

А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко

**ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА.
ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА**

Частина 1

Вінниця ВНАУ 2020

УДК 621.313 (075.8)
В-42

Рекомендовано до друку Вченою радою
Вінницького національного аграрного університету
« 28 » квітня 2020 р. (Протокол № 11)

Рецензенти:

Кутін В. М. д. т. н., проф., завідувач кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті Вінницького національного технічного університету;

Островець М. Я., д. т. н., проф., завідувач кафедри теоретичної електротехніки національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Чорний О. П., д. т. н., проф., директор інституту електромеханіки, енергозбереження і комп'ютерних технологій Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.

В-42 А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.

Навчальний посібник в двох частинах присвячений розгляду питань основ електропривода. Структура навчального посібника містить теоретичну, практичну частини та довідкові матеріали, що дозволяє забезпечити ефективне засвоєння дисципліни студентами та продуктивну самостійну роботу. Теоретична частина присвячена питанням дослідження механіки, властивостей і характеристик електроприводів з двигунами постійного і змінного струму. У практичній частині наведені основні розрахункові формули та співвідношення для розрахунку електроприводів а також приклади розв'язування задач та задачі для самостійного розв'язку.

Навчальний посібник рекомендується для студентів, які навчаються за спеціальністю 141- “ Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”

УДК 621.313 (075.8)
В-42

© А.А. Видмиш, 2020
© Л.В. Ярошенко, 2020
© ВНАУ, 2020

ЗМІСТ

Вступ	7
РОЗДІЛ В. ВСТУПНА ЧАСТИНА	9
В1. Еволюція електропривода і його місце в народному господарстві	9
В2. Структура електромеханічної системи та електричного приводу	12
В3. Класифікація електроприводів	15
В4. Основні вимоги до сучасного електропривода	20
В5. Основні проблеми і напрямки розвитку електропривода	20
ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	25
РОЗДІЛ Т1. МЕХАНІКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА	25
Т1.1. Основні положення механіки електропривода	25
Т1.2. Рівняння руху електропривода	28
Т1.3. Приведення моментів і сил опору моментів інерції та інерційних мас	37
Т1.4. Механічні характеристики електродвигунів і виробничих механізмів	46
Т1.5. Статична стійкість електропривода	58
РОЗДІЛ Т2. ВЛАСТИВОСТІ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	66
Т2.1. Двигуни постійного струму в електроприводі	66
Т2.2. Властивості і характеристики електроприводів з двигунами постійного струму незалежного збудження	68
Т2.2.1. Електромеханічні та механічні характеристики електроприводів з двигунами постійного струму незалежного збудження	69
Т2.2.2. Визначення параметрів двигунів постійного струму незалежного збудження за каталожними даними	76
Т2.2.3. Режими роботи двигунів постійного струму незалежного збудження	78

T2.2.4. Способи регулювання швидкості електроприводів з двигунами постійного струму незалежного збудження	88
T2.3. Властивості і характеристики електроприводів з двигунами постійного струму послідовного збудження	97
T2.3.1 Двигунний режим роботи	97
T2.3.2. Гальмівні режими роботи двигунів постійного струму послідовного збудження	105
T2.3.3. Способи регулювання швидкості електроприводів з двигунами постійного струму послідовного збудження	115
T2.4. Властивості і характеристики електроприводів з двигунами постійного струму змішаного збудження	124
T2.4.1. Двигунний режим	124
T2.4.2. Гальмівні режими роботи двигунів постійного струму змішаного збудження	129
T2.4.3. Способи регулювання швидкості двигунів постійного струму змішаного збудження	134
РОЗДІЛ Т3. ВЛАСТИВОСТІ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГУНІВ ЗМІННОГО СТРУМУ	
	137
T3.1. Асинхронні двигуни в електроприводі	137
T3.2. Властивості і характеристики електроприводів із асинхронними двигунами з фазним ротором	139
T3.2.1. Схема заміщення асинхронного двигуна	139
T3.2.2. Електромеханічні характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором	146
T3.2.3. Механічні характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором	147
T3.2.4. Гальмівні режими асинхронного двигуна з фазним ротором.	155
T3.2.5. Способи регулювання швидкості електроприводів з асинхронними двигунами з фазним ротором	171

ТЗ.2.6. Несиметричні режими роботи асинхронного двигуна з фазним ротором	191
ТЗ.3. Властивості і характеристики електроприводів із асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором	204
ТЗ.3.1. Особливості роботи асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором	204
ТЗ.3.2. Розрахунок механічних характеристик асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором	211
ТЗ.4. Властивості і характеристики електроприводів із синхронними двигунами	214
ТЗ.4.1. Механічні характеристики синхронного двигуна у двигунному режимі	215
ТЗ.4.2. Гальмівні режими роботи синхронного двигуна	220
ТЗ.4.3. Способи регулювання швидкості електроприводів з синхронними двигунами	221
ТЗ.4.4. Способи пуску синхронного двигуна	223
ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА	231
Розділ П1. МЕХАНІКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА	231
П1.1. Основні розрахункові формули та співвідношення	231
П1.2. Приклади розв'язування задач	234
П1.3. Задачі для самостійного розв'язку	249
РОЗДІЛ П2. ВЛАСТИВОСТІ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	270
П2.1. Властивості і характеристики електроприводів з двигунами постійного струму незалежного збудження	271
П2.1.1 Основні розрахункові формули	271
П2.1.2. Приклади розв'язування задач	275
П2.1.3. Задачі для самостійного розв'язку	283

