазної напруги мережі; $\omega_0 = 2\pi f / p$ - кутова швидкість магнітного поля АД (синхронна швидкість); f - частота напруги живлення; p - число пар полюсів АД; x_k - індуктивне фазне опір короткого замикання (визначається зі схеми заміщення); $S = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ - ковзання (швидкість ротора щодо швидкості обертового поля); R_2^1 - сумарний активний опір фази ротора.

Механічна характеристика АД з короткозамкненим ротором приведена на рис. 2.15.

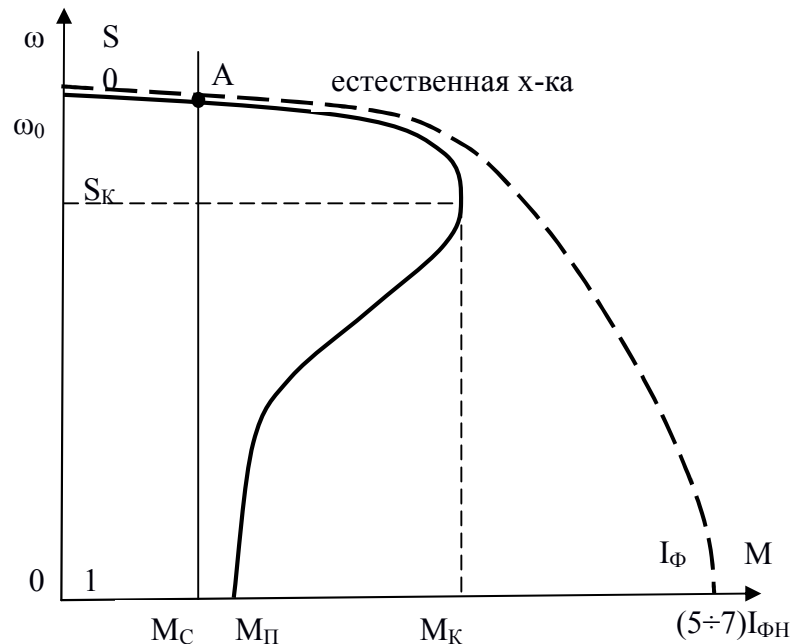


Рис. 2.15. Механічна характеристика АД з короткозамкненим ротором.

На ній можна виділити три характерні точки. Координати першої точки ($S = 0$; $\omega = \omega_0$; $M = 0$). Вона відповідає режиму ідеального холостого ходу, коли

швидкість ротора дорівнює швидкості обертового магнітного поля. Координати другої точки ($S = S_k; M = M_k$). Двигун працює з максимальним моментом. При $M_c > M_k$ ротор двигуна буде примусово зупинено, що для двигуна є режимом короткого замикання. Тому що обертає момент двигуна в цій точці і називається критичним M_k . Координати третьої точки ($S = 1; \omega = 0; M = M_p$). У цій точці двигун працює в режимі пуску: швидкість ротора $\omega = 0$ і на нерухомий ротор діє пусковий момент M_p . Ділянка механічної характеристики, розташований між першою і другою характерними точками, називається робочим ділянкою. На ньому двигун працює в сталому режимі. У АД з короткозамкненим ротором при виконанні умов $U = U_n$ і $f = f_n$ механічна характеристика називається природною. У цьому випадку на робочому ділянці характеристики розташована точка, відповідна номінальному режиму роботи двигуна і має координати ($S_n; \omega_n; M_n$).

Електромеханічна характеристика АД $\omega = f(I_f)$, яка на рис.2.15 зображена штриховою лінією, на відміну від електромеханічної характеристики ДПС, збігається з механічною характеристикою тільки на її робочому ділянці. Це пояснюється тим, під час пуску через змінюється частоти е.р.с. в обмотці ротора E_2 змінюється частота струму і співвідношення індуктивного і активного опорів обмотки: на початку пуску частота струму велика і індуктивний опір більше активного; зі збільшенням швидкості обертання ротора ω частота струму ротора, а значить і індуктивне опір його обмотки, зменшується. Тому пусковий струм АД в режимі прямого пуску в $5 \div 7$ разів перевищує номінальне значення I_{fn} , а пусковий момент M_p дорівнює номінальному M_n . На відміну від ДПС, де під час пуску необхідно обмежувати пусковий струм і пусковий момент, при пуску АД пусковий струм необхідно обмежувати, а пусковий момент збільшувати. Остання обставина найбільш важливо, оскільки ДПС з незалежним збудженням запускається при $M_c < 2,5M_n$, ДПС з послідовним збудженням при $M_c < 5M_n$, а АТ при роботі на природній характеристиці при $M_c < M_n$.

У АД з короткозамкненим ротором збільшення $M_{п}$ забезпечується спеціальною конструкцією обмотки ротора. Паз для обмотки ротора роблять глибоким, а саму обмотку розташовують в два шари. При пуску двигуна частота E_2 і струми ротора великі, що призводить до появи ефекту витіснення струму - струм протікає тільки в верхньому шарі обмотки. Тому збільшується опір обмотки і пусковий момент двигуна $M_{п}$. Його величина може досягати 1,5 $M_{н}$.

У АТ з фазним ротором збільшення $M_{п}$ забезпечується за рахунок зміни його механічної характеристики. Якщо опір $R_{п1}$, включене в ланцюг протікання струму ротора, дорівнює нулю - двигун працює на природній характеристиці і $M_{п} = M_{н}$. При $R_{п1} > 0$ збільшується сумарний активний опір фази ротора R_{21} . Критичне ж ковзання $S_{к}$ в міру збільшення R_{21} теж збільшується. Внаслідок цього у АТ з фазним ротором введення $R_{п1}$ в ланцюг протікання струму ротора призводить до зміщення $M_{к}$ в сторону великих ковзань. При $K = 1$ $M_{п} = M_{к}$. Механічні характеристики АД з фазним ротором при $R_{п1} > 0$ називаються штучними або реостатними. Вони наведені на рис. 2.16.

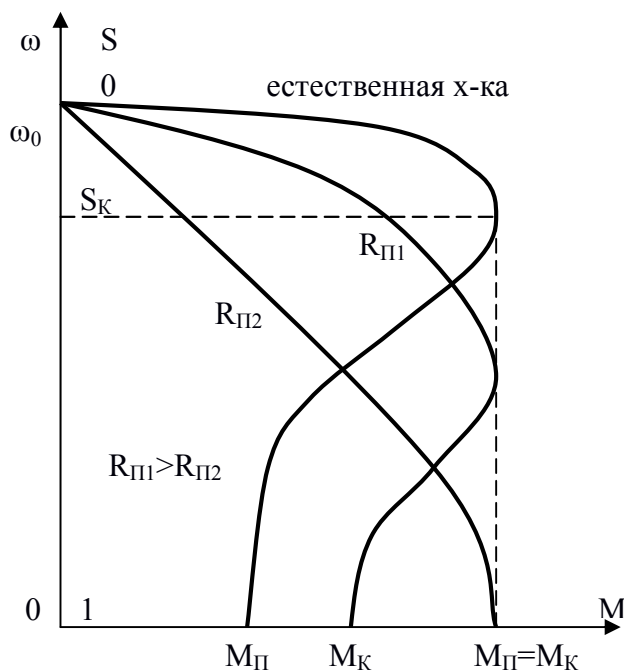


Рис. 2.16. Механічні характеристики АД з фазним ротором.

Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором запуситься при $M_{п} > M_{с}$ і буде працювати в точці А (див. Рис. 2.15). Після цього момент опору $M_{с}$

можна збільшувати до МК. АТ, як і двигуни постійного струму, при збільшенні M_c буде автоматично, без втручання ззовні, знижувати швидкість ω і збільшувати крутний момент M до тих пір, поки M і M_c незрівняються за величиною, тобто з усталеного режиму з більшою швидкістю переходить в усталений режим з меншою швидкістю. При зменшенні M_c буде спостерігатися зворотне - двигун з усталеного режиму з меншою швидкістю буде автоматично переходити в усталений режим з більшою швидкістю. Робоча ділянка механічної характеристики АД аналогічній механічній характеристиці ДПС з незалежним збудженням - пряма лінія, нахилена до осі абсцис.

Такими властивостями АТ володіє завдяки е.р.с. E_2 , яка наводиться обертовим магнітним полем статора в обмотці ротора. При $M_c > M$ динамічний момент $M_D < 0$ і швидкість ротора ω зменшується. Магнітне поле статора, що обертається з постійною швидкістю ω_0 (синхронної швидкістю) буде перетинати обмотку ротора з великою частотою. Тому буде збільшуватися E_2 , струм в обмотці ротора, сила Ампера, що діє на її витки, а значить і крутний момент M .

Перевантажувальна здатність АД по моменту визначається відношенням критичного моменту МК до моменту номінальному МН. Для звичайних АД з короткозамкненим ротором $M_K / M_H = 1,7$, з фазним ротором $M_K / M_H = 1,8$. Для спеціальних кранових АД з короткозамкненим ротором типу МТК і фазним ротором типу МТКФ ставлення $M_K / M_H = 2,3 \div 3,4$.

Лекція 10.

Механічні характеристики асинхронних двигунів. Режим електричного гальмування.

Асинхронний двигун, як і двигун постійного струму з незалежним збудженням, може працювати у всіх трьох режимах електричного гальмування.

Рекуперативне гальмування. Повернення енергії в мережу можливий при швидкості ротора ω вище синхронної швидкості ω_0 . У міру наближення ω

до ω_0 зменшується величина E_2 , струм в обмотці ротора і крутний момент двигуна M . Збільшення ω до значень, великих ω_0 можливо під впливом M_c , що сприяє обертанню двигуна. В даному випадку АТ працює як генератор, включений паралельно з мережею: занесену в рухомих елементах механічної частини електроприводу механічну енергію він перетворює в електричну і повертає її в мережу. Застосовується режим рекуперативного гальмування в електроприводах підйомних лебідок різних вантажопідйомних машин. Реверсивна схема включення АТ з фазним ротором приведена на рис. 2.17а, а відповідні їй характеристики АД для режиму рекуперативного гальмування - на рис. 2.17б.

Реверсувати АТ, на відміну від ДПС, можна тільки одним способом - зміною порядку чергування фаз напруги, що живить статорні обмотки двигуна. Для цього використовують два триполюсних контактора (в електроприводах Рисої і середньої потужності - магнітних пускача), конструкція яких має механічне блокування, що виключає можливість одночасного спрацьовування контакторів. На рис. 2.17а показані головні контакти контакторів напрямку КВ (вперед або верх) і КН (назад або низ).

При замкнутих КВ статорні обмотки АД підключені до мережі з прямим порядком чергування фаз - висновок С1 статорних обмоток до напруги фази А, висновок С2 - фази В і висновок С3 - фази С. обертається магнітне поле і ротор двигуна обертаються в напрямку «вперед».

При розімкнутих КВ і замкнутих КН висновок С1 буде підключений до напруги фази С, висновок С2 залишиться підключеним до напруги фази В, а висновок С3 буде підключений до напруги фази А. прямиий порядок чергування фаз (А, В, С) змінюється на зворотний (С, В, А). В результаті цього змінюється напрямок обертання поля і ротора двигуна.

Піднятий вантаж створює активний момент опору M_c , напрямок якого не змінюється при зміні напрямку обертання двигуна (см. Рис. 2.17б). Тому при замиканні КН і включення двигуна в напрямку опускання вантажу ротор

двигуна будуть розкручувати як крутний момент опору M_c . Рівняння руху електроприводу матиме вигляд:

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

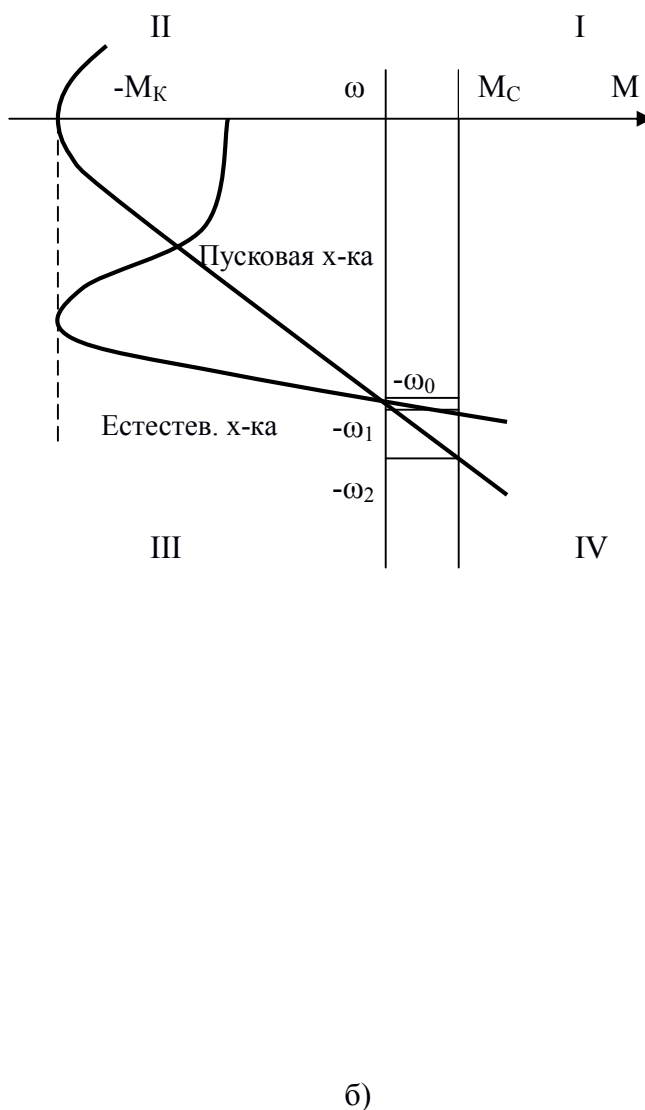
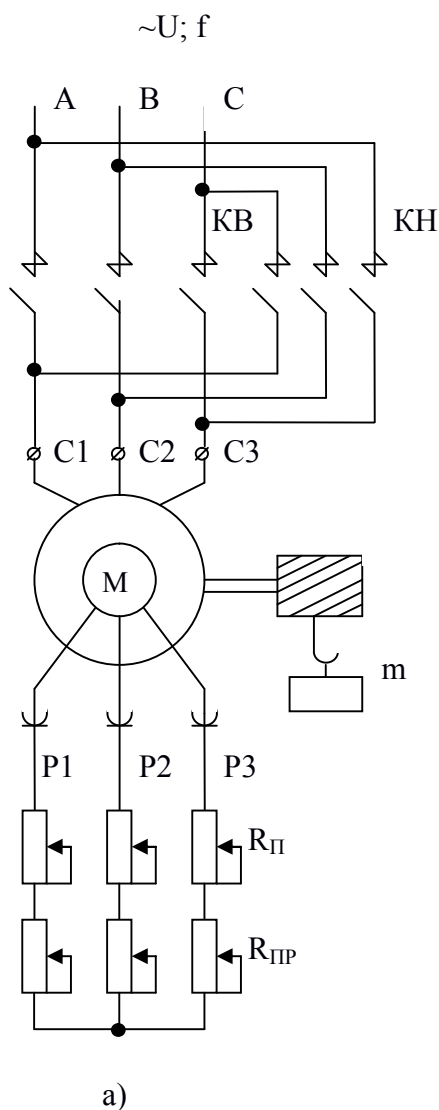


Рис. 2.17. а) реверсивна схема включення АД з фазним ротором;
 б) механічні характеристики АД з фазним ротором в режимі рекуперативного гальмування.

Швидкість обертання двигуна, а значить і швидкість опускання вантажу, буде збільшуватися. При $\omega = \omega_0$ крутний момент $M = 0$ і рівняння руху набуде вигляду:

$$M_c = J \frac{d\omega}{dt} .$$

Швидкість двигуна буде рости під дією активного М с. Коли швидкість ротора перевищить швидкість обертового поля ($\omega > \omega_0$), момент двигуна змінить напрямок і стане гальмівним, а рівняння руху електроприводу матиме вигляд:

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

Оскільки схема включення двигуна не змінюється, механічні характеристики АД для режиму рекуперативного гальмування (як і для ДПС з незалежним збудженням) виходять продовженням характеристик для рухового режиму в третьому квадранті в четвертий.

Зі збільшенням швидкості двигуна буде рости величина гальмівного моменту М. При роботі двигуна на природній характеристиці М стане рівним M_c при швидкості $(-\omega_1)$ і двигун перейде в усталений режим роботи. Вантаж буде опускатися з постійною швидкістю. На реостатних характеристиках швидкість усталеного режиму буде більше - $(-\omega_2)$ на пусковий характеристиці.