П2.2. Властивості і характеристики електроприводів з двигуном постійного струму послідовного й змішаного збудження	294
П2.2.1. Основні розрахункові формули та співвідношення	294
П2.2.2. Приклади розв'язування задач	298
П2.2.3. Задачі для самостійного розв'язку	304
РОЗДІЛ ПЗ. ВЛАСТИВОСТІ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРО-	
ПРИВОДІВ З ДВИГУНАМИ ЗМІННОГО СТРУМУ	307
ПЗ.1. Властивості і характеристики електроприводів з асинхронними двигунами	307
ПЗ.1.1 Основні розрахункові формули та співвідношення	307
ПЗ.1.2 Приклади розв'язування задач	310
ПЗ.1.3 Задачі для самостійного розв'язку	327
ПЗ.2. Властивості і характеристики електроприводів з синхронними двигунами	348
ПЗ.2.1 Основні розрахункові формули та співвідношення	348
ПЗ.2.2 Приклади розв'язування задач	348
ПЗ.2.3 Задачі для самостійного розв'язку	349
ЛІТЕРАТУРА.....	352
ДОДАТКИ	354

Вступ

На даний час різноманітні технологічні процеси здійснюються виробничими пристроями, машинами і комплексами з використанням систем електропривода, що за допомогою перетворення і передачі енергії робочій машині або виконавчому органу забезпечують цілеспрямовану роботу останніх.

Основні теоретичні положення і закони, що характеризують структуру, роботу і проектування електроприводів (ЕП), вивчає дисципліна “Основи електропривода” (ОЕП). Основними задачами курсу є вивчення сутності, структури і принципу роботи ЕП, його призначення і функціональних можливостей; особливостей і індивідуальних властивостей різноманітних систем електропривода і засобів одержання цих властивостей; установлення зв'язку ЕП із робочою машиною (РМ) і джерелом енергії; особливостей процесів обміну енергією у ЕП, що складають сутність його роботи, засобів керування цими процесами та ін.

Курс “Основи електропривода” є в цьому відношенні фундаментальним і дозволяє опанувати знаннями, необхідними для вирішення ряду задач, серед яких найважливішими є аналіз систем електропривода, що по суті, охоплює всі питання, пов'язані з ЕП, від початку проектування до стадії експлуатації і ремонту.

Якщо в курсі “Електричні машини” вивчають будову, принципи роботи і фізичні процеси, що відбуваються в електромеханічних перетворювачах, то курс ОЕП розглядає електричні машини з точки зору їх функціональних можливостей, застосування і використання в різноманітних системах електропривода, вивчає їх характеристики і робочі режими, визначає зв'язок з іншими системами і, нарешті, дозволяє опанувати методикою раціонального вибору його елементів.

Дана дисципліна динамічно розвивається в зв'язку з інтенсивним удосконалюванням систем електропривода, методів і засобів керування ним. Суттєвий прогрес спостерігається в наслідок початку ефективного використання електричної енергії в зв'язку з початком масового застосування перетворювальної техніки четвертого покоління - що замикається на тиристорах і силових транзисторах. Перетворювальні системи на їхній базі дозволяють не тільки реалізувати зроблені закони керування, але і якісно по іншому вирішити задачу ефективного енергоспоживання, енерговикористання і енергоуправління.

Ця обставина призвела до необхідності розглядати курс "Основи електропривода", що складається з двох частин: перша частина - механіка електропривода, властивості і характеристики електроприводів з двигунами постійного і змінного струму та друга - регулювання координат і перехідні процеси; вибір електродвигунів в системах електропривода.

Відповідно до цього, даний посібник з дисципліни підготовлено у виді двох окремих частин. Перша частина, що підготовлена доцентами кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Вінницького національного аграрного університету Видмишом А.А. та Ярошенком Л.В. присвячена питанням першої частини дисципліни, а саме дослідженню механіки, властивостей і характеристик електроприводів з двигунами постійного і змінного струму, і пропонується вашій увазі.

Навчальний посібник містить теоретичну, практичну частини та довідкові матеріали. Така структура дозволяє забезпечити ефективне засвоєння дисципліни студентами та продуктивну самостійну роботу.

Автори вважають своїм приємним обов'язком висловити подяку студенту гр.. ЕІ-17-1 Ігорю Афанасієву за допомогу в підготовці макету посібника.

Розділ В. ВСТУПНА ЧАСТИНА

В1. Еволюція електропривода і його місце в народному господарстві

Еволюція приводу охоплює тривалий проміжок часу. До появи електричного приводу для надавання руху робочих органів машин-зрядь застосовувалася мускульна сила людини і тварин (ручний привід з'явився ще на зорі людського товариства, коли наші пращури, наприклад, вручну добували вогонь). Значно пізніше в якості привод руху стали використовувати механічний привід від вітряного двигуна або водяного колеса. Цей тип приводу (від вітро-двигунів і гідро-колеса), як і ручний привод, не могли забезпечити потреб виробництва навіть у самий ранній період промислового розвитку. Крім того, ці види приводу потребують спеціальних умов для їхнього використання (вітро-двигун може працювати тільки у вітряну погоду; гідравлічні двигуни встановлюються тільки на ріках із визначеним перепадом і потребують спорудження гребель).