гальмування протівключенієм, Як і для ДПС з незалежним збудженням, здійснюється в тому випадку, коли обмотки двигуна включені для одного напрямку обертання, а ротор двигуна під впливом сил інерції або активного моменту опору обертається в протилежну сторону - проти включення.

Припустимо, що на рис. 2.17а замкнуті контакти КВ, а РП і Рпр зашунтовані. Статорні обмотки підключені до напруги мережі з прямим порядком чергування фаз.

Розмикаються контакти КВ і замикаються КН. Працюючий двигун включається на протилежний зміст. Статорні обмотки двигуна підключаються до мережі зі зворотним порядком чергування фаз. Змінюється напрямок обертання магнітного поля статора, а ротор двигуна під дією інерційних сил зберігає напрямок обертання - обертається проти включення. Змінює напрямок крутний момент двигуна, тобто він стає гальмівним.

Оскільки ротор двигуна обертається назустріч полю, частота, з якою обертається поле перетинає обмотку ротора, в два рази перевищує частоту при

пуску (ротор нерухомий, а поле обертається із синхронною швидкістю ω_0). Наводиться в обмотці ротора е.р.с. E_2 в два рази перевищує номінальну е.р.с. $E_{2н}$, що наводяться в обмотці ротора при пуску. Тому для обмеження струму в ланцюг ротора необхідно крім пускового опору $R_{п}$ включати опір противовключення $R_{пр}$. Механічні характеристики двигуна, відповідні схемою включення на рис. 2.17а, наведені на рис. 2.18. При замкнутих КВ і зашунтувати $R_{п}$ і $R_{пр}$ двигун працював на природній характеристиці в точці А. Після розмикання КВ, включення в ланцюг ротора $R_{п} + R_{пр}$ і замикання КН двигун з точки А переходить в точку В на характеристиці гальмування противовключенням. Під дією гальмівного моменту швидкість двигуна буде знижуватися. Якщо двигун гальмується для зупинки, то в точці С при $\omega = 0$ необхідно розімкнути КН.

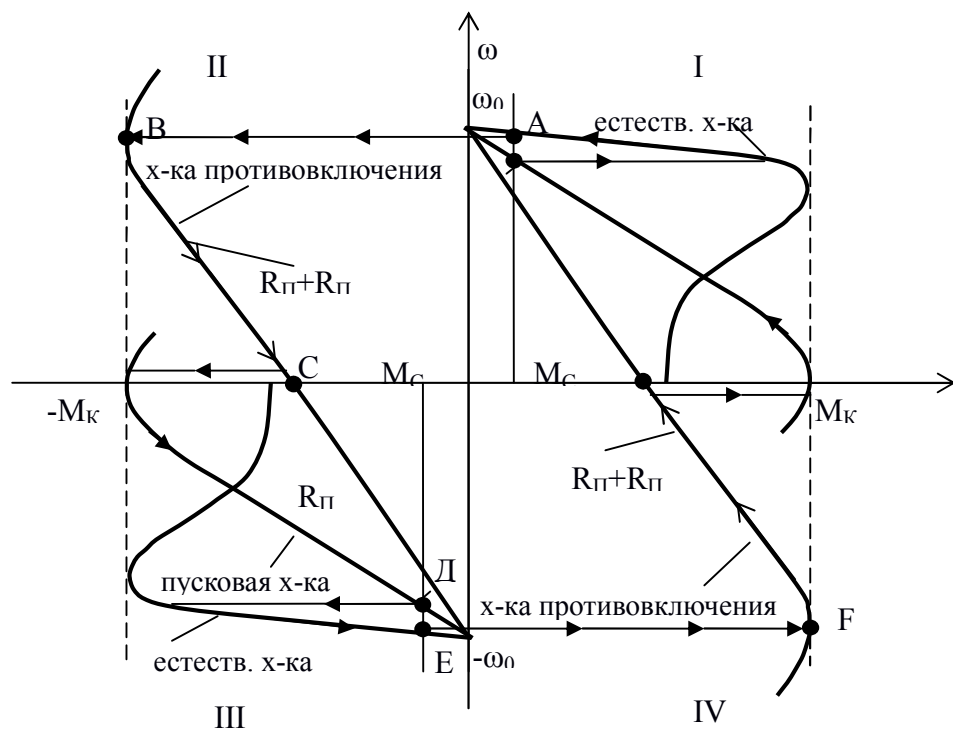


Рис. 2.18. Механічні характеристики АД з фазним ротором в режимі гальмування противовмиканням

Якщо ж після зупинки починається розгін в протилежному напрямку, то при швидкості близькою до нуля необхідно зашунтувати $R_{пр}$ і перевести двигун на граничну пускову характеристику. На цій характеристиці двигун закінчить

гальмування і відразу ж почне розгін в протилежному напрямку з максимальним прискоренням. У третьому квадранті він може працювати в сталому режимі в точці Д на пусковій характеристиці або в точці Е на природній. Якщо розімкнути КН, включити в ланцюг ротора $RП + Rпр$ і замкнути КВ двигун з точки Е перейде в точку F на характеристиці противовключення в четвертому квадранті. Процес гальмування і розгін будуть проходити аналогічно.

При реверсивної схемою включення АД з короткозамкненим ротором у двигуна будуть дві природних характеристики (див. Рис. 2.17б) в першому і третьому квадрантах. Для отримання характеристик гальмування противовключенням природні характеристики слід продовжити в другій і четвертий квадранти. Процеси гальмування і розгону будуть протікати аналогічно розглянутим для АТ з фазним ротором. Однак нагрів двигуна буде набагато більшим, тому що обмеження струму ротора відсутня.

В електроприводах з активним M_c , наприклад, в електроприводі підйомної лебідки, де активний M_c створює вантаж масою m , підвішений на гаку, режим гальмування протівключенієм можна отримати за рахунок зміни механічної характеристики двигуна. Схема включення двигуна наведена на рис. 2.17а, а механічні характеристики двигуна на рис. 2.19.

Припустимо, що замкнуті КВ і зашунтовані $RП$ і $Rпр$. Двигун зі швидкістю ω_1 працює в напрямку підйому на природній характеристиці в точці А.

При введенні в ланцюг ротора пускового реостата $RП$ двигун перейде на граничну пускову характеристику і буде працювати в точці В зі швидкістю ω_2 . С введенням $Rпр$ нахил характеристики буде збільшуватися, а швидкість руху зменшується ($\omega = \omega_3$ при $Rпр = RП1$).

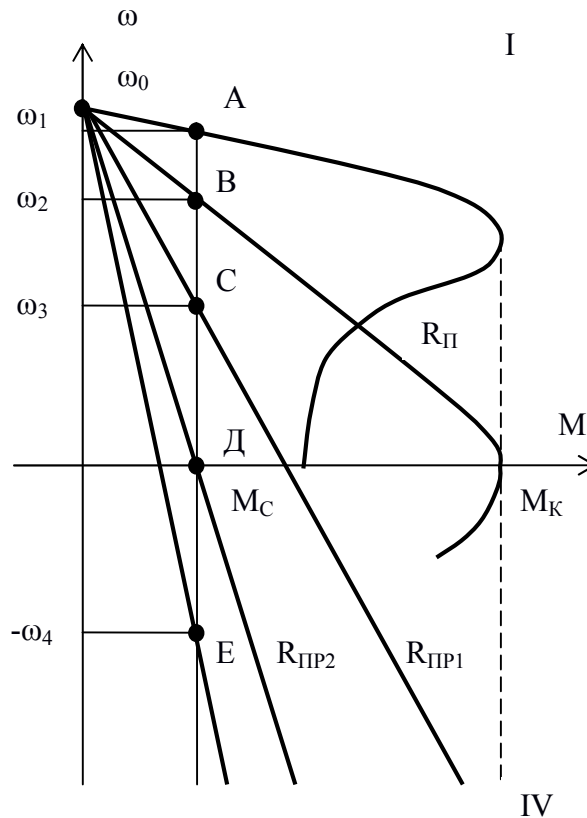


Рис. 2.19. Механічні характеристики АД з фазним ротором в режимі гальмування противовключением при активному M_c

Можна так підібрати величину R_{np} , що M буде дорівнює M_c при швидкості двигуна ω , що дорівнює нулю. На рис. 2.19 цієї нагоди відповідає точка Д при $R_{np} = R_{np2}$. Двигун зупиняється і вантаж, що піднімається утримується в підвішеному стані за рахунок крутного моменту двигуна M . При $R_{np} = R_{np3}$ момент двигуна M стане менше M_c . Піднятий вантаж почне опускатися і двигун, включений для роботи на підйом, під дією активного M_c буде обертатися в напрямку опускання - проти включення. Момент двигуна стає гальмівним. Зі збільшенням швидкості опускання вантажу він буде збільшуватися. При $\omega = -\omega_4$ (точка Е на рис. 2.19) величина гальмівного моменту двигуна M стане дорівнює величині активного M_c . Двигун перейде в усталений режим роботи і збільшення швидкості опускання вантажу припиниться. Такий режим гальмування широко використовується в електроприводах підйомних лебідок, так як він дозволяє отримати дуже низькі

«посадкові» швидкості двигуна і встановлювати вантаж в необхідному місці без удару.

При гальмуванні противовключением АТ працює в режимі генератора, включеного послідовно з мережею. Він перетворює механічну енергію в електричну, а також споживає електричну енергію з мережі. Вся електроенергія виділяється у вигляді тепла в двигуні і на опорах, включених в ланцюзі протікання струму ротора. Тому гальмування противовключением не економічно з точки зору витрат енергії, проте в порівнянні з іншими видами воно забезпечує мінімальний час гальмування.

Динамічне гальмування здійснюється при відключенні обмоток статора від мережі змінного струму і підключенні двох з них до мережі постійного струму. Схема включення двигуна наведена на рис. 2.20а, механічні характеристики - на рис. 2.20б.

При замкнутих КЛ і розімкнутих КДТ і зашунтувати РДТ двигун працює в першому квадраті на природній характеристиці в точці А.

При розмиканні КЛ і замиканні КДТ висновки С2 і С3 статорних обмоток підключається до мережі постійного струму. Постійний струм, протікаючи до обмотці статора, утворює нерухоме магнітне поле. В обмотці ротора наводиться е.р.с., під дією якої протікає змінний струм. Створюване цим струмом поле нерухомо щодо статора. Гальмівний момент виникає в результаті взаємодії сумарного магнітного потоку зі струмом ротора.

Двигун з точки А перейде в точку В на одній з характеристик динамічного гальмування, які розташовані у другому квадраті. Вони проходять через початок координат, так як при $\omega = 0$ е.р.с. ротора, струм ротора і гальмівний момент двигуна теж дорівнюватимуть нулю.

У режимі динамічного гальмування двигун працює як автономний генератор. Механічну енергію, накопичену в рухомих елементах механічної частини він перетворює в електричну і витрачає її на нагрів обмоток і додаткових опорів в ланцюзі ротора.

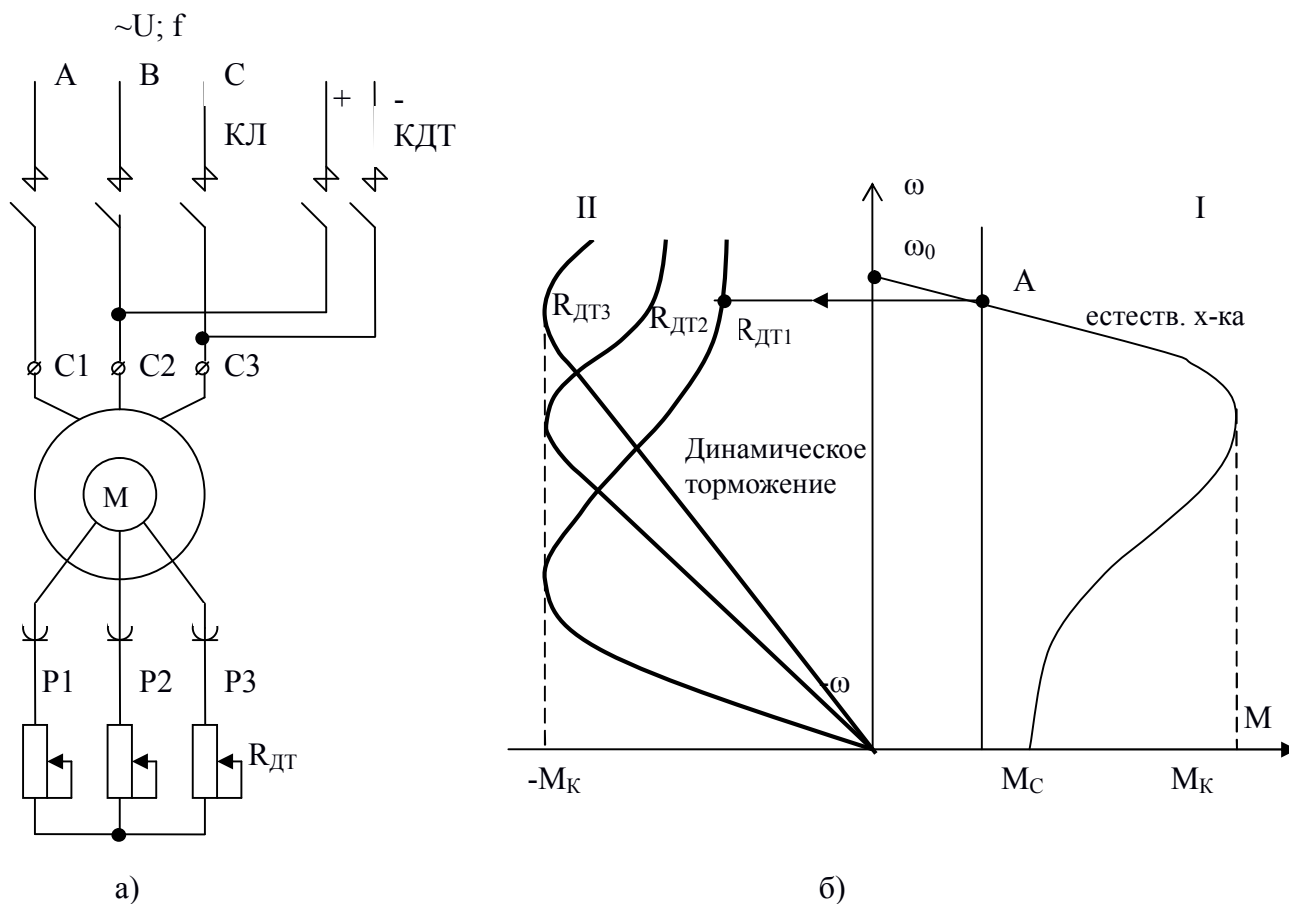


Рис. 2.20. а) схема включення АД з фазним ротором в режимі динамічного гальмування;
 б) механічні характеристики АД з фазним ротором в режимі динамічного гальмування.

Лекція 11.

Механічні і енергетичні характеристики синхронних двигунів

Синхронні трифазні двигуни (СД) широко застосовуються в електроприводах найрізноманітніших технологічних машин. Схема включення СД приведена на рис. 2.21а, механічні характеристики на рис. 2.21б.

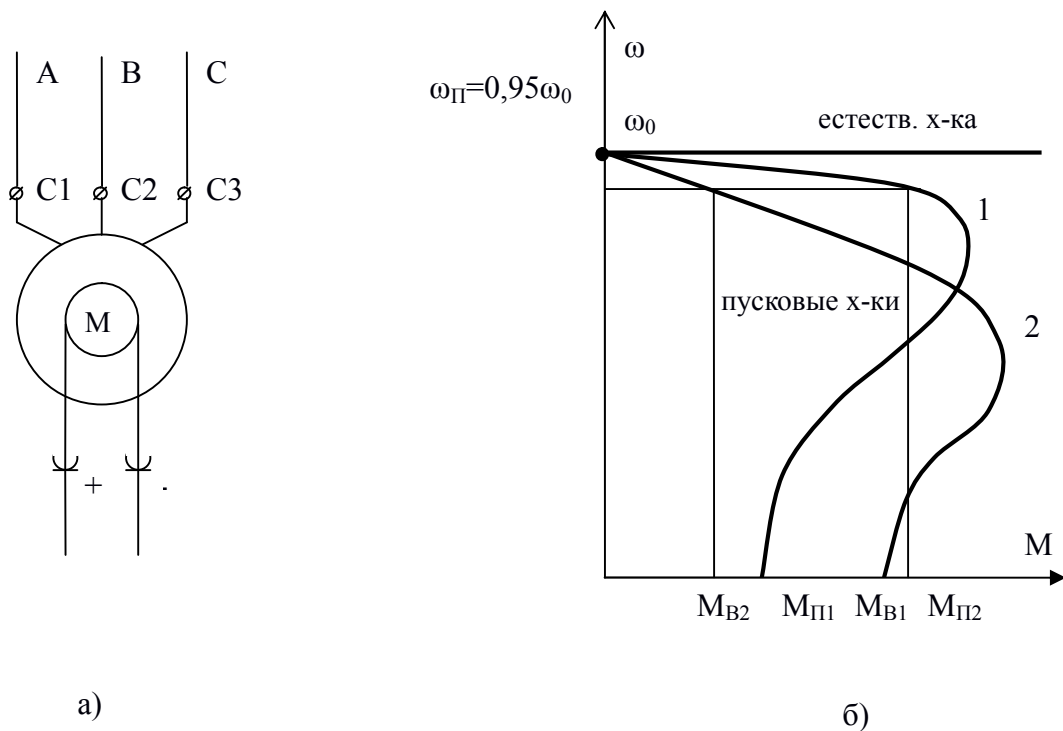


Рис. 2.21. а) схема включення синхронного двигуна;
 б) механічні характеристики синхронного двигуна в режимах пуску та синхронного обертання.

Статор СД виконаний аналогічно статора АД - три статорних обмотки розташовані на статорі таким чином, що осі створюваних ними потоків зрушені в просторі на 120° . Підключення почав обмоток статора, які на рис. 2.21а позначені як С1, С2, С3, до трифазної мережі змінного струму із зсувом напруги між фазами на 120° електричних градусів призводить до появи магнітного поля, що обертається із синхронною швидкістю $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$. Тут p - число пар полюсів статорних обмоток СД; f_1 - частота мережі живлення. При $p = 1$ обертається поле являє собою два діаметрально протилежно розташованих різнойменних полюси північного (N) і південного (S), які і обертаються зі швидкістю ω_0 .

Ротор СД виконується з двома обмотками: обмоткою збудження і короткозамкненою пусковою обмоткою у вигляді «білячої клітини». Обмотка збудження живиться напругою постійного струму і при протіканні в ній струму вона перетворюється в електромагніт постійного струму, різнойменні полюси

якого в залежності від швидкості обертання можуть виконуватися як явними, так і неявними, тобто обмотка збудження розподіляється по зовнішній поверхні ротора.

При нерухомому роторі різнойменні полюси обертового поля статора і ротора не встигають притянутися. Момент, що обертає двигуна дорівнює нулю, а в обмотці збудження полем статора наводиться така велика е.р.с., що може наступити пробій ізоляції обмотки збудження.

Для того, щоб різнойменні полюси статора і ротора притягнулися (увійшли в синхронізм) і при цьому не з'являлися істотно перевищують номінальні значення кидки струму, ротор СД необхідно розігнати до підсинхронних швидкості $\omega_{\text{П}}$, яка дорівнює $\omega_{\text{П}} = 0,95\omega_0$. Для цього призначена пускова короткозамкнута обмотка, тобто СД запускається як АД з короткозамкненим ротором. Пускові характеристики АД при різних варіантах пускової обмотки приведені на рис. 2.21б

У характеристики 1 пусковий момент $M_{\text{П1}}$ менше пускового моменту характеристики 2 - $M_{\text{П2}}$, проте момент входження в синхронізм $M_{\text{В1}}$ більше $M_{\text{В2}}$. Вибір виду пускової характеристики визначається конкретними умовами роботи СД. Обмотка збудження СД при пуску закорачивається на розрядний опір, що захищає її ізоляцію від перенапруг. До джерела напруги постійного струму вона підключається після того, як швидкість ротора ω досягне підсинхронних $\omega_{\text{П}}$.

Пускова обмотка СД під час пуску інтенсивно нагрівається, тому час струму СД обмежена.

Після входження СД в синхронізм його швидкість при зміні величини моменту опору на валу до деякого максимального значення $M_{\text{макс}}$ залишається постійною і рівною швидкості обертового магнітного поля - синхронної швидкості ω_0 . Тому його механічна характеристика, наведена на рис. 2.21б, має вигляд прямої, паралельної осі абсцис. Якщо $M_{\text{с}}$ перевищує $M_{\text{макс}}$, то СД може випасти із синхронізму.

Для визначення максимального моменту СД M_{\max} , до якого зберігається синхронна робота СД, служить кутова характеристика СД. Вона відображає будь-якій крутного моменту M від внутрішнього кута СД θ , що представляє собою кут зсуву між віссю магнітного поля статора і віссю поля ротора. Момент СД являє собою синусоїдальну функцію кута θ - $M = M_{\max} \sin \theta$. Максимального значення крутний момент СД досягає при $\theta = \pi / 2$. При великих значеннях θ величина крутного моменту двигуна зменшується і тому двигун випадає із синхронізму. Номінального моменту двигуна $M_{\text{ном}}$ відповідає номінальний кут $\theta_{\text{ном}} = 250 \div 300$. При такому значенні $\theta_{\text{ном}}$ коефіцієнт перевантаження СД по моменту $K_{\text{П}} = M_{\max} / M_{\text{ном}} = 2 \div 2,5$.

Синхронний двигун може працювати у всіх режимах електричного гальмування. Найбільш часто використовується режим динамічного гальмування. Для його реалізації обмотки статора СД відключають від мережі і закорачивається на опір динамічного гальмування РДТ, а обмотка збудження продовжує харчуватися постійним струмом. Механічні характеристики СД аналогічні характеристикам АТ при динамічному гальмуванні (см. Рис. 2.20б).

Гальмування противовключением використовується рідко через те, що переключення СД в цей режим супроводжується значними кидками струму і вимагає застосування складних схем управління.

Робота системи електропостачання характеризується споживанням електроприймачами реактивної потужності. Це викликає додаткові втрати енергії в елементах системи, зниження рівня напруги і необхідність мати підвищену пропускну здатність підстанцій та розподільчих мереж, що знижує економічність роботи системи. У зв'язку з цим для поліпшення показників роботи системи електропостачання необхідно проводити компенсацію реактивної потужності, що може здійснюватися кількома способами.

Один з ефективних способів компенсації реактивної потужності пов'язаний з використанням СД, який за рахунок регулювання струму збудження може здійснювати генерацію реактивної потужності в електричну мережу. В цьому випадку СД працює з випереджаючим коефіцієнтом $\cos \varphi$.

Можливість роботи СД як компенсатора реактивної потужності ілюструють U-образні характеристики СД, наведені на рис. 2.22. Ці характеристики показують залежності струму статора I_1 і його $\cos \varphi$ від струму збудження I_B при $U = \text{const}$ і $P = \text{const}$.

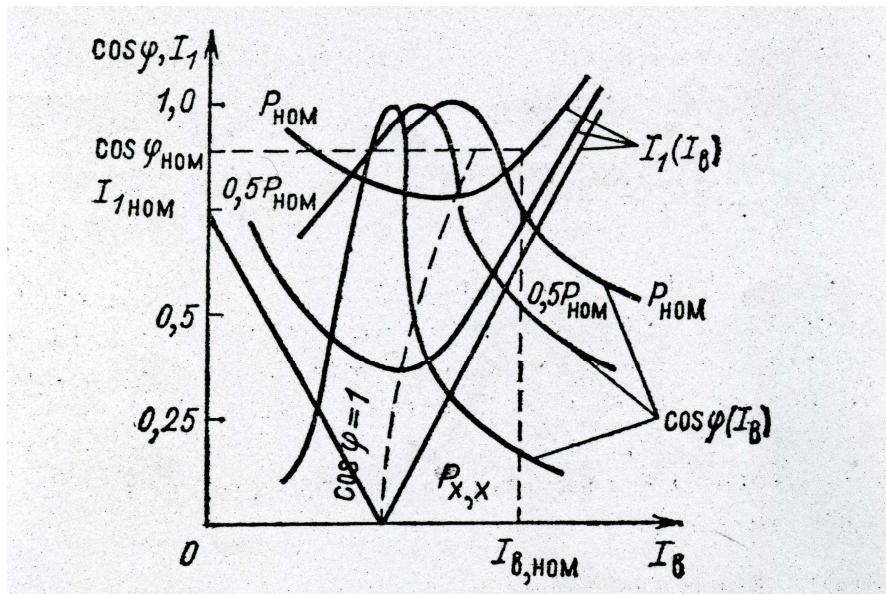


Рис. 2.22. U-образні характеристики СД.

Характеристики $I_1(I_B)$ показують, що при збільшенні від нуля струму збудження струм статора спочатку зменшується, що відбувається за рахунок зменшення його реактивної складової. При деякому струмі збудження вона стає рівною нулю, а $\cos \varphi = 1$. При подальшому збільшенні струму збудження знову з'являється і збільшується реактивна складова струму статора, але вже з випереджаючої фазою. Синхронний двигун починає працювати генератором реактивної енергії з віддачею її в мережу.

Характеристики рис. 2.22 дозволяють виявити також залежність компенсує здібності СД від потужності P на його валу. Як видно з рис. 2.22 з ростом потужності P область генерації реактивної потужності (випереджаючого $\cos \varphi$) зміщується в бік великих струмів збудження. Іншими словами, при постійному струмі збудження зі зміною потужності на валу віддається в мережу реактивна потужність також змінюється.

Зі сказаного випливає важливий висновок: якщо СД працює зі змінним навантаженням на валу, то для повного використання його компенсуючих властивостей потрібно регулювання струму збудження.

Слід підкреслити, що при використанні СД як джерело реактивної потужності необхідно забезпечувати підвищені струми збудження і збільшувати габаритну (повну) потужність СД, що не є обмежуючим фактором для такого застосування СД. Покажемо це наступним нескладним розрахунком.

Запишемо відношення повної (габаритної) потужності S до активної потужності P

$$\begin{aligned} P^2 + Q^2 / P &= Q / P^2 = \\ &= 1 + S / P \end{aligned}$$

Нехай потрібно, щоб реактивна випереджальна потужність становила 40% активної потужності, тобто $Q / P = 0,4$. Розрахунок виявляє, що при цьому відношення S / P складе 1,08, тобто генерування зазначеної реактивної потужності вимагатиме збільшення габаритної потужності тільки на 8%. Це показує, що використання СД для компенсації реактивної потужності є вигідним.

При використанні СД для компенсації реактивної потужності зазвичай потрібно розглядати в комплексі кілька питань. Одним з основних є техніко-економічне обґрунтування використання даного способу компенсації реактивної енергії. Як відомо, крім СД для цієї мети можуть використовуватися також статичні компенсують пристрої (конденсатори) і синхронні компенсатори. Серед прийнятних варіантів економічно доцільним буде той, який забезпечує мінімум приведених річних витрат:

$$Z = K_n, EK + C_e = \min,$$

де K_n, e - нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень K ; C_e - експлуатаційні витрати.

Якщо в результаті виконаних техніко-економічних розрахунків виявлена доцільність використання СД для компенсації певної реактивної потужності Q , то далі необхідно встановити найбільш економічне її розподіл між окремими

СД. Це досягається відшукування оптиРисьного варіанту збудження СД, що беруть участь в компенсації. Під оптиРисьним варіантом збудження СД зазвичай приймають такий розподіл реактивної потужності Q між окремими СД, при якому сумарні втрати активної потужності, які залежать від виробітку і розподілу реактивної потужності, мініРисьні.

На практиці розподіл реактивної потужності між СД часто виробляють пропорційно або їх повної номінальної потужності $S_{ном}$, або пропорційно їх активної потужності $P_{ном}$. Цей принцип, як показують розрахунки, дає втрати активної потужності, близькі до мініРисьного значення.

Токи збудження окремих СД, що компенсують задану для них реактивну потужність, можуть бути визначені по кривим Q (ІВ), знятим дослідним шляхом.

Типові вузли схем автоматичного двигуна

3.1. Принципи автоматичного керування пуском і гальмуванням двигунів.

Найбільшого поширення у всіх галузях промисловості отриРиси електроприводи, що відносяться до першої групи класифікації за функціональним призначенням і забезпечують автоматичне керування процесами пуску, гальмування і реверсу двигунів. Їх пайову участь в загальній кількості використовуються в Україні електроприводів перевищує 80%. У таких системах застосовують контактні і безконтактні електричні апарати релейної дії. У силових ланцюгах, які живлять обмотки двигунів, використовуються електромагнітні контактори змінного і постійного струму, електромагнітні пускачі, тиристорні перемикачі. У ланцюгах управління різні реле часу, напруги, струму, частоти, потужності та ін. Команди на виконання тієї чи іншої операції подаються за допомогою кнопкових постів управління і т.п. Крім цього сигнали на пуск, зупинку,

У даної групи електроприводів автоматизація процесу пуску найбільш просто здійснюється для АД з короткозамкненим ротором: після подачі команди на пуск операції управління зводяться до включення обмоток двигуна на повну напругу мережі, тобто до прямого пуску двигуна. Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором і синхронні двигуни великої потужності (більше 100 кВт) запускаються при зниженій напрузі.

При пуску ДПС і АТ з фазним ротором автоматично вимикаються шаблі пускового реостата з ланцюга протікання струму якоря або ротора відповідно.

Автоматизація процесу гальмування працюючого двигуна при будь-якому вигляді електричного гальмування передбачає виконання двох основних операцій керування: 1 - після подачі команди на гальмування відбуваються перемикання в силових ланцюгах двигуна, що призводять до зміни напрямку крутного моменту двигуна, тобто що роблять його гальмівним; 2 - в кінці гальмування при швидкості близькою до нуля, двигун, який гальмує для зупинки, відключається від мережі і загальмовується механічним гальмом. В іншому випадку в головних ланцюгах виробляються перемикання, необхідні для реверсу двигуна, тобто для розгону в протилежному напрямку.

Системи автоматичного управління пуском, гальмуванням і реверсом, що реалізують зазначені раніше операції, конструктивно виконують у вигляді комплектних стандартизованих пристроїв - станцій управління. Крім названого, станції управління забезпечують можливість регулювання швидкості двигуна, тобто різні за величиною швидкості усталеного режиму роботи двигуна. На станціях управління встановлюються апарати електричного захисту головних ланцюгів і ланцюгів управління двигуном, командоапарати, пускорегулювальної та гальмівні резистори, токоограничуючі реактори і інші елементи розташовують найчастіше поза станцій управління.

У електричних апаратів станцій керування передбачені запасні контакти, які можуть бути використані для сигналізації і різних блокувань. Можливо також підключення в ланцюзі управління станцій контактів кінцевих вимикачів, технологічних датчиків і апаратів інших автоматичних пристроїв.

В електричних схемах станцій управління широко застосовуються типові вузли управління і захисту. Принципи побудови типових вузлів розглянемо на прикладі реостатного пуску ДПС з незалежним збудженням з двома ступенями пускового опору. Схема включення двигуна наведена на рис. 3.1а, діаграма швидкості двигуна ω і струму якоря $I_{я}$ - на рис.3.1б.

В першу чергу підключається до джерела напруги U_B обмотка збудження LM . Струм збудження I_B , протікаючи по LM , створює магнітний потік Φ . після цього до джерела якорної напруги U підключається якорний ланцюг двигуна.

При розімкнутих контактах контакторів прискорення $KY1$ і $KY2$ в момент часу $t = 0$ замикається контакт контактора лінійного $KЛ$. Пусковий струм якоря $I_{Я1}$ протікає по обидва сходами пускового опору $R_{ДП1}$ і $R_{ДП2}$. Якщо величина пускового опору $R_{П} = R_{ДП1} + R_{ДП2}$ обрана правильно, то пусковий струм $I_{Я1} = \frac{U}{R_{я} + R_{д} + R_{ДП1} + R_{ДП2}}$ не перевищуватиме допустимого значення $I_{Я1} \leq I_{Я доп} \leq 2,5 I_{Я н}$. На якорі двигуна при швидкості $\omega = 0$ починає діяти пусковий момент $M_{П}$. Якщо $M_{П}$ більше моменту опору M_c , момент динамічний має позитивну величину $M_{Д} > 0$, то відповідно до рівнянням руху електроприводу при пуску $M_{П} - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$, Величина кутового прискорення $\frac{d\omega}{dt}$ буде позитивна і швидкість обертання якоря двигуна ω буде зростати.

струм $I_{Я1} = \frac{U}{R_{я} + R_{д} + R_{ДП1} + R_{ДП2}}$ не перевищуватиме допустимого значення $I_{Я1} \leq I_{Я доп} \leq 2,5 I_{Я н}$. На якорі двигуна при швидкості $\omega = 0$ починає діяти пусковий момент $M_{П}$. Якщо $M_{П}$ більше моменту опору M_c , момент динамічний має позитивну величину $M_{Д} > 0$, то відповідно до рівнянням руху електроприводу при пуску $M_{П} - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$, Величина кутового прискорення $\frac{d\omega}{dt}$ буде позитивна і швидкість обертання якоря двигуна ω буде зростати.