Винахід парової машини І. І. Ползуновим у 1763 році і Д. Уаттом у 1784 році поклато початок розвитку і використанню парового приводу. Дещо пізніше з'явився двигун внутрішнього згорання, що знайшов широке застосування в транспорті і морських судах. Проте і цей вид приводу не був досконалим. По-перше, робота парових двигунів або двигунів внутрішнього згорання можлива тільки за наявності паливних ресурсів, причому в потужних приводах витрата палива велика, що на сьогоднішній день, через його дефіцит і відповідно високу вартість, робить такий привод неекономним. По-друге, екологічна обстановка на сьогоднішній день потребує створення таких приводів, що забезпечували б зберігання чистої атмосфери і навколишнього середовища в цілому. При цьому, без сумніву,

найбільш економічним і екологічно чистим “паливом” є електрична енергія.

Перший електричний привод був створений російським ученим В.С. Якобі в 1834-1838 р. Це був електропривод річкового катера, обладнаного електричним двигуном постійного струму, який дозволяв перевозити 10-12 чоловік із швидкістю 3-4 км/годину проти течії ріки. Також важливим етапом у розвитку електропривода варто вважати створення у 1882 році електропривода швейної машини, а дещо пізніше (1886 г) - електропривода вентилятора.

Проте відсутність економічних джерел електричної енергії в той час ще не дозволяв упровадити ЕП у промисловість. Практично до кінця 70-х років дев'ятнадцятого століття, незважаючи на успіхи, досягнуті в галузі конструювання електричних двигунів постійного струму, ЕП на їхній основі практично не використовувався. І тільки винахід трифазного змінного струму, дозволив вирішити проблеми централізованого виробництва і розподілу електричної енергії змінного струму та стало можливим створення багатофазних електричних двигунів і електроприводів на їх основі. З цього часу ЕП почав інтенсивно використовуватися в промисловості.

Рішення соціальних і економічних задач нашого суспільства на сучасному етапі неможливо без повної електрифікації всіх галузей народного господарства, що передбачає, насамперед, автоматизацію і комплексну механізацію виробничих і технологічних процесів. При цьому найважливіша роль у реалізації цих завдань належить електричному приводу, що у даний час є основним видом приводу найрізноманітніших виробничих і транспортних механізмів, пристроїв водо- і газопостачання, сільського господарства, побутових пристроїв, засобів телевізійної і космічної техніки, медичного апаратури і т.д. В даний час більш 80% усієї виробленої електричної енергії споживається ЕП. У провідних галузях

промисловості коефіцієнт електрифікації (тобто відношення встановленої потужності електричних двигунів до загальної встановленої потужності двигунів усіх видів) у даний час наближається до 100%.

Чільне місце ЕП серед інших можливих видів приводів визначається цілим рядом факторів, серед яких основними є:

- простота виробництва і розподілу електричної енергії, яку використовує для живлення ЕП, легкість її перетворення в інші види енергії;

- можливість виготовлення двигунів на різноманітні потужності і швидкості обертання (діапазон потужностей сучасного ЕП коливається від сотих частин вата до десятків тисяч кіловатів, а межі швидкості обертання від частин оберту вала в хвилину до сотень тисяч обертів за хвилину);

- можливість створення ЕП для роботи в найрізноманітніших умовах (в умовах космічного простору, агресивних середовищ, при низьких і високих температурах, під тиском і т.д.);

- різноманітність конструктивного виконання, що дозволяє здійснювати раціональне з'єднання двигуна з робочою машиною;

- можливість за допомогою простих засобів реалізувати в ЕП складні і різноманітні види руху виконавчих органів, змінювати його параметри (швидкість, прискорення);

- доступність автоматизації виробничих і технологічних процесів за рахунок застосування автоматизованого ЕП;

- високий ККД, надійність в експлуатації, простота обслуговування, відсутність забруднення навколишнього середовища.

У сполученні з різноманітними засобами сучасної комп'ютерної техніки, мікроелектроніки, напівпровідникової техніки, мікропроцесорними пристроями й іншими елементами ЕП є основним засобом автоматизації і комплексної механізації всіх галузей народного

господарства. Електроприводу, у даний час, альтернативи немає, його розвиток і удосконалювання визначають багато в чому розвиток і образ цивілізації третього тисячоріччя.

В2. Структура електромеханічної системи та електричного приводу

Звернемося до технічної термінології сучасних стандартів.

Відповідно до визначення стандарту електропривод - це електромеханічна система, що складається з електродвигунного, перетворювального, передавального і керуючих пристроїв, призначений для приведення в рух виконавчих органів робочої машини і керування цим рухом.

Для виконання цих функцій ЕП виробляє механічну енергію, перетворюючи електричну енергію, одержувану ним від джерела (мережі електричного постачання, або автономного джерела).

Вироблена ЕП механічна енергія передається виконавчим органам робочих машин і при необхідності регулюється відповідно до вимог технологічного процесу. За рахунок цієї енергії виконавчий орган виконує необхідний механічний рух (приводиться в рух), забезпечуючи виконання виробничих і технологічних операцій (переміщення вантажів піднімальними механізмами, оброблення деталей на верстатах, подачу повітря вентилятором і т.д.).