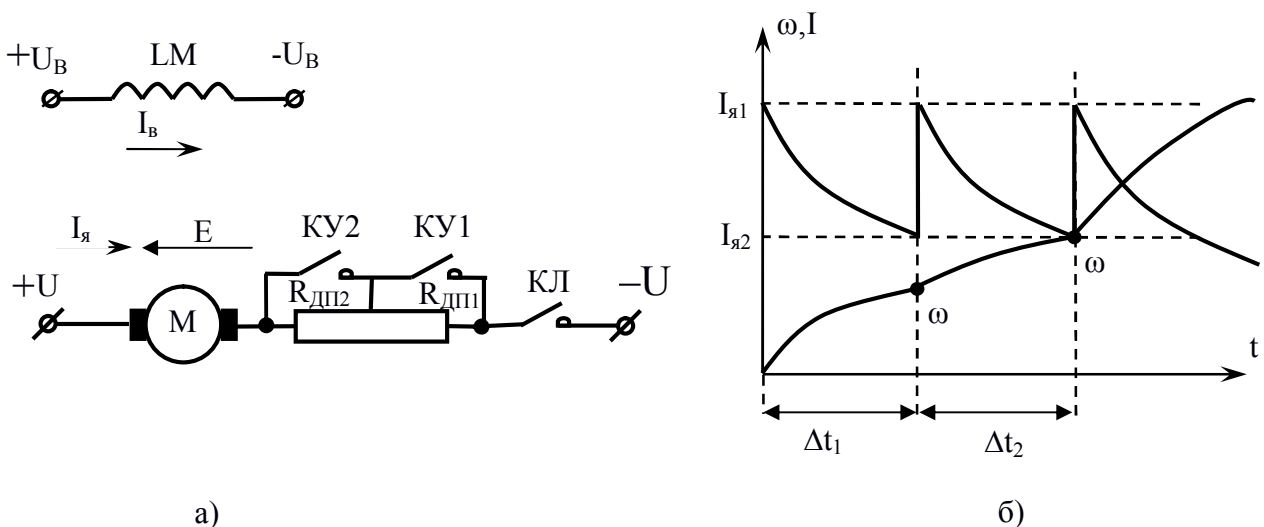


Рис. 3.1. а) схема включення двигуна; б) діаграма швидкості двигуна ω і струму якоря $I_{я}$.

В обмотці якоря двигуна, що обертається в магнітному потоці Φ , буде знаходитися е.р.с. обертання $E = k\omega\Phi$. Як впливає зі схеми включення двигуна на рис. 3.1а, е.р.с. обертання E по відношенню до джерела якорного напруги U спрямована зустрічно. Тому зі збільшенням ω буде збільшуватися E і зменшуватися якорний струм $I_{я1} = \frac{U - E}{R_{я} + R_{д} + R_{дп1} + R_{дп2}}$. Зі зменшенням $I_{я}$ буде зменшуватися і крутний момент двигуна $M = k\Phi I_{я}$. Це, в свою чергу призведе до зменшення динамічного моменту

$M_{д} = M - M_{с}$ і швидкості ω . Як впливає з діаграми на рис. 3.1б після закінчення проміжку часу Δt_1 двигун досяг швидкості ω_1 , а якорний струм величини $I_{я2}$. Момент, що обертає двигуна M став рівним $M_{с}$, тобто $M_{д} = 0$ і тому збільшення швидкості обертання якоря двигуна припинилося. Двигун з перехідного режиму роботи з $\frac{d\omega}{dt}$ при $\omega = \omega_1$ перейшов в усталений режим з $\frac{d\omega}{dt} = 0$.

Для того, щоб продовжити розгін, необхідно замкнути контакт першого контактора прискорення РДП1 КУ1 і зашунтувати першу сходинку пускового опору РДП1. При цьому якорний струм практично миттєво збільшиться до значення $I_{я1}$, що призведе до появи позитивного $M_{д}$ і зростання швидкості. Після закінчення проміжку часу Δt_2 двигун досягне швидкості ω_2 , а якорний струм зменшиться до величини $I_{я2}$. Двигун перейде в усталений режим роботи зі швидкістю ω_2 . Для продовження розгону необхідно замкнути контакт другого контактора прискорення КУ2 і зашунтувати РДП2. Знову збільшиться $I_{я}$, з'явиться $M_{д} > 0$ і надалі зростатимуть швидкості, який припиниться при $M = M_{с}$.

З графіків зміни у часі швидкості і струму ДПС при реостатному пуску з 2 ступенями пускового опору видно, що автоматичне вимикання (шунтування) ступенів пускового опору повинно проводитися:

1. через певні проміжки часу ($\Delta t_1, \Delta t_2$);
2. при певних значеннях швидкості (ω_1, ω_2);
3. при певній величині струму $I_{я2}$.

Таким чином, автоматичне керування пуском, суть якого полягає в шунтуванні ступенів пускового реостата, може бути здійснений:

- 1 - в функції часу;
- 2 - в функції швидкості;
- 3 - в функції струму.

Управління у функції часу передбачає наявність у схемі автоматичного управління реле часу, що налаштовуються на відлік заданих витягів часу.

Управління у функції швидкості виробляється за допомогою реле, контролюючих швидкість двигуна безпосередньо або побічно.

Управління у функції струму реалізується застосуванням реле мініРисьного струму. Всі апарати подають команди на включення контакторів прискорення.

Управління гальмуванням може проводитися в функції тих же самих величин і засобів автоматизації, що і під час пуску.

Все сказане справедливо для ДПС з послідовним збудженням і АТ з фазним ротором.

ЛЕКЦІЯ 13

3.2. Типові вузли схем автоматичного управління пуском ДПС.

Кожен з принципів автоматичного управління пуском і гальмуванням реалізується в схемах електроприводів типовими вузлами.

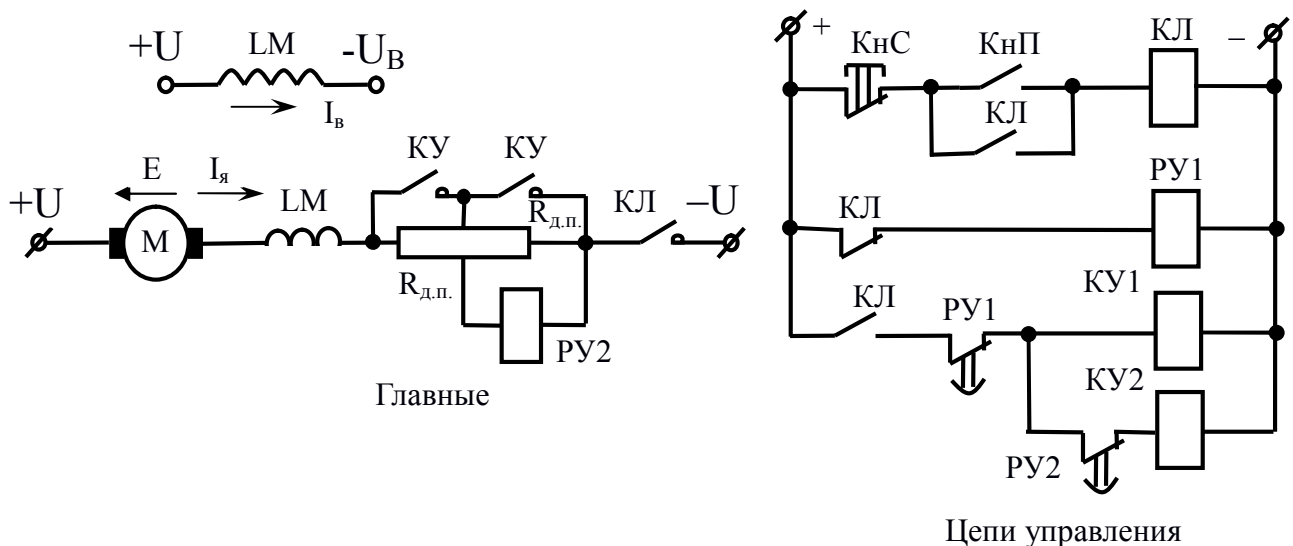


Рис. 3.2. Типовий вузол управління пуском ДПС в функції часу.

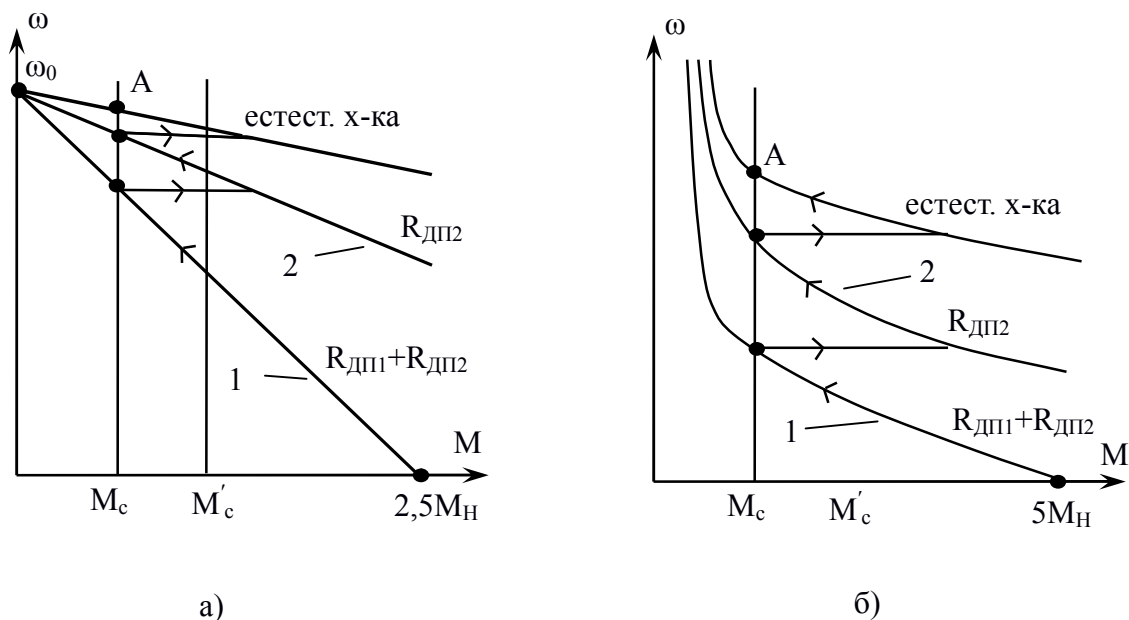


Рис. 3.3. а) механічні характеристики ДПС з незалежним збудженням;
 б) механічні характеристики ДПС з послідовним збудженням.

Типовий вузол, що забезпечує автоматичний пуск в функції часу ДПС з незалежним і послідовним збудженням з двома ступенями пускового опору $R_{ДП1}$ і $R_{ДП2}$ наведено на рис. 3.2. Механічні характеристики двигунів, відповідні схемою включення на рис. 3.2, наведені на рис. 3.3.

При подачі напруги на головні ланцюги і ланцюги управління включається електромагнітне реле часу першого ступеня РУ1 і, розмикаючи свій контакт, виключає можливість включення контакторів прискорення КУ1 і КУ2.

При натисканні на КНП включається КЛ, який своїм головним контактом підключає до напруги якірний ланцюг двигуна, замикаючими контактами шунтує КНП (КЛ стає на саможивлення) і готує ланцюг включення КУ, а розмикальним контактом розриває ланцюг харчування котушки реле РУ1 і реле починає відлік витримки часу. Двигун починає розганятися по реостатній

механічної характеристики 1. При протіканні пускового струму по РДП1 спрацьовує реле часу другого ступеня РУ2, тому що падіння напруги від пускового струму на РДП1 велике. Контакт реле РУ2 розмикається в ланцюзі живлення котушки контактора КУ2. Реле часу РУ1 після закінчення заданої витримки часу відключається і замикає свій контакт. Отримує харчування котушка КУ1. Контактор КУ1 включається і закорачиває РДП1. Двигун переходить на механічну реостатно характеристику 2. Котушка реле РУ2 втрачає харчування. Реле РУ2 відрахувавши задану витримку часу відключається і замикає свій контакт. Чи включається КУ2, закорачиває РДП2 і двигун переходить на природну характеристику. Гідність управління у функції часу - простота і надійність реле часу, зручність регулювання їх уставок, застосування однотипних реле для двигунів різної потужності. Крім того, при збільшенні M_c до величини M_c і тієї ж витримці часу реле РУ1 двигун на першій характеристиці розженеться до меншій швидкості, але кидок моменту при перемиканні буде великим. Тому середній динамічний момент при пуску залишиться приблизно тим же і майже не зміниться і загальний час пуску. За керування у функції часу на відміну від управління у функції швидкості або струму, відсутня небезпека «застрявання» двигуна на першій характеристиці при $M_c > M_c$. Все це зумовило широке поширення управління в функції часу.

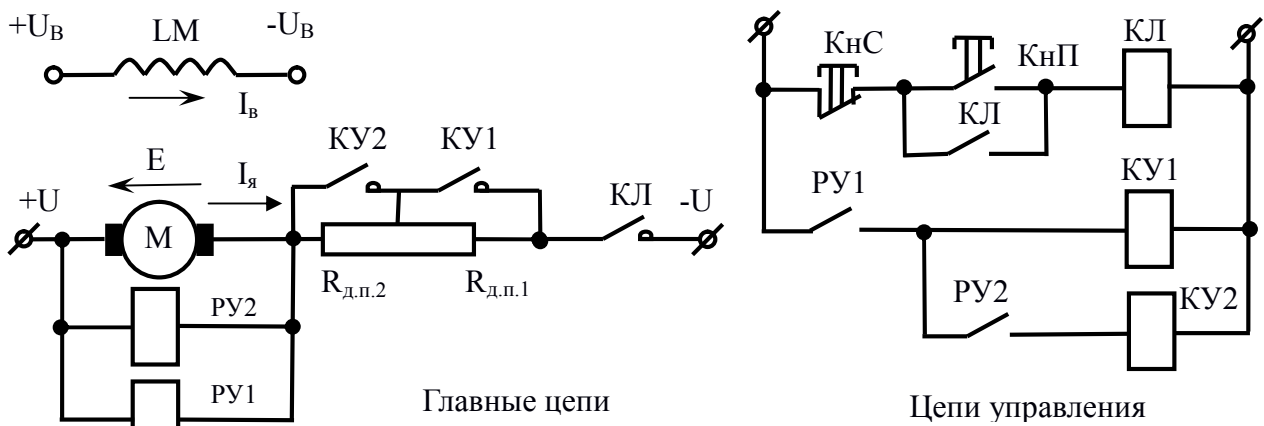
Типовий вузол, що забезпечує автоматичний пуск ДПС з незалежним збудженням в функції швидкості в два ступені, механічні характеристики двигуна і діапазону напруги на затискачах якоря двигуна наведені на рис. 3.4.

Котушки РУ1 і РУ2 підключені на затискачі якоря двигуна, тобто на напругу $U_{\text{я}}$, яке відрізняється від E тільки на величину падіння напруги від струму якоря на опорі якоря $R_{\text{я}}$. Отже РУ1 і РУ2 є апаратами, контролюючими е.р.с. обертання двигуна. Оскільки е.р.с. при постійному магнітному потоці пропорційна швидкості обертання двигуна ω $E = k\Phi n\omega$, то розглянутий вузол здійснює керування пуском в функції швидкості при її непрямому контролі.

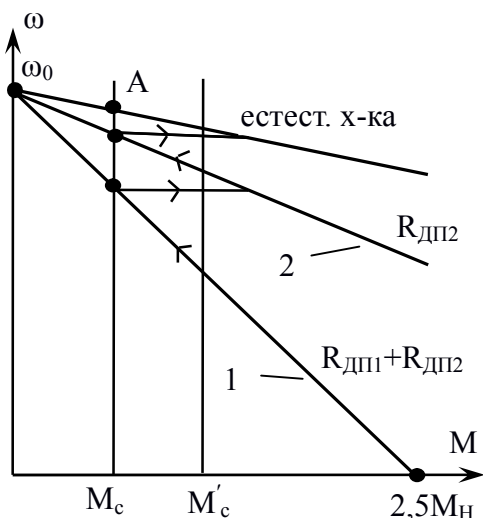
При натисканні КНП включається КЛ. Напруга на котушках РУ1 і РУ2 Рисо і рівне падінню напруги в якорі від початкового кидка пускового струму

ПРЯ. Тому РУ1 і РУ2 спрацювати не можуть, контактори КУ1 і КУ2 відключені і в ланцюг якоря введено РДП1 + РДП2. Двигун запускається за влучним висловом 1. У міру збільшення швидкості двигуна зростає Е і $U_{я}$.

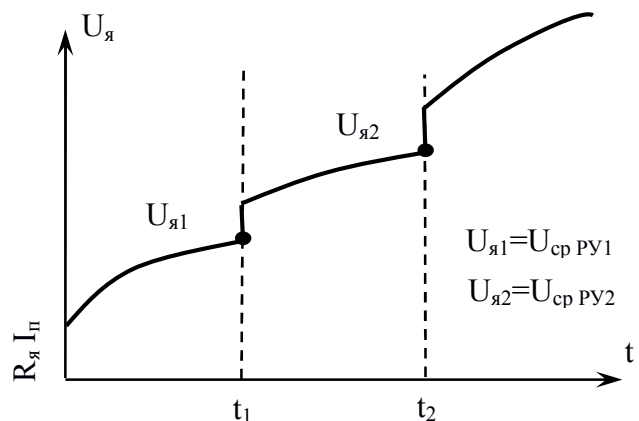
При $U_{я1} = U_{ср}$ РУ1 включається РУ1 і включає КУ1, який закорачиває першу сходинку опору Рдп. Двигун переходить на характеристику 2. Швидкість двигуна продовжує зростати, тому зростає і його е.р.с. При $U_{я2} = U_{ср}$ РУ2 включається РУ2, контактор КУ2, закорачивається другу сходинку опору РДП2 і двигун виходить на природну характеристику.



а)



б)



в)

Рис. 3.4. а) схема включення двигуна; б) механічні характеристики двигуна; в) діаграма напруги на затискачах якоря.

Типовий вузол, що забезпечує автоматичний пуск ДПС з незалежним збудженням в функції струму якоря $I_{я}$ і потоку Φ приведена на рис. 3.5.

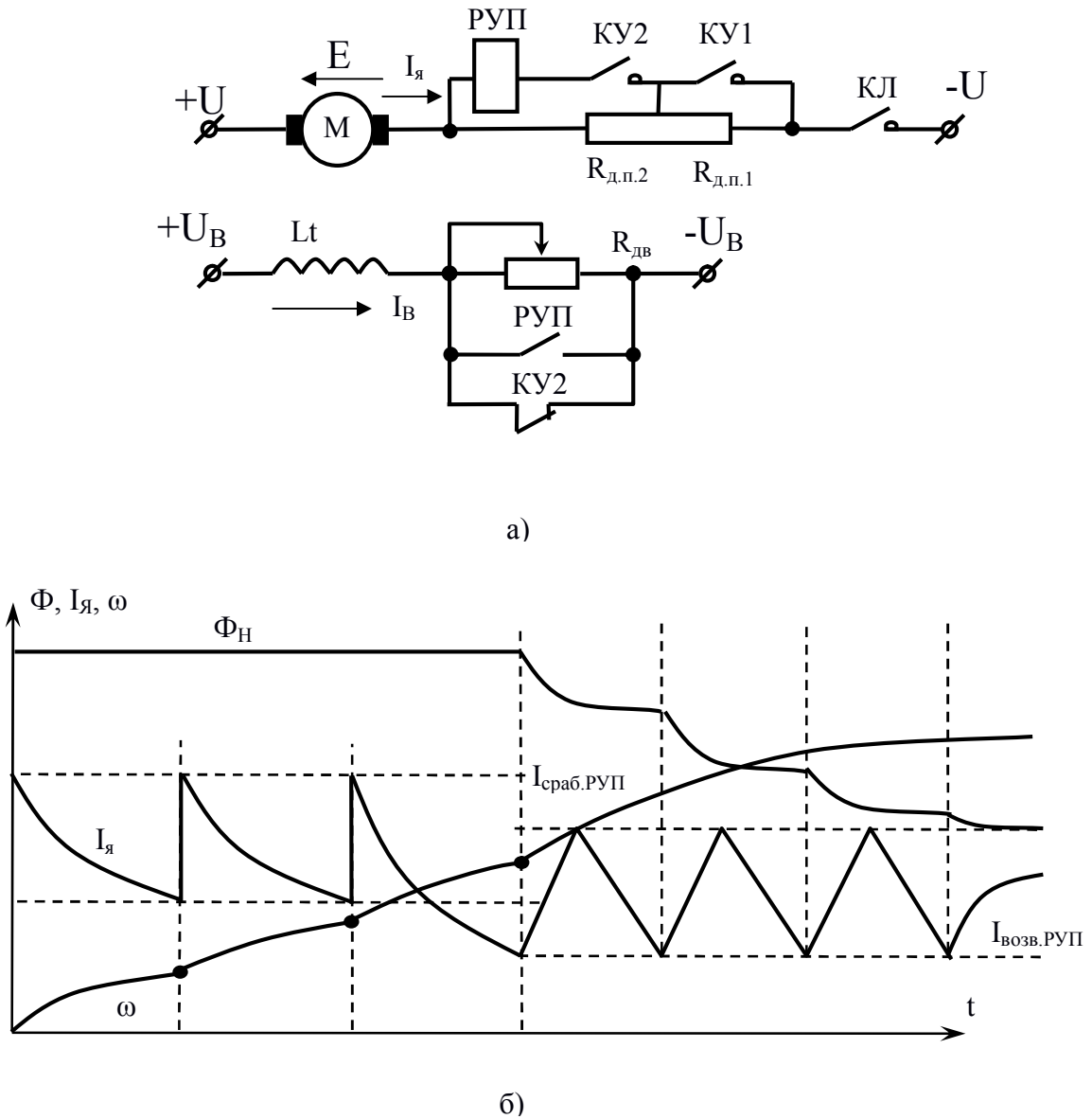


Рис. 3.5. а) схема включення двигуна; б) діаграма Φ , $I_{я}$, ω .

Типовий вузол застосовується при розгоні ДПС незалежного збудження шляхом ослаблення магнітного потоку для розширення діапазону регулювання ω . На Рисюнку не показані ланцюга управління контакторами $КЛ$, $КУ1$, $КУ2$. пуск до основної швидкості може здійснюватися одним з розглянутих способів. Контроль $I_{я}$ здійснюється струмовим реле $РУП$.

Робота типового вузла начитається після включення контактора КУ2 при виході М на природну характеристику. При замиканні головного контакту КУ2 від кидка якоря спрацьовує реле РУП і замикає свій контакт, шунтуючий реостат збудження Рдв. До цього він був закорочен розмикальним контактом КУ2. Отже магнітний потік двигуна Φ зберігається рівним Φ_H і двигун продовжує розгін по природній характеристиці. Коли I_a знизиться до $I_{\text{возв}} \text{ РУП}$, реле РУП відключається, розмикає свій контакт і в ланцюг LM вводиться Рдв. Відбувається ослаблення Φ і зростання ω . При цьому струм якоря збільшується і, коли він досягне значення $I_{\text{сраб}} \text{ РУП}$, контакт реле замикається. Починається посилення Φ і зниження I_a . Швидкість М буде продовжувати рости, тому що за рахунок збільшення I_a $M > M_c$. При спаданні I_a до величини $I_{\text{возв}} \text{ РУП}$ реле РУП знову відкриє свій контакт, що спричинить за собою ослаблення Φ і т.д. Реле РУП спрацьовує кілька разів, перш ніж двигун досягне швидкості, заданої положенням повзунка реостата Рдв. I_a коливається в межах від $I_{\text{возв}} \text{ РУП}$ до $I_{\text{сраб}} \text{ РУП}$, тому спосіб управління отримав назву вібраційного. Він забезпечується і в тому випадку, коли повзунок реостата Рдв швидко переміщається в бік ослаблення Φ .

ЛЕКЦІЯ 14

3.3. Типові вузли схем автоматичного управління гальмуванням ДПС

Управління гальмуванням двигунів виробляється в функції часу, швидкості або струму із застосуванням тих же засобів, що і під час пуску. Автоматизація процесу гальмування при будь-якому його вигляді передбачає виконання двох основних операцій:

1 - після подачі команди на гальмування в силових ланцюгах працюючого двигуна виробляються перемикання, в результаті яких змінюється напрямок моменту двигуна;

2 - в кінці гальмування при ω близькою до нуля, М автоматично відключається від мережі, або в силових ланцюгах виробляються перемикання, необхідні для реверсу.

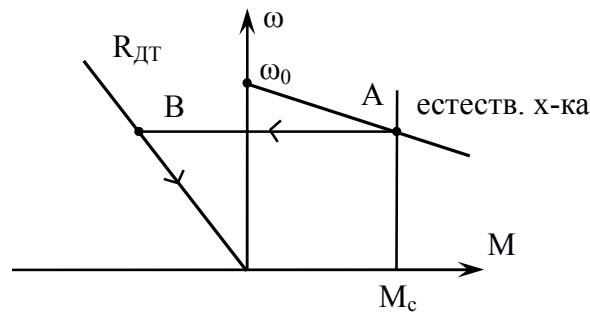
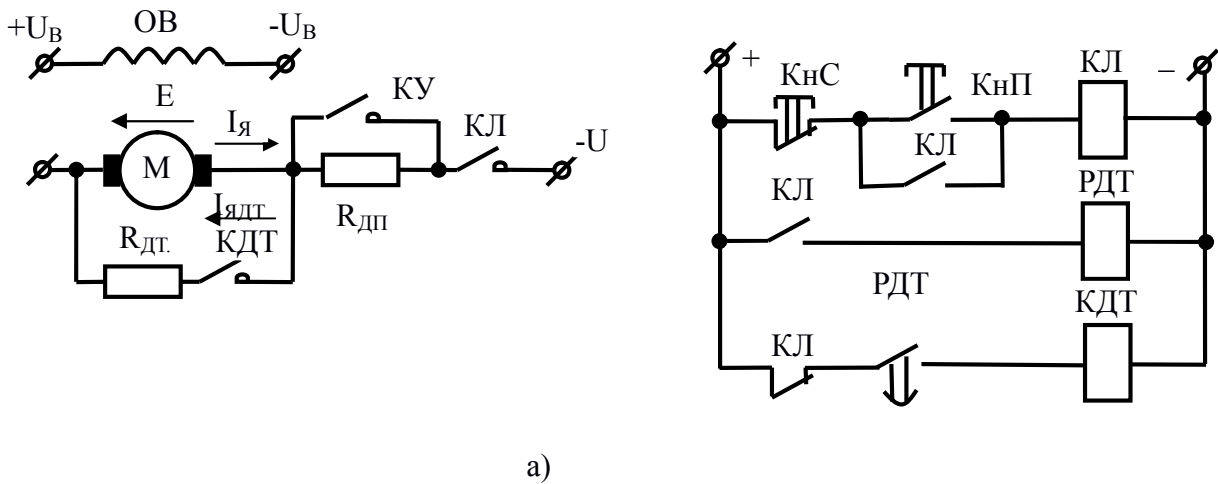


Рис. 3.6. Управління у функції часу динамічним гальмуванням ДПС:
а) схема включення двигуна; б) механічні характеристики.

Типовий вузол, що забезпечує автоматичне управління динамічним гальмуванням ДПС з незалежним збудженням в функції часу наведено на рис. 3.6а. Відповідні схемою включення двигуна механічні характеристики зображені на рис. 3.6б. Пуск двигуна показаний умовно в одну ступінь. Управління КУ при пуску може здійснюватися одним з раніше розглянутих методів. Після закінчення пуску двигун працює в точці А на природній характеристиці. Напрямок е.р.с. обертання E і струму якоря $I_{я}$ показано для рухового режиму роботи.

При пуску замикає контакт КЛ подає харчування на котушку реле динамічного гальмування РДТ і реле спрацьовує. Замикає контакт РДТ в ланцюзі живлення котушки контактора динамічного гальмування КДТ замкнеться. Однак КДТ подаватися не буде, тому що в ланцюзі харчування його котушки розімкнути контакт КЛ.

При натисканні на кнопку «стоп» КНС відключиться контактор КЛ і якірний ланцюг двигуна буде відключена від джерела якірного напруги U . Чи втратить живлення котушка РДТ. Однак реле РДТ, електромагнітне реле часу, залишиться у ввімкненому стані і буде вести відлік витримки часу. Включиться контактор КДТ і до затискачів якоря двигуна буде підключено опір динамічного гальмування РДТ. У утворився контурі під дією E буде протікати струм динамічного гальмування $I_{я}$ ДТ, спрямований зустрічно до току рухового режиму $I_{я}$. Тому змінить напрямок і стане гальмівним крутний момент двигуна. Двигун з точки А перейде в точку В на характеристиці динамічного гальмування і його швидкість буде знижуватися. Після закінчення відліку витримки часу реле РДТ відключиться, розімкне свій контакт в ланцюзі харчування котушка КДТ і відключить його.

Управління гальмуванням в функції часу застосовується тільки при реактивному M с. Уставка РДТ повинна бути рівною або трохи більшою часу гальмування. При активному M с його збільшення зменшує дійсне час гальмування в порівнянні з уставкой реле РДТ, що під дією активного M с вал M завжди повинен бути загальмований за допомогою механічного гальма.

Автоматичне управління динамічним гальмуванням ДПС з незалежним збудженням при активному M с здійснюється в функції швидкості при її прямому чи напрямому контролі. Схема типового вузла наведена на рис. 3.7.

Контроль е.р.с. здійснюється за допомогою реле напруги РДТ. Котушка РДТ включена на затискачі якоря двигуна. Пускові опору і КУ на схемі не показані. РДТ спрацьовує під час пуску при $U_{я} = 0,6 \div 0,7U_N$. При відключенні КЛ включається КДТ. На затискачі якоря підключається РДТ і двигун гальмується. Коли швидкість стане досить Рисої РДТ відпустить якір і

відключить КДТ. Вал двигуна вільний, коли електромагніт гальма ЕМТ отримує харчування. Тому котушка гальмівного контактора КТ отримує харчування як в руховому режимі, так і в гальмівному. РР запобігає відпадиння якоря в процесі перемикання КЛ і КДТ.

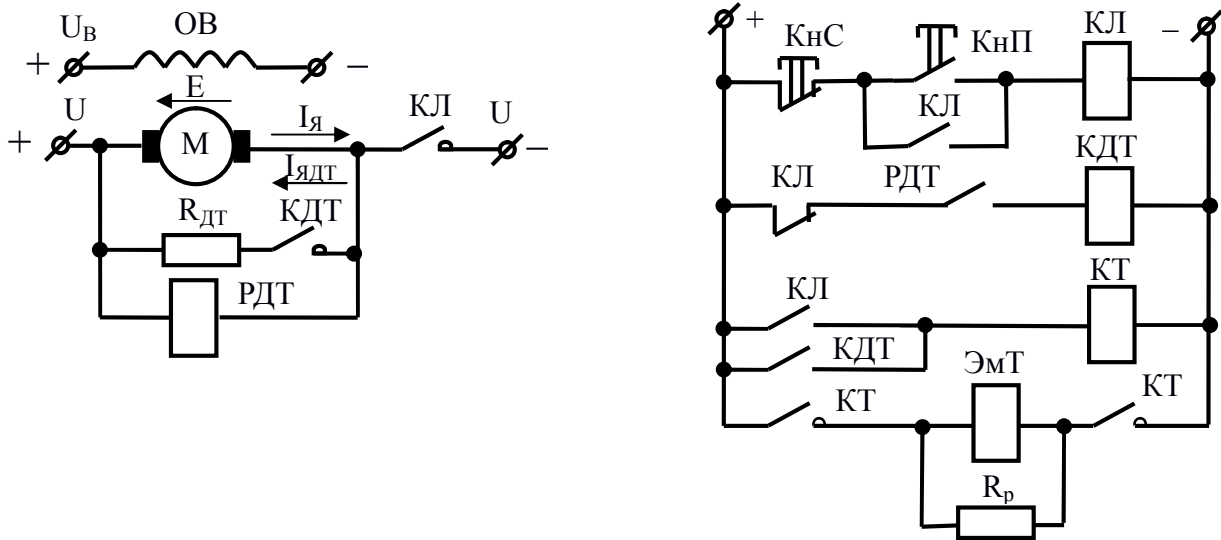


Рис. 3.7. Схема включення ДПС з незалежним збудженням в режимі динамічного гальмування.

При реверсивній схемою включення ДПС з незалежним або послідовним збудженням автоматичне керування процесом гальмування протвівоключенієм здійснюється в функції швидкості при непрямому контролі її величини по е.р.с. обертання двигуна. Схема включення двигуна наведена на рис. 3.8а. На ній показані обмотки незалежного LM1 і послідовного LM2 збудження. Механічні характеристики, відповідні схемою включення двигуна, наведені на рис. 3.8б, а схема ланцюгів управління на рис. 3.8в. У ній використовується не кнопкове, а більш зручне командоконтроллерное управління. Вертикальні штрихові лінії означають фіксовані положення рукоятки командоконтроллера. В даному випадку їх три: 0 - нульовий (середнє) положення; В - вперед; Н - назад. Точка на штриховий лінії під контактом означає, що контакт в даному положенні замкнутий. У нашому випадку команди командоконтроллера КК1 і КК2 в нульовому положенні рукоятки розімкнуті; в положенні «вперед» замкнутий КК1, а КК2 розімкнуті; в положенні «назад» - навпаки.