У процесі роботи можливий і зворотний порядок перетворення енергії, коли ЕП перетворюється в перетворювач механічної енергії в електричну. Таким чином, можна дати визначення призначення ЕП.

ЕП призначений для здійснення керованого процесу взаємного перетворення енергії (електричної в механічну і навпаки) з метою руху виконавчого органа робочої машини або забезпечення руху приводу за рахунок робочої машини.

Структурна схема сучасного автоматизованого ЕП приведена на рис.

В1.

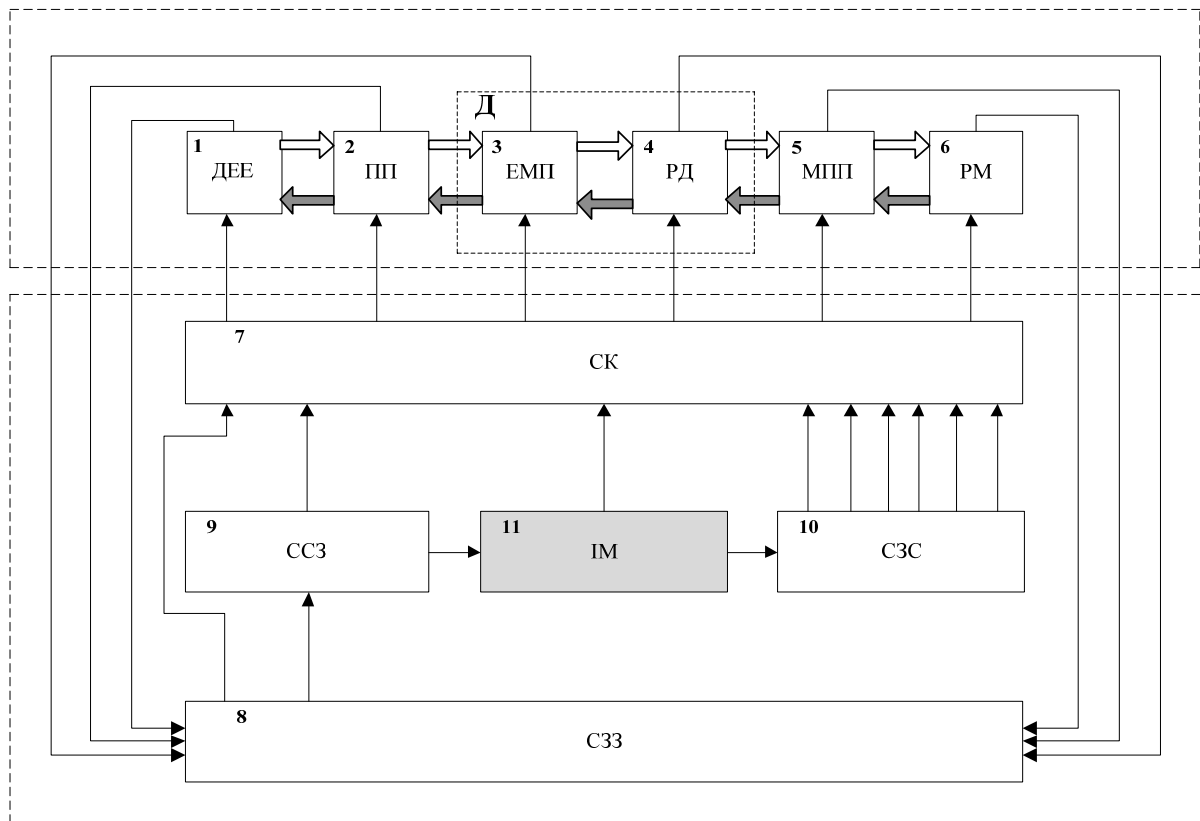


Рисунок В1 - Структурна схема сучасного автоматизованого електропривода.

На схемі використані наступні позначення:

1. ДЕЕ - джерело електричної енергії (мережа, автономне джерело, акумулятор);
2. ПП - перетворювальний пристрій, що застосовується для перетворення і регулювання параметрів електричної енергії, що надходить від ДЕЕ до двигуна (трансформатор, випрямляч, інвертор);
3. ЕМП - електромеханічний перетворювач електричної енергії в механічну або навпаки (статор двигуна);
4. РД – ротор двигуна;

ЕД це сукупність двох елементів: безпосередньо електромеханічного перетворювача, що перетворює електричну енергію в механічну, і механічного елемента (рухомої частини двигуна), поданого масою ротора з моментом , що впливає на нього , і обертається з визначеною швидкістю;

5. МПП - механічний передавальний пристрій, що служить для узгодження руху електричного двигуна і виконавчого органа робочої машини і забезпечує зміну параметрів механічної енергії. У якості МПП можуть використовуватися різноманітні види передач (редукторні, ремінні і кривошипно-шатунні). У ряді випадків МПП відсутній, і електричний двигун безпосередньо з'єднується виконавчим органом ВО;
6. РМ - робоча машина (виконавчий орган робочої машини).
7. СК - система керування, за допомогою якої здійснюється управління процесом перетворення енергії. Вона виробляє керуючий сигнал у функції різноманітних сигналів;
8. СЗЗ – система зворотних зв'язків дозволяє отримати інформацію, від спеціальних сенсорів, про процеси перетворення енергії та реальні параметри механічного руху;
9. ССЗ – система сигналізацій та захистів дозволяє донести інформацію про роботу електроприводу та забезпечити необхідний захист і блокування при роботі ЕП;
- 10.СЗС – система задаючих сигналів виконує функцію взірцевого задавача необхідних параметрів;
- 11.ІМ – інтелектуальний модуль або оператор (людина).