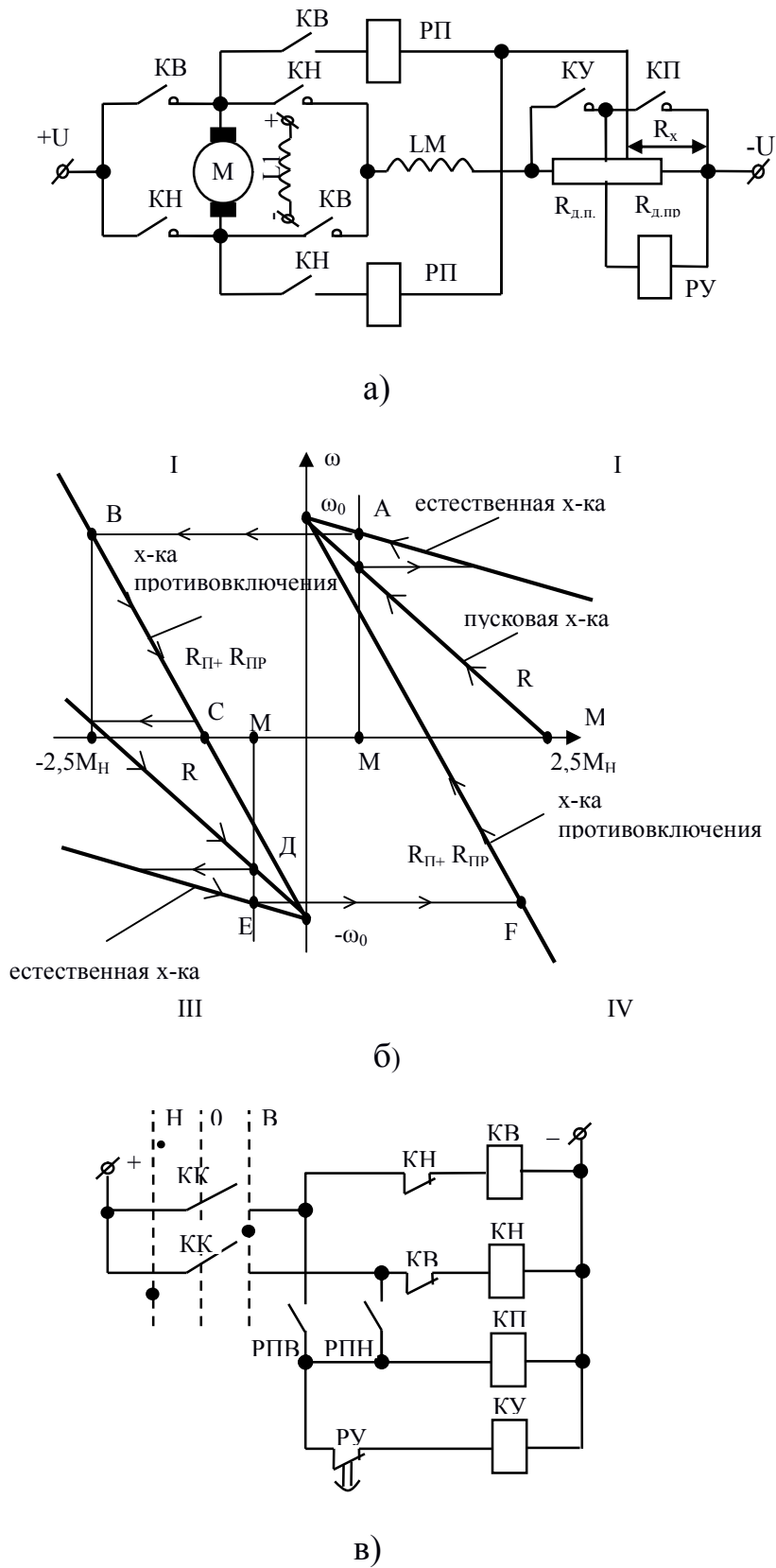


Рис. 3.8. а) реверсивна схема включення ДПС; б) механічні характеристики ДПС з незалежним збудженням; в) схема ланцюгів управління.

Пуск двигуна показаний умовно в одну сходинку в функції часу. Для пуску двигуна в напрямку «уперед» необхідно перевести рукоятку командоконтроллера з положення «0» в положення «В». Замкнеться контакт КК1 командоконтроллера і отримає харчування котушка контактора «уперед» КВ: контактор КВ спрацьовує і своїми головними контактами підключає якорь двигуна до джерела напруги U. Котушки контакторів протипротивовмиканням КП і прискорення КУ харчування не отримують, контактори відключені і їх головні контакти розімкнуті. Пусковий струм протікає по Рдп і РДПР. Тому двигун починає розгін за влучним висловом протипротивовмиканням в I квадраті. З'являється падіння напруги від пускового струму на РДПР і отримує харчування котушка реле РУ. Включиться реле прискорення РУ і розімкне свій контакт в ланцюзі живлення котушки КУ.

Замикає контакт КВ подає харчування на котушку реле протипротивовключення «вперед» РПВ. Реле РПВ спрацьовує і своїм замикаючим контактом подає харчування на котушку КП. Контактор КП спрацьовує і своїм головним контактом шунтує РДПР. Двигун з характеристики протипротивовключення переходить на пускову характеристику. Одночасно з цим втрачає харчування котушка РУ і реле починає відлік витримки часу. Після закінчення витримки часу реле РУ відключиться, його контакт в ланцюзі живлення котушки КУ замкнеться і контактор прискорення КУ спрацює. Головний контакт КУ замкнеться і зашунтує Рдп. Двигун перейде на природну характеристику, де буде працювати в точці А.

Для переключення двигуна в режим гальмування протипротивовключенням необхідно рукоятку командоконтроллера з положення «В» перевести в положення «Н». При переході рукоятки через положення «0» обидва контакти командоконтроллера виявляються роз'єднаними, тому котушки КВ, КП, КУ втрачають харчування і контактори відключаються. У ланцюг протікання якорного струму включаються Рдп і РДПР, тобто двигун готується до режиму гальмування протипротивовключенням. У положенні рукояті «Н» замикається контакт КК2. Отримує харчування котушка контактора «назад» КН і контактор

КН спрацьовує. Головні контакти КН замикаються і змінюють полярність напруги на затискачах якоря двигуна. Змінюється напрямок якірного струму і крутного моменту двигуна. Він стає гальмівним. Двигун з точки А переходить в точку В на характеристиці противовмиканням. Замикає контакт КН в ланцюзі живлення котушки реле противовмиканням «назад» РПН замкнеться, однак реле РПН подаватися не буде. Це забезпечується підключенням правого за схемою виведення котушки РПН, тобто величиною R_{xx} . Котушки КП і КУ харчування не отримують, контактори відключені і двигун гальмується за влучним висловом противовмиканням. Реле РУ включено і його контакт в ланцюзі живлення котушки КУ розімкнута.

Зі зменшенням швидкості двигуна напруга на котушці РПН збільшується. При швидкості, близькій до нуля, РПН включиться і своїм замикаючим контактом подає харчування на котушку КП. Контакт РПН спрацює і своїм головним контактом зашунтує РДПР. Двигун перейде на пускову характеристику. Втратить живлення котушка РУ і реле почне відлік витримки часу. Двигун по пусковий характеристиці загальмується і відразу ж почне розгін в напрямку «назад». Після закінчення витримки часу РУ відключиться і включить КУ. Головний контакт КУ зашунтує Рдп, двигун перейде на природну характеристику, де буде працювати в точці Е.

Для ДПС з послідовним збудженням процеси аналогічні. Відповідні характеристики наведені на рис. 2.13а.

Напруга на котушці РПВ (Н) визначиться зі співвідношення $U_{РПВ} = U - I_{я}R_x$; Струм при гальмуванні противовключенням визначається як

$$I_{я} = \frac{U + E}{R_{ДП} + R_{ДПР}} = \frac{U + k\Phi \omega}{R_{ДП} + R_{ДПР}}.$$

Вирішуючи спільно два останніх вирази, знайдемо залежність напруги на котушці реле РПВ від швидкості

$$U_{РПВ} = U - \frac{U + k\Phi \omega}{R_{ДП} + R_{ДПР}} R_x.$$

Величина U , $R_{дп}$, $R_{дпр}$, Φ і $R_x = \text{const}$, тому $U_{рпв}$ буде лінійно залежати від швидкості ω .

Розрахувати точку приєднання РПВ, тобто величину R_x , можна з умови, що при максимальній кутовій швидкості напруга на котушці РПВ дорівнює нулю

$$U_{рпв} = U - I_{я} R_x = 0; \quad \text{звідки} \quad R_x = \frac{U}{I_{я}};$$

ток на початку гальмування буде дорівнює

$$I_{я} = \frac{U + E_{\max}}{R_{дп} + R_{дпр}}.$$

тоді

$$R_x = \frac{R_{дп} + R_{дпр}}{2} \cdot \frac{U}{U} = \frac{R_{дп} + R_{дпр}}{2}.$$

Оскільки $U \approx E_{\max}$ отримаємо $R_x = 0,5 (R_{дп} + R_{дпр})$

Напруга на котушці РПВ при зменшенні швидкості зростає. При $\omega = 0$ і $R_x = 0,5R$ маємо

$$U_{рпв} = U - \frac{U + k\Phi\omega}{R} R_x = U - \frac{U [0,5(R_{дп} + R_{дпр})]}{R_{дп} + R_{дпр}} = 0,5U.$$

Таким чином, якщо точку приєднання РП вибрати відповідно до $R_x = 0,5R$ а напруга спрацьовування $U_{ср.РП} = 0,5U$, то буде забезпечений розглянутий вище порядок роботи схеми.

Вже згадана схема повністю симетрична, тому отримані результати справедливі як для реле РПВ так і для реле РПН.

ЛЕКЦІЯ 15

3.4. Типові вузли схем автоматичного управління пуском двигунів змінного струму.

Графіки зміни в часі швидкості і струму двигуна на рис. 3.1, побудовані для ДПС справедливі і для АТ з фазним ротором, тому що робоча частина механічної характеристики АД лінійна як і механічна характеристика ДПС з

незалежним збудженням; з ростом опору в ланцюзі ротора нахил робочої частини характеристик до осі абсцис збільшується. Тому автоматичне керування пуском і гальмуванням двигунів змінного струму здійснюється в функції тих же величин і з використанням аналогічних електричних апаратів.

Типовий вузол, що забезпечує автоматичний пуск АД з фазним ротором в дві ступені в функції часу, наведено на рис. 3.9.

Ланцюги управління живляться від мережі постійного струму. При великій частоті включення двигуна використовують контактори змінного струму з котушками постійного струму і електромагнітні реле часу, електричні апарати постійного струму. Схема відрізняється від схеми управління пуском ДПС лише тим, що котушка реле часу РУ2 включена в ланцюг управління через

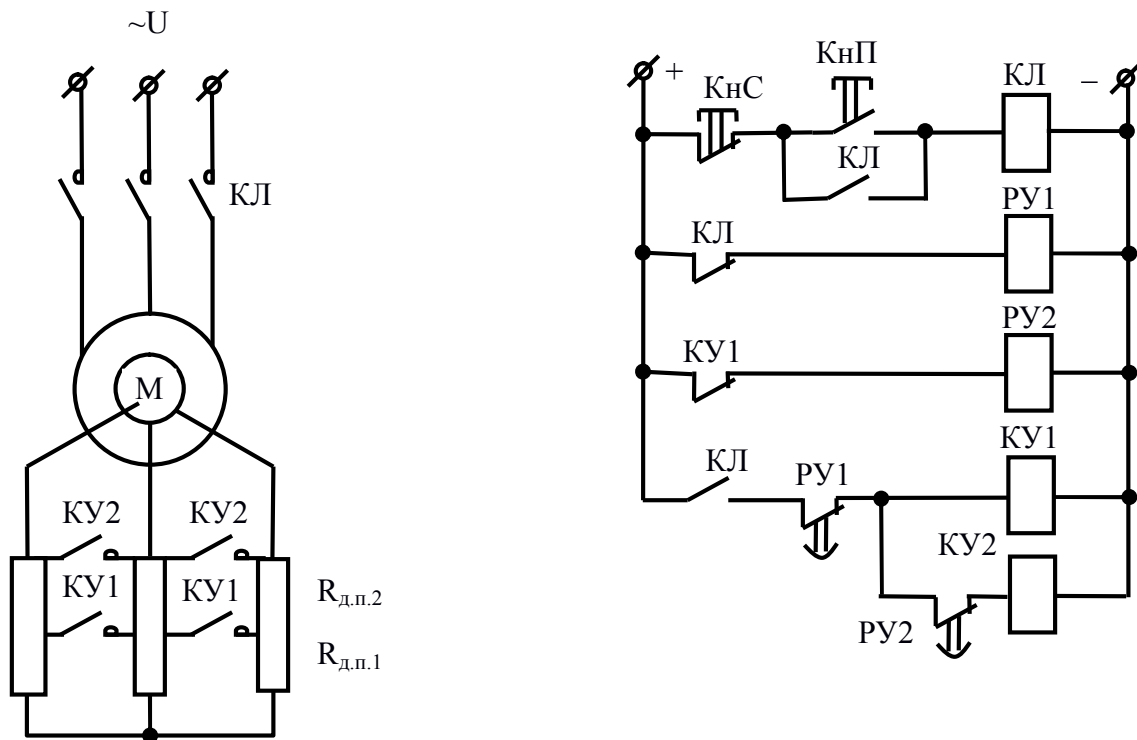


Рис. 3.9. Схема включення АД з фазним ротором.

розмикає контакт КУ1. Таким чином РУ2 включається при подачі напруги на схему, а відлік витримки часу починається РУ2 з моменту розмикання контакту контактора КУ1.

Для СД завжди застосовують асинхронний пуск. Тому в статорних ланцюгах СД здійснюються так само перемикання, як і при пуску АД: - статорні обмотки включаються на повну напругу (прямий пуск) або на знижену напругу з подальшим перемиканням в функції часу на повне.

Специфічна особливість пуску СД - управління подачею в обмотку збудження постійного струму від збудника. В якості останніх використовують генератори постійного струму або тиристорні перетворювачі. Для швидкохідних СД вал збудника з'єднують з валом двигуна, для тихохідних СД привід збудника виконують на підставі АД з короткозамкненим ротором.

Якщо дозволяють живить мережу і двигун, то застосовують прямий пуск з постійно підключеним збудником при M_c на валу СД не перевищує $0,4M_n$. Якщо $M_c > 0,4M_n$, то збудник підключається на підсинхронних швидкості.

При пуску на зниженій напрузі розрізняють: «легкий» пуск, при якому порушення подається до включення обмотки статора на повне напруга (при невеликому M_c) і «важкий» пуск - подача збудження відбувається при повній напрузі на обмотці статора (при значному M_c).

На Рисюнку 3.10.а - схема прямого пуску з наглухо підключеним збудником В. Управління пуском полягає у включенні лінійного вимикача ВЛ або контактора КЛ. У міру розгону M напруга V росте, росте і струм збудження. При підсинхронних швидкості він виявляється достатнім для входження M в синхронізм.

Схеми на Рисюнку 3.10.б і 3.10.в застосовують при більш важких умовах пуску. Починається пуск з включення ПЛ (КЛ). Обмотка збудження ОВМ або замкнута на розрядний опір R_p , або підключена до збудника послідовно з R_p . Подачею збудження можна управляти в функції швидкості (ковзання) або струму статора M . Перший спосіб рис. 3.10.б. реалізують за допомогою електромагнітного реле часу постійного Його котушка включена через діод D на частину R_p . При підключенні обмотки статора M до мережі в обмотці збудження наводиться змінна е.р.с. За котушці РПВ почне протікати випрямлений діодом струм ікат у вигляді імпульсів, амплітуда і частота яких

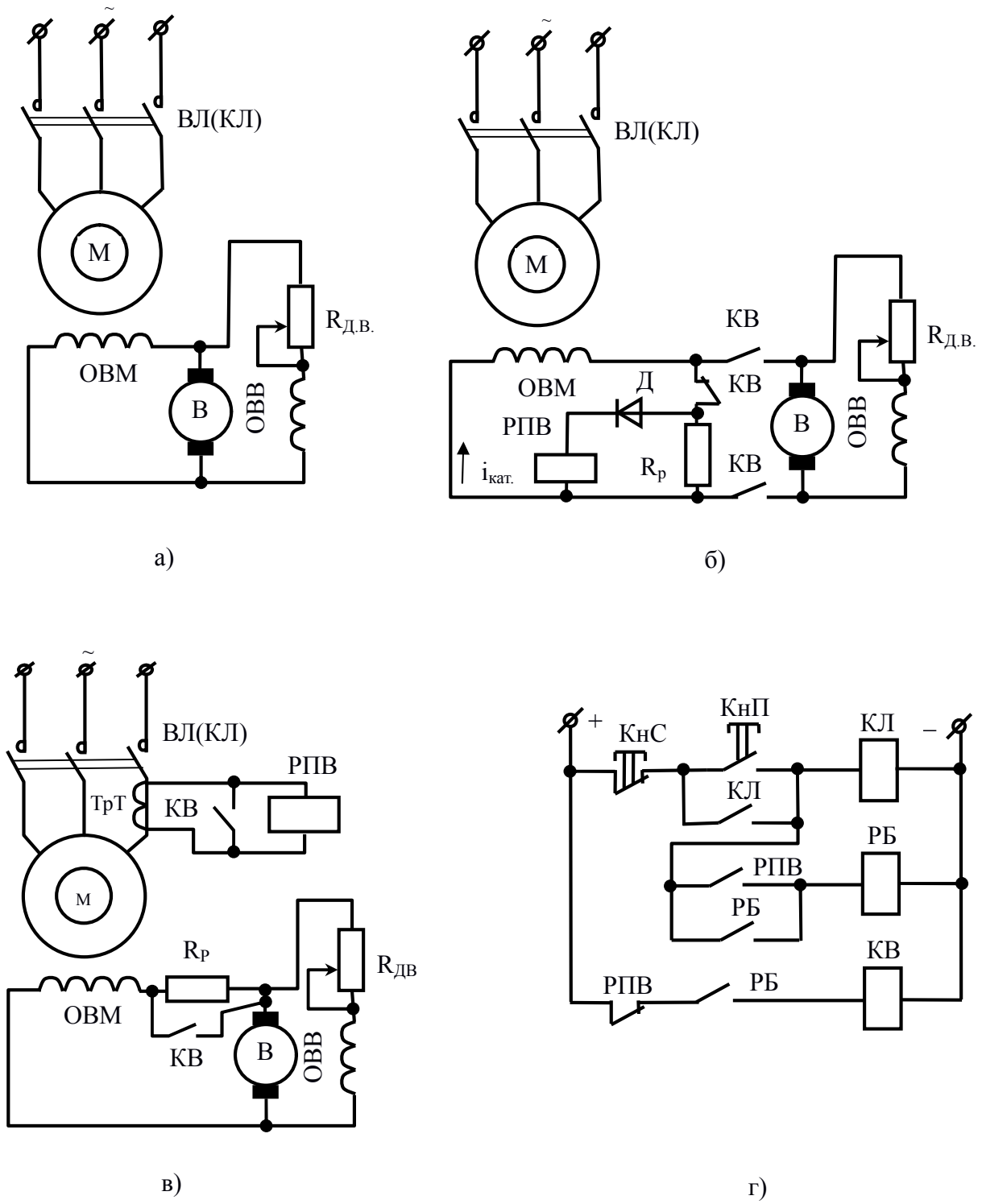


Рис. 3.10. а) схема прямого пуску;
 б) схема пуску в функції швидкості;
 в) схема пуску в функції струму;
 г) схема ланцюгів управління.

пропорційні ковзанню s . На самому початку пуску, коли $s = 1$, амплітуди імпульсів струму ікат досить великі а тимчасові інтервали між ними Рісі, тому РПВ включиться. У міру розгону M амплітуда імпульсів зменшується, а тимчасові інтервали між ними збільшуються. При підсинхронних швидкості ці інтервали стануть рівними часу витримки і РПВ відключиться. Його контакт замкнеться і включить КВ. Через розкиду витягів РПВ схема не забезпечує чіткого входження M в синхронізм.

В основному застосовують управління у функції струму статора M (рис. 3.10.в.). Струмове реле РПВ отримує харчування від трансформатора струму ТРП, включеного в фазу обмотки ланцюга. Відомо, що при асинхронному пуску струм статора в зоні підсинхронних швидкості різко зменшиться. Ця обставина і використовують для фіксації моменту подачі збудження. При натисканні на КНП спрацьовує КЛ. Від кидка пускового струму спрацьовує і РПВ. Його розмикає контакт в ланцюзі котушки КВ розмикається, і замикає контакт включає блокувальний реле РБ. РБ стає на саможивлення і готує ланцюг включення КВ. На підсинхронних швидкості струм статора знижується, РПВ відключається. Чи включається КВ. Його контакти закорачивається R_p і котушку РПВ, щоб РПВ не спрацьовало від кидка струму статора при входженні M в синхронізм.

ЛЕКЦІЯ 16

3.5. Типові вузли схем автоматичного управління гальмуванням двигунів змінного струму

Типовий вузол, що забезпечує автоматичне управління динамічним гальмуванням АД з фазним ротором в функції часів, наведено на рис. 3.11.

Вузол застосовується при відсутності ланцюга постійного струму. Дві обмотки статора живляться через випрямляч Вп. Управління пуском умовно показано в один щабель в функції часу. При роботі M включені КЛ і КУ. Реле часу РДТ також включено і його контакт в ланцюзі котушки КДТ замкнутий.

При натисканні на КНС КЛ і КУ відключаються. Статор відключається від мережі. В ротор вводиться Рдп .. Який Замикає контакт КНС включає КДТ, який своїми головними контактами підключає дві обмотки статора до випрямителя Вп. М переходить в режим динамічного гальмування. Втрачає живлення котушка РДТ. Після закінчення витримки часу розмикається замикає РДТ в ланцюзі котушки КДТ і КДТ відключається. Гальмування закінчується. Умови застосування як і для ДПС

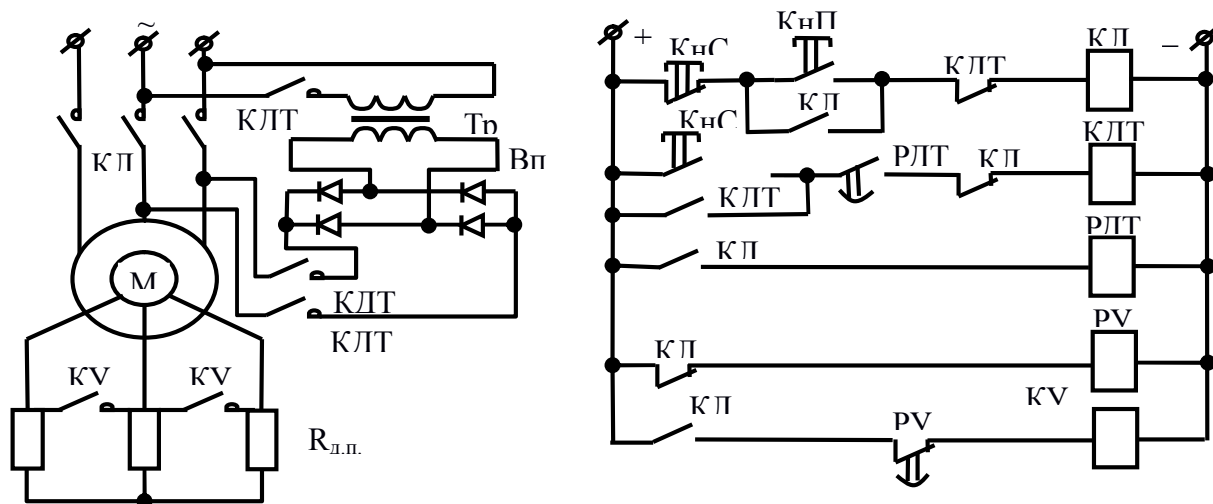


Рис. 3.11. Схема включення АТ з фазним ротором в режимі динамічного гальмування

Автоматичне управління процесом гальмування противовключением АД з короткозамкненим ротором здійснюється за допомогою реле контролю швидкості РКС. Схема типового вузла наведена на рис. 3.12.

Схема застосовується для зупинки реверсивного двигуна. При роботі двигуна переключаючий контакт реле контролю швидкості РКС в залежності від напрямку обертання знаходиться в положенні 1-3 («вперед») або 1-2 («назад»). Введення РКС в дію здійснюється тільки при подачі команди на зупинку. Це забезпечується блокувальним реле РБ. В іншому ця схема забезпечує управління реверсивним АТ з к.з. ротором. Припустимо, що М працював в напрямку «уперед», тобто був включений КВ і перемикає контакт РКС замкнутий в положенні 1-3. При натисканні на КНС включається РБ. Розмикаючий контакт РБ відключає КВ, а замикає контакт РБ через контакти 1-

З РКС та замкнувшись контакт КВ включить КН. Кнопка КНС може бути відпущена тому РБ стає на саможивлення. Двигун переходить в режим гальмування перемикачем. При $\omega \approx 0$ розмикається контакт 1-3 реле РКС та статор відключається від мережі. При обертанні двигуна в напрямку «назад» і натисканні на КНС схема діє аналогічно

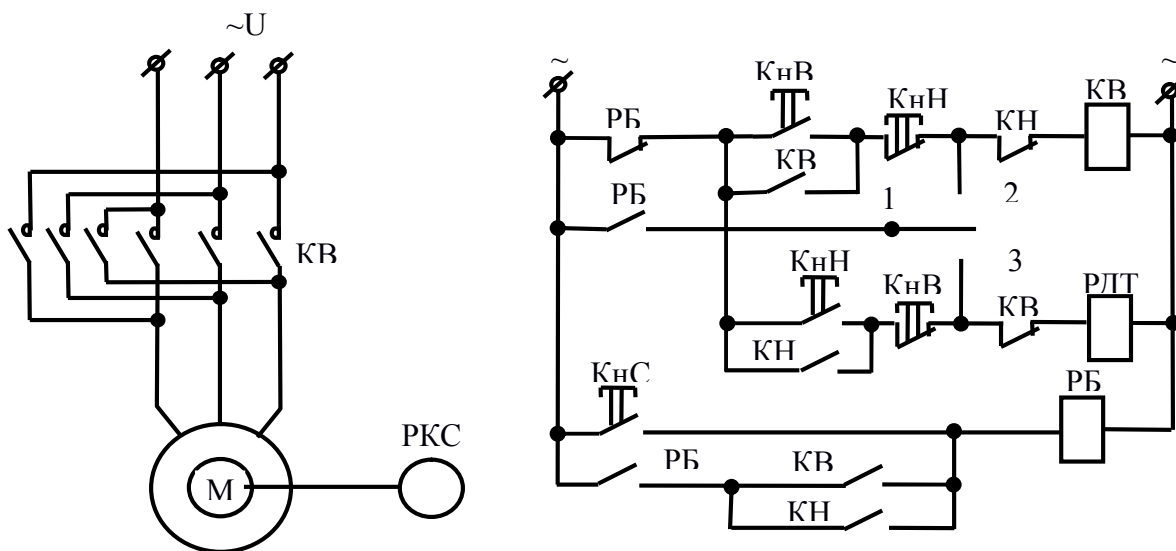


Рис. 3.12. Схема включення АД з короткозамкненим ротором в гальмуванням противовключением

Якщо необхідно реверсувати М без зупинки, то натискають на кнопку протилежного напрямку. Наприклад, М працював в напрямку «уперед». При натисканні на КНН її розмикає контакт відключить КВ, а потім включиться КН. М переходить в режим гальмування противовключением, а потім розганяється в напрямку «назад», тому що котушки КН продовжать отримувати харчування через розмикає контакт РБ до тих пір, поки не буде натиснута кнопка КНС. За допомогою РКС можна управляти і динамічним гальмуванням АД.

Схема буде аналогічна розглянутої. Замість замикаючого контакту реле РДТ в ланцюзі живлення котушки КДТ необхідно включити розмикає контакт РКС.

Типовий вузол, що забезпечує керування процесом гальмування противовключением АТ з фазним ротором при непрямому контролі швидкості двигуна наведено на рис. 3.13

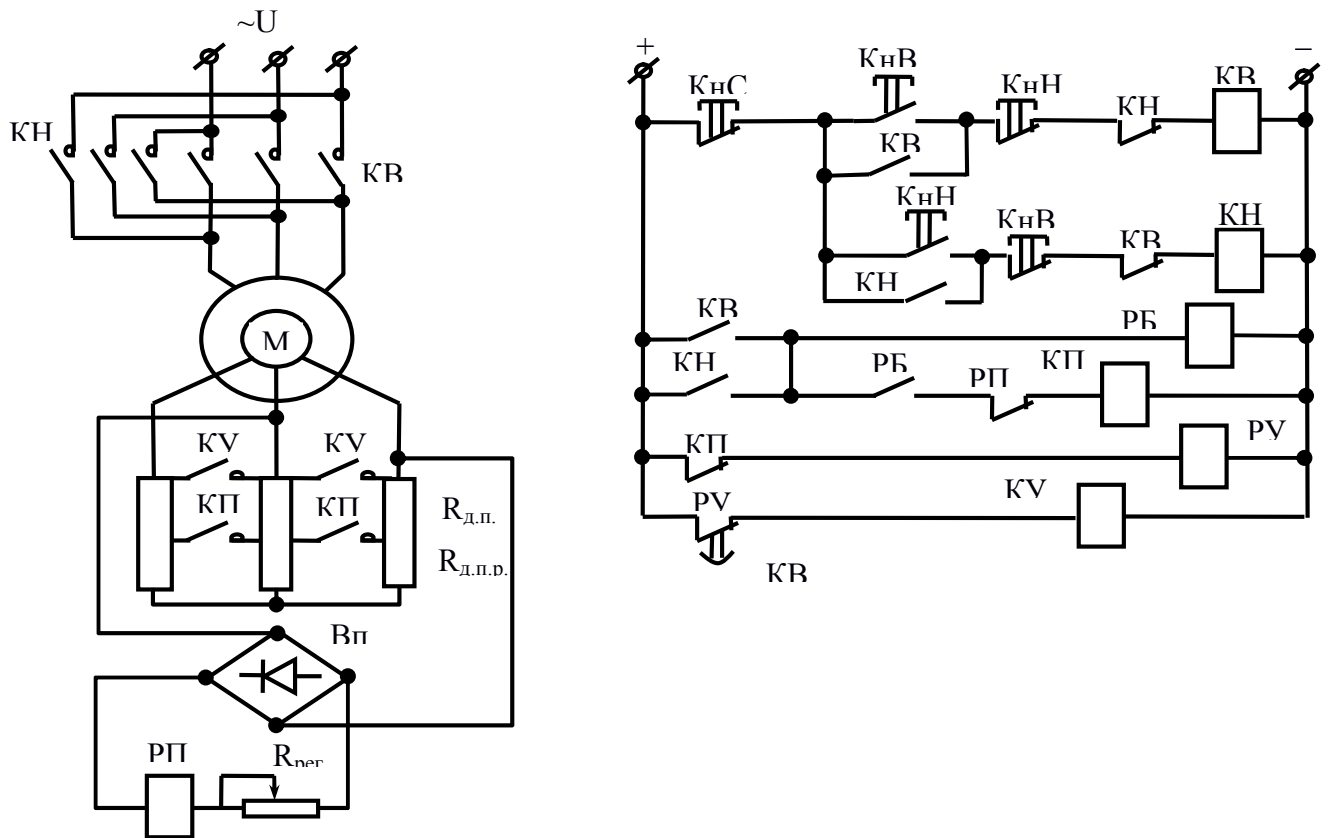


Рис. 3.13. Схема включення АТ з фазним ротором в режимі гальмування противовключением

Непрямий контроль швидкості М здійснюється за допомогою реле противовключення РП. Його котушка через Вп підключена на затискачі обмотки ротора. Напряга на котушці РП пропорційно ковзанню s двигуна: $U_{рп} \approx E_{2н}s$, де $E_{2н}$ - е.р.с. ротора при $s = 1$. За допомогою РРЕГ реле налаштовується так, щоб воно спрацьовувало на самому початку процесу гальмування, тобто при $s \approx 2$ і відпускало свій якір при швидкості, близькій до нуля, тобто при $s \approx 1$. При пуску РП подаватися не буде. На схемі ланцюга управління пуском представлені однією сходинкою $R_{дп.}$, Контактормом КУ і електромагнітним реле часу РУ. Відлік часу РУ починає з моменту включення КП.

Припустимо, що М працював в напрямку «уперед». При натисканні на КНН відключаються контактори КВ і КП. У ланцюг ротора вводиться $R_{дп} + R_{ДПР}$. Потім включиться КН і М переходить в режим гальмування противовключением. При цьому включається РП і розмикає свій контакт в

ланцюзі котушки КП, не дозволяючи йому включитися і забезпечуючи в ланцюзі ротора $R_{дп} + R_{ДПР}$.. Для підвищення надійності цієї операції застосовують блокувальний реле РБ. Воно відключається при відключенні КВ і включиться тільки після спрацювання КН. Тим самим створюється тимчасовий розрив в ланцюзі котушки КП. Коли контакт РБ замкнеться, реле РП вже встигне спрацювати і розімкнути свій контакт. В кінці гальмування контакт РП замикається, включається контактор КП. Двигун переходить на реостатно характеристику і розганяється в напрямку «назад». При зворотному реверсі схема працює аналогічно.