У електроприводі можна виділити два основних канали: *силовий* і *інтелектуально-інформаційний* (на схемі силовий канал показаний жирними стрілками, а інформаційний - тонкими). По силовому каналі передається перетворена електроенергія. По інформаційному каналі

здійснюється керування процесом її перетворення, а також проводиться збір інформації про стан системи, діагностика її несправностей і т.д.

В свою чергу, у силовому каналі можна виділити дві частини - електричну і механічну. Обов'язковим елементом силового каналу є електричний двигун, який є елементом обох частин .

Виходячи зі структури ЕП, останній може бути визначений як *електромеханічна система, що складається з електричних і механічних елементів, призначена для здійснення керованого процесу взаємного перетворення електричної енергії в механічну і передача її виконавчому органу робочої машини для приведення його в рух.*

В 3. Класифікація електроприводів

Залежно від наявності тих або інших елементів у системі ЕП, їхнього конструктивного виконання, виду руху, забезпечуваного ЕП, роду току, використовуваного для живлення двигуна, засобу розподілу механічної енергії і т.д. існуючі системи ЕП можна класифікувати наступним чином.

За родом струму приводного двигуна:

- електропривод постійного струму;
- електропривод змінного струму.

За способом розподілу механічної енергії:

- груповий електропривод;
- індивідуальний (одиначний) ЕП;
- взаємозв'язаний (багатодвигунний) ЕП.

Груповий електропривод (рис. В.2) забезпечує рух виконавчих органів декількох робочих машин або декількох виконавчих органів робочої машини. Передача механічної енергії і її розподілу відбувається за допомогою трансмісії.

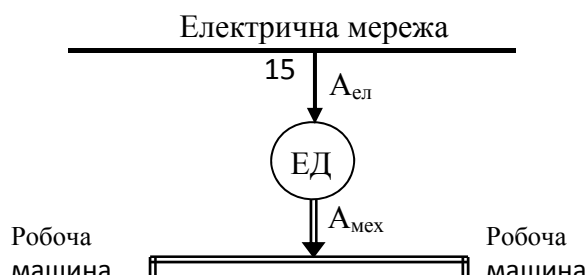


Рисунок В 2 – Груповий електропривод ($A_{\text{ел}}$ – електрична енергія, $A_{\text{мех}}$ – механічна енергія, ЕД – електричний двигун, Мех. – механізм)

Наступним етапом розвитку групового електропривода стало встановлення на кожній робочій машині окремого електродвигуна (Рис. В.3).

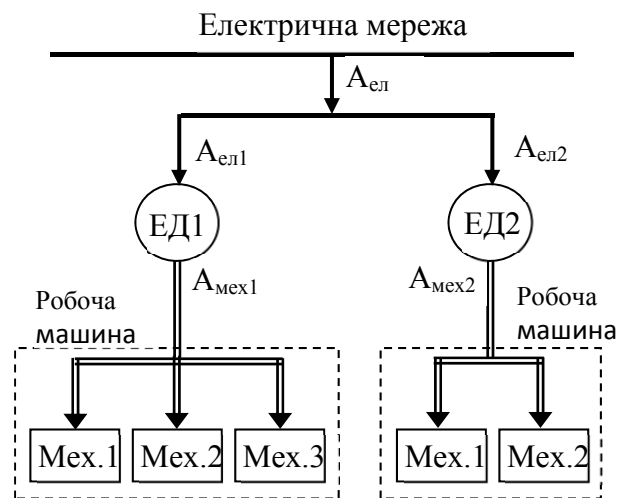


Рисунок В3 – Груповий електропривод з окремим двигуном на робочу машину

Особливістю групового електропривода є неможливість керування координатами технологічного процесу, так як пуск, зупинка, зміна величини та напрямку швидкості робочих органів механізмів здійснюється за допомогою механічних засобів: коробок передач, фрикційних механізмів, муфт тощо. Електропривод за схемою на рис. В.2 зараз не

використовується, а за схемою на рис. В3 ще експлуатується, особливо в металообробці та текстильній промисловості.

Складна кінематика та високі вимоги до виготовлення деталей механічної трансмісії, необхідність автоматизації виробництва зумовило заміну групового електропривода на *індивідуальний*, коли кожен механізм має один або декілька двигунів (рис. В3).

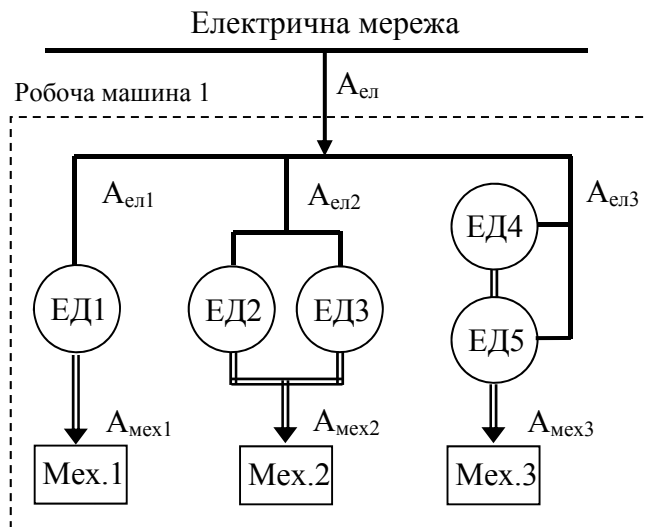


Рисунок В4 – Індивідуальний (а) та взаємозв'язаний (б, в) електропривод

Індивідуальний електропривод - це електропривод, у котрому кожний робочий орган машини приводиться в руху самостійним електродвигуном (Рис. В4, а) Тут робочі органи машини вже не пов'язані один з одним, і тому значно спрощуються механічні передачі. У деяких випадках у результаті повного виключення механічних передач вдасться істотно підвищити точність роботи машини.

Індивідуальний електропривод дозволяє забезпечити оптимальний режим роботи машини. Нарешті, при використанні індивідуального електропривода створюються найбільше сприятливі умови для автоматизації роботи машини і технологічних процесів. Індивідуальний ЕП широко застосовується в різноманітних сучасних машинах.

Взаємозв'язаний електропривод містить два або декілька електрично або механічно пов'язаних між собою електродвигуни (Рис. В4, б,в) при роботі яких підтримується задане співвідношення або рівність швидкостей, навантажень, або положення виконавчих органів робочих машин. Багатодвигунний електропривод широко застосовується в різноманітних сучасних машинах і агрегатах, наприклад, у копіювальних, металорізальних верстатах і верстатах із програмним керуванням, ротаційних машинах поліграфічного виробництва, у текстильних агрегатах, у потокових технологічних лініях і т.д.

За видом руху електроприводи можуть забезпечити:

- обертальний нереверсивний рух;
- обертальний реверсивний рух
- поступальний реверсивний рух.

Поступальний рух може бути отриманий шляхом використання електродвигуна звичайного виконання разом із перетворюючим механізмом (кулісним, гвинтовим, рейковим і т.п.), або шляхом застосування електродвигуна спеціального виконання для поступального руху (лінійні електродвигуни, магнітогідродинамічні двигуни та ін.).

За ступеню керованості електропривод може бути:

- *некерованим* – який забезпечує рух виконавчого органа робочої машини з одною робочою швидкістю; параметри приводу при цьому змінюються тільки в результаті збурюючих впливів;
- *регульованим* – який забезпечує різні швидкості виконавчого органа машини; параметри приводу можуть змінюватися під впливом керуючого пристрою;
- *програмно-керованим* – що керується відповідно до заданої програми;

- *стежачим* – який відпрацьовує автоматично рух виконавчого органа робочої машини з визначеною точністю відповідно до довільно змінного задаючого сигналу;

- *адаптивним* – який обирає автоматично структуру або параметри системи керування при зміні умов роботи машини з метою виробітки оптимального режиму

За родом механічного передаточного пристрою розрізняють електропривод:

- *редукторний* - у якому електродвигун передає обертальний рух за допомогою редуктора;

- *безредукторний* - у якому здійснюється передача руху від електродвигуна або безпосередньо робочому органу, або через передатний пристрій, що не містить редуктор.

За рівнем автоматизації розрізняють:

- *неавтоматизований* ЕП - у якому керування ручне; у даний час такий привід зустрічається рідко, переважно в установках малої потужності побутової і медичної техніки і т.п.;

- *автоматизований* ЕП - керований шляхом автоматичного регулювання параметрів;

- *автоматичний* ЕП - у який керуючий вплив виробляється автоматичним пристроєм без участі оператора.

В4. Основні вимоги до сучасного електропривода

Сучасний ЕП є головним споживачем електроенергії. Для забезпечення потреб людства, що зростають, створені, і продовжують створюватися й удосконалюватися сотні тисяч робочих машин,

виробничих і побутових механізмів, підйомно-транспортних засобів на основі різноманітних систем як нерегульованого, так і регульованого ЕП.

У багатоплановому розвитку сучасного ЕП основну роль грають *загальні вимоги*, що висувуються до сучасних ЕП:

- **надійність**, що полягає в здатності об'єкта виконувати свої функції протягом визначеного проміжку часу;
- **точність**, що зумовлена в здатності системи реалізувати заданий технологічний процес;
- **енергетична ефективність**, що обумовлена високим ККД, величиною втрат і споживаної потужності;
- **ресурсоємність** - цей показник враховує вартість матеріалів, закладених у конструкцію ЕП, трудомісткість при монтажі, налагодженні, експлуатації (оцінюється цей показник ціною ЕП).

Основні вимоги до ЕП у якісному відношенні визначаються характером технологічного процесу. Проектування ЕП, вибір його елементів завжди починається з вивчення технологічного процесу і встановлення конкретних вимог, запропонованих технологією.

В5. Основні проблеми і напрямки розвитку електропривода

Говорячи про проблеми сучасного ЕП насамперед слід зазначити, що найбільше важливими з них є:

- розширення функціональних можливостей ЕП у різноманітних технологічних застосуваннях;
- підвищення енергетичної ефективності ЕП, у зв'язку з енергетичною кризою, та зростанням вартості енергоносіїв;
- зниження матеріалоємності конструкції ЕП, пов'язане з дефіцитом і високою ціною різноманітних матеріалів (кольорових металів, дорогоцінних металів, ізоляційних матеріалів) і, крім того, із потребою зменшення габаритів.

Основним напрямком розвитку сучасного електропривода є розширення галузей застосування регульованого електропривода, причому, в основному, приводу змінного струму. Використання регульованого ЕП дозволяє найбільше повно реалізувати функції керування, захисти, автоматизацію виробничих процесів. Саме тому розширення галузі застосування регульованого електропривода характерно для всіх країн світу. В даний час регульований ЕП у загальному обсязі електроприводів складає 18 - 30%, а в перспективі повинний буде скласти понад 50%. У цій галузі зосереджене біля 95% усіх дослідницьких розробок в галузі електропривода.

Розглядаючи основні тенденції розвитку ЕП можна виділити такі.

Розширення галузі застосування ЕП взагалі. Це означає, що є тенденція до розширення сфери використання ЕП. Сфери, де в даний час ЕП широко завойовує свої позиції - це медицина (ЕП різноманітних протезів, інвалідних колясок, ЕП різноманітного технологічного операційного устаткування); побутовий ЕП (ЕП із мікропроцесорним керуванням по підготовці і переробці продуктів, різноманітні робототехнічні комплекси по приготуванню їжі, прибиранню помешкань і т.п.); ЕП у сільському господарстві (ЕП різноманітних механізмів і машин по первинній або повній переробці сільськогосподарської продукції, ЕП птахофабрик, тваринницьких ферм і т.п.).

Розширення діапазону потужностей застосовуваних електродвигунів. Максимальна потужність електричних машин, що випускаються: двигунів постійного струму - 12000 кВт, двигунів змінного струму - 60000 кВт. Мінімальна потужність - 0,1 Вт і менше.

Розширення діапазону швидкостей обертання застосовуваних машин. В даний час досягнуті швидкості обертання вала двигуна, що складають понад 500 тис. об/хв. (безколекторні машини постійного струму

з магнітною підвіскою замість традиційних підшипників). Область застосування таких машин - хімічна промисловість; установки по збагаченню урану й інших матеріалів; привод металообробних (шліфувальних) верстатів. Низько-швидкісні машини з кутовою швидкістю декілька обертів за хвилину застосовують у приводах різноманітних технологічних установок; приводах млинів, приводах прокатних станів ($n = 60-80$ об/хв..).

Розширення області застосування ЕП на базі машин змінного струму. Передові фірми і колективи, що випускають регульований ЕП, у даний час, в основному, орієнтуються на застосування приводу змінного струму. В розвинутих країнах частка приводу постійного струму зменшується, а частка ЕП змінного струму перевищила 75% від загального числа регульованих ЕП.

Яскраво проглядається тенденція до застосування електричних машин нетрадиційних типів: безколекторного приводу постійного струму (вентильні двигуни); електричних машин із збудженням від постійних магнітів; лінійних машин; дуго-статорних машин.

Застосування в ЕП надпровідних матеріалів тобто створення електричних машин, ККД який знаходиться на рівні 0,99...0,992. Це досягається за рахунок зниження активного опору шляхом використання надпровідних матеріалів і систем в обмотках машин.

Широке використання засобів комп'ютерної техніки для одержання режимів, близьких до оптимального (побудова оптимальних систем, адаптивних систем керування систем, що самі настроюються, систем, наділених інтелектом). При цьому використовуються мікропроцесорні системи керування, системи керування з вмонтованими ЕОМ. Кількість таких розробок обчислюється десятками і сотнями тисяч. Промисловістю випускаються найрізноманітніші системи керування.

Широке застосування напівпровідникової техніки, причому, не тільки для регулювання напруги і частоти, але і для виконання комутуючих функцій. Це дозволяє відмовитися від механічних комутуючих пристроїв і апаратів.

Застосування нових напівпровідникових матеріалів для радикального поліпшення енергетичних показників ЕП: широке застосування замкнених (двоопераційних) тиристорів і силових транзисторів. Широке застосування таких пристроїв дозволить вирішити проблему реактивної потужності. Це знизить струмове навантаження в мережах, дозволить відмовитися від установки конденсаторних батарей, синхронних компенсаторів і ін.

Застосування інтегрованих інтелектуальних напівпровідникових модулів на основі силових транзисторів, що відрізняються своїми високими енергетичними і керуючими характеристиками і властивостями, причому суттєва частина пристроїв і систем керування розташовується на одній (разом із силовими модулями) структурі.

Контрольні запитання

1. Що називається електроприводом?
2. Що називається електромеханічною системою?
3. В чому відмінність електропривода від електромеханічної системи?
4. Які дві основні функції сучасного електропривода?
5. Складові електропривода та їх функціональне призначення?
6. Який електропривод називається груповим?
7. Який електропривод називається індивідуальним?
8. Який електропривод називається автономним?
9. Який електропривод називається безпосереднім?
10. Який електропривод називається багатодвигунним?
11. Який електропривод називається безредукторним?

12. Якими основними трьома координатами механічного руху робочого органу механізму здійснюється керування за допомогою електропривода?
13. У чому відмінність між автоматичним та автоматизованим електроприводом?
14. Що входить до складу силового каналу електроприводу?
15. Поясніть основне функціональне призначення перетворювального пристрою.
16. Яким чином реалізується двоякість електричного двигуна?
17. Що входить до складу інтелектуально-інформаційного каналу електроприводу?
18. Основне призначення системи зворотних зв'язків.
19. Які види руху може реалізовувати електропривод?
20. Поясніть відмінність між стежачи та адаптивним електроприводом.
21. Чому часто вибирають регульований електропривод а не програмно керований?
22. Наведіть основні переваги та недоліки багатодвигунного електроприводу над індивідуальним.
23. Наведіть загальні вимоги що висуваються до сучасних електроприводів.
24. Сформулюйте основні проблеми, які стоять перед розробниками сучасних електроприводів.
25. Сформулюйте основні напрямки та тенденції розвитку сучасних електроприводів.

Розділ Т1. МЕХАНІКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Т1.1. Основні положення механіки електропривода

Основним видом сучасного промислового електроприводу є індивідуальний (однодвигунний) привод, тому питання механіки електропривода будуть розглядатися для одноступінного ЕП.

Відповідно до визначення до складу механічної частини ЕП (рис.1.1.) входять:

1 - рухома частина електричного двигуна – ротор двигуна (РД), 2 – механічний перетворювальний пристрій (МПП), 3- робоча машина (РМ) або робочий орган. У загальному випадку кількість складових частин МПП може бути різною, а в тих випадках, коли робочий орган повинний рухатися поступально, до складу механічної частини приводу входять механічні перетворювачі, що перетворюють обертальний рух в поступальний.



Рисунок Т1.1 - Кінематична схема механічної частини ЕП

У деяких випадках кінематична схема може бути значно простішою. У ньому можуть бути відсутні або передача, або механічні перетворювальні механізми, або і ті, і інші, разом.

Іноді вал електродвигуна безпосередньо з'єднується з робочим органом, або ЕД об'єднується з робочим механізмом в одне ціле.

Як передачі найчастіше застосовують зубчаті, клиноремінні передачі, різноманітні коробки передач або карданний вал; рідше - ланцюгові або черв'ячні передачі.

У випадках, коли робочий орган повинний рухатися зворотно-поступально застосовують різноманітні перетворювальні механізми: барабан і трос; зубчато-рейковий перетворювач, кривошипний механізм, гвинт із гайкою, шарнірно-важільний механізм і т.п.

Приклади механічних передач наведені на рис. Т1.2, де:

- а) редуктор (зубчата передача);
- б) зубчато-рейковий механізм;
- в) барабан-канат;
- г) кривошипно-шатунний механізм.

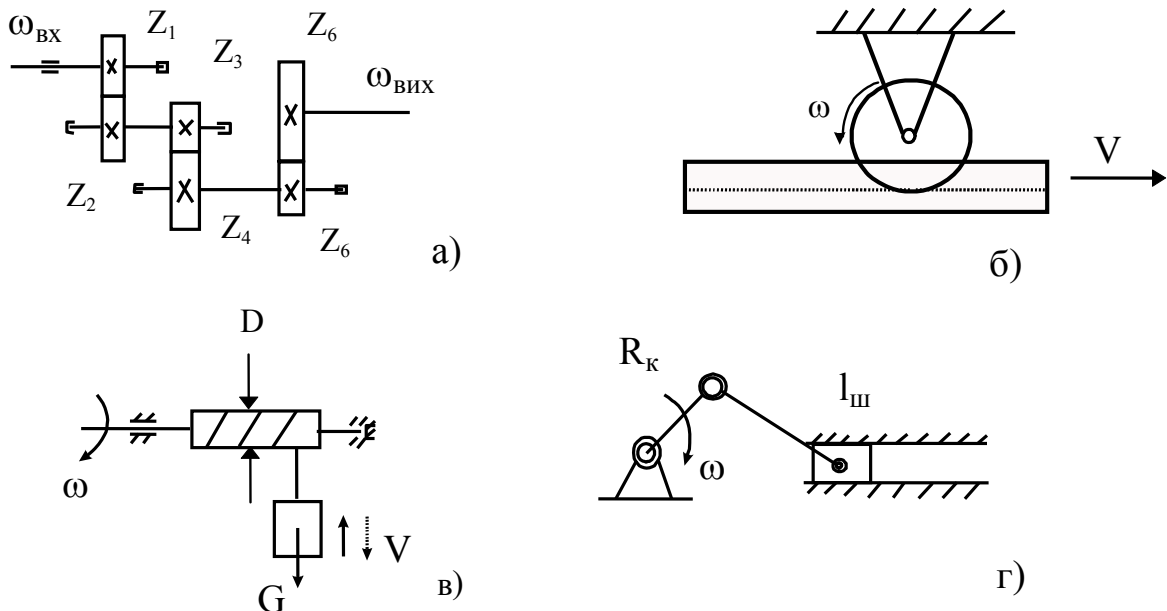


Рисунок Т1.2 - Механічні передачі в електроприводі

У загальному випадку, механічна частина ЕП – це декілька елементів, на які впливають зусилля або обертаючі моменти, що здійснюють різноманітні види рухів.

Рух окремих мас може бути описаний за допомогою просторових координат і їх похідних (наприклад, процес прямолінійного руху тіла може бути описаний за допомогою 2-го закону Ньютона).

Моменти