ЛЕКЦІЯ 17

3.6. Вузли електричного захисту двигунів і схем управління.

Для запобігання виходу з ладу і підвищення надійності ЕП застосовують різні види електричних захистів.

Максимально-струмовий захист. При к.з. забезпечує негайне відключення ланцюга, в якій відбулося к.з. Здійснюється: запобіжниками з плавкими вставками Пр; автоматами з електромагнітними расцепителями В; максимальними струмовими реле РМ1 і РМ2. При потужності М до 10 кВт ланцюга управління захищають при к.з. тими ж апаратами, що і силові ланцюга або своїми Пр і В. Приклади включення апаратів захисту наведені на рис. 3.14.

Номінальний струм плавкої вставки $I_{вст.н.}$ і струм спрацювання $I_{уст.}$ В і РМ для захисту АД з к.з. ротором з початковим пусковим струмом I_p : $I_{вст.н.} \geq 0,4 I_p$, при $t_p < 5с$ - легкий пуск; $I_{вст.н.} \geq (0,5-0,6) I_p$; $I_{уст.} = (1,3-1,5) I_p$. при $t_p > 10с$ - важкий пуск.

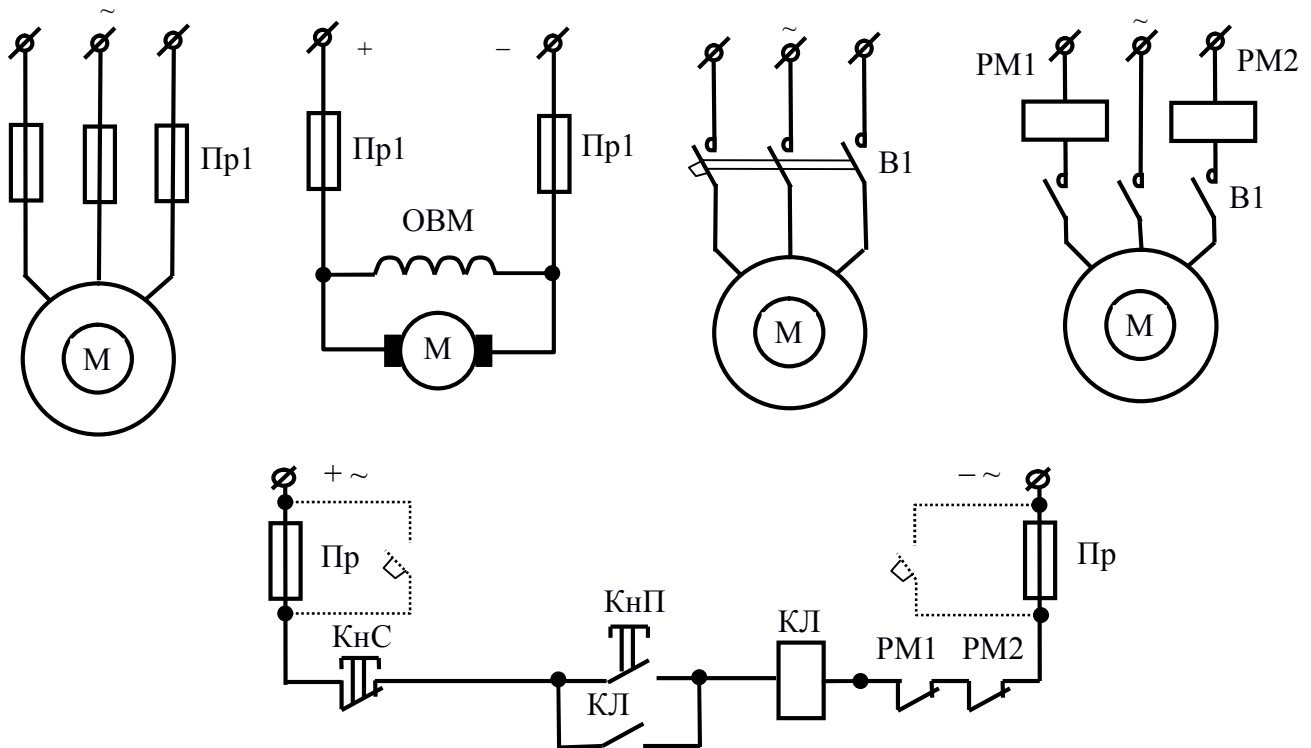


Рис. 3.14. Схеми включення апаратів захисту від струмів короткого замикання.

Для захисту АД з фазним ротором і ДПС Івст.н. = (1-1,25) І_н; І_{уст} = (1,2-1,3) І_п. Значення номінального струму І_н для двигунів S3 - режиму беруть при ПВ = 25%. Для захисту ланцюгів управління Івст.н. = І_{уст} = 2.5І_{кат.Σ}, І_{кат.Σ} - максимальний сумарний струм одночасно включених апаратів.

Захист двигунів від перегріву, Викликаного перевантаженням по струму здійснюється: при тривалому режимі роботи - за допомогою двох теплових реле або В з тепловими расцепителями (ДПС-1реле); при S3 режимі роботи - за допомогою двох РМ1 і РМ2, оскільки в S3 режимі важко узгодити теплові характеристики. У цьому випадку одночасно забезпечується захист М від роботи на двох фазах. Приклади включення апаратів захисту наведені на рис. 3.15.

Реле РВ виключає можливість спрацьовування РМ1 і РМ2 при пуску. РМ3 служить для захисту при к.з. Номінальний струм нагрівального елемента теплового реле І_{нагр.н.} або теплового розчеплювача В І_{расц.н.} вибирають з

умови $I_{нагр.н.} = I_{расц.н.} \approx I_n$. Струм уставки РМ 3ф $< I_{уст.} < I_{2ф}$; де 3ф і 2ф - струми М при роботі на двох і трьох фазах.

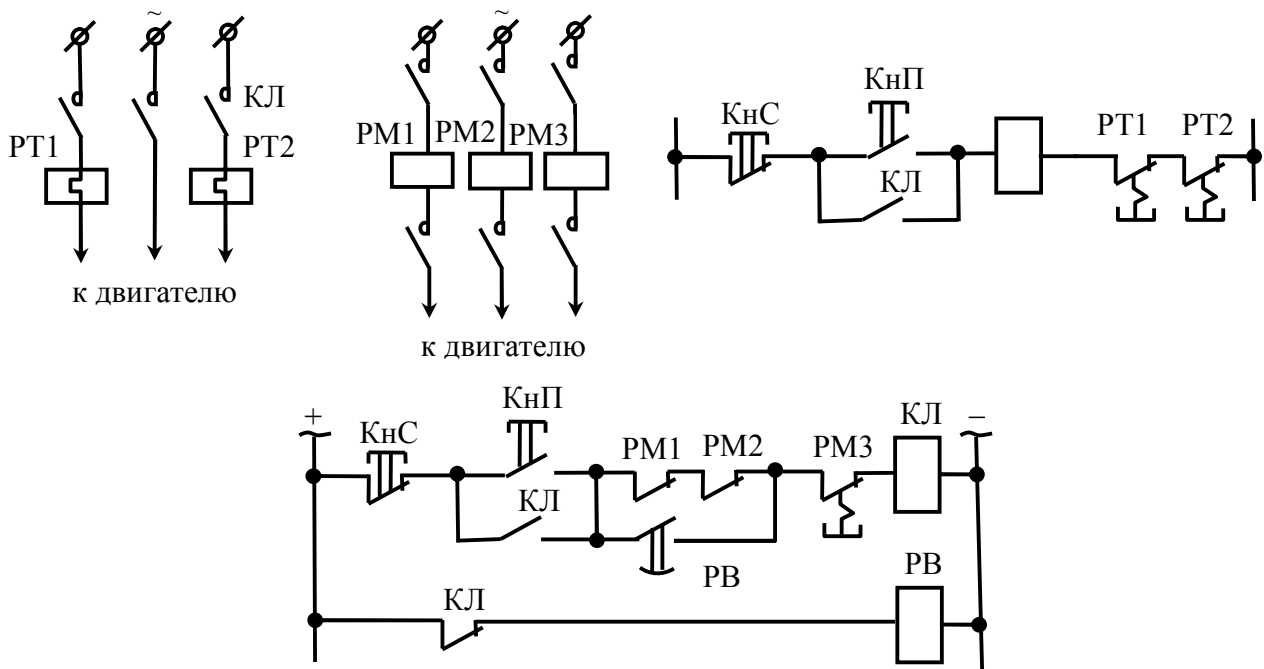


Рис. 3.15. Схеми включення апаратів теплового захисту.

Захист від самозапуску (нульовий захист). Забезпечує відключення двигуна при зникненні або надмірному зниженні напруги мережі і запобігає самозапуску - мимовільний пуск М після відновлення напруги. При кнопчному управлінні її здійснює КЛ. При управлінні за допомогою командоконтроллера - реле напруги РН. В цьому випадку пуск можливий тільки після установки КК в нульове положення. У ланцюг котушки РН включаються контакти інших апаратів захисту. Якщо, навпаки, потрібно забезпечити самозапуск М, то кнопки управління замінюють вимикачами.

Захист при обриві поля, Тобто при обриві ланцюга обмотки збудження ДПС і СД здійснюється за допомогою мінімального струмового реле РОП. При обриві в ланцюзі ОВМ РОП вимикається і включає М. Захист від перенапруги на ОВМ при її відключенні здійснюється розрядних опором РРД усуває втрати енергії при роботі.

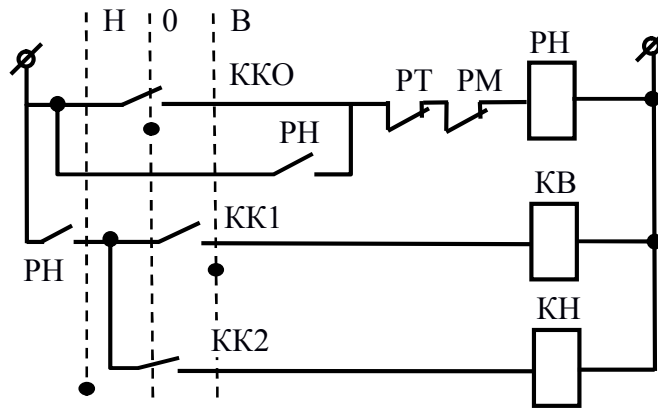


Рис. 3.16. Схема включення захисту від самозапуску.

Захист від тривалого пуску СД, схема якої приведена на рис. 3.18, виконують за допомогою РОП і реле часу РВ. Захист необхідна, тому що пускова обмотка розрахована на короточасний режим роботи. Витримка РВ відповідає допустимій тривалості пуску. Якщо до моменту спрацьовування РВ струм збудження не досяг свого номінального значення і РОП не включили, то РП спрацьовує і двигун відключиться.

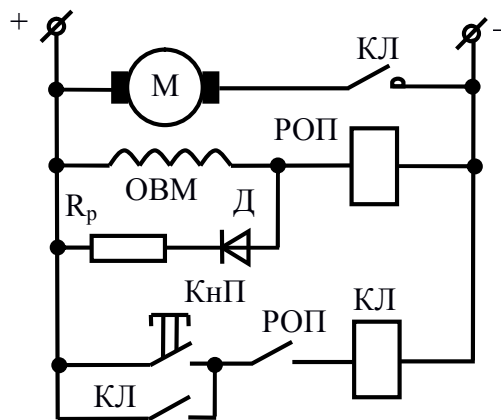


Рис. 3.17. Схема включення захисту від обриву поля.

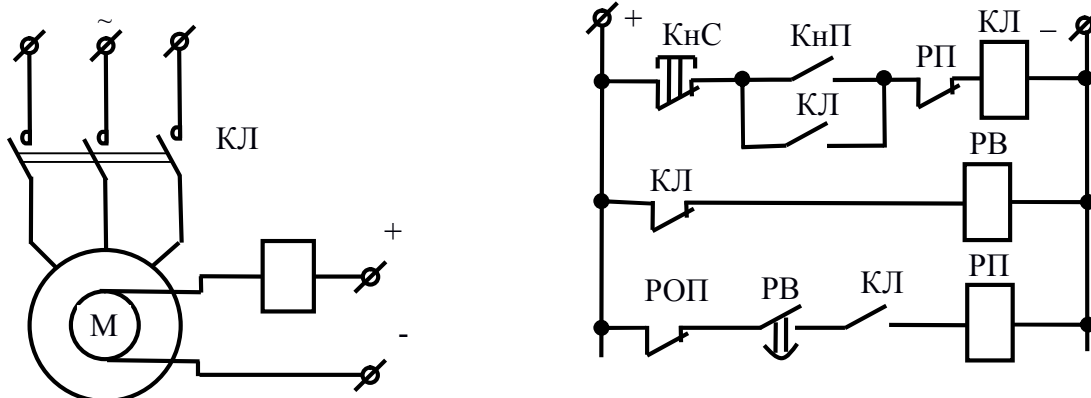


Рис. 3.18. Схема включення захисту від тривалого пуску СД.

Захист від випадання з синхронізму СД, схема якої приведена на рис. 3.19, застосовується для двигунів з різко змінюється навантаженням на валу. Для збереження перевантажувальної здатності М при зниженні напруги мережі на 15-20% відключиться реле мінімальної напруги РФ. Замикається його контакт і включає контактор фазировки КФ. Останній своїм контактом шунтує реостат $R_{дв}$ в ланцюзі ОВВ. Напруга збудника, струм збудження і максимальний момент двигуна зростають.

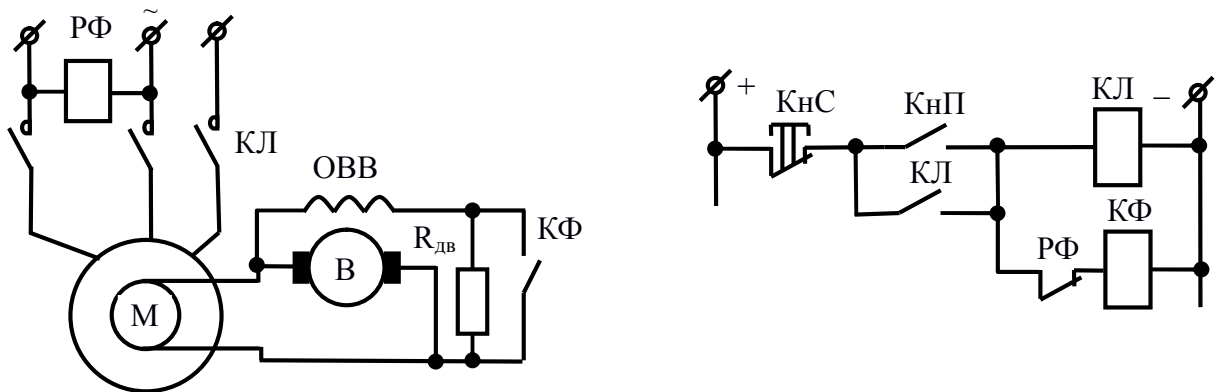


Рис. 3.19. Схема включення захисту СД0 від випадання з синхронізму.

ЛІТЕРАТУРА

1. Яцун М. А. Електричні машини : навчальний посібник / М. А. Яцун. – Львів : Видавництво Державного університету “Львівська політехніка”, 1999. – 427 с.
2. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины : учебник для вузов / А. В. Иванов-Смоленский – М. : Энергия, 1980. – 928 с.
3. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек – Л. : Энергия, 1974. – 782 с.
4. Автоматика и автоматизация производственных процессов / И. И. Мартыненко, Б. Л. Головинский, Р. Д. Проценко, Т. Ф. Резниченко. – М. : Агропромиздат, 1985. – 335с.
4. Бородин И. Ф. Основы автоматике / И. Ф. Бородин – М. : Колос, 1970. – 327с.
5. Воронов А. А. Основы теории автоматического регулирования и управления / А. А. Воронов, В. К. Титов, Б. Н. Новогренов. – М. : Высшая школа, 1977. – 519с.
6. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического регулирования / Е. П. Попов, В. А. Бесекерский. – М. : Наука, 1972. – 768 с.

Науково-методичне видання

ЕЛЕКТРОПРИВІД І АВТОМАТИЗАЦІЯ

Конспект лекцій для здобувачів вищої освіти денної та заочної форм навчання
навчання спеціальності 208 «Агроінженерія»

Укладачі: **Авдєєва** Олена Андріївна
Садовий Олексій Степанович

Формат 60x84 1/16. Ум.друк. арк. ____.

Тираж ____ прим. Зам. № ____

Надруковано у видавничому відділі

Миколаївського національного аграрного університету

54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №4490 від 20.02.2013р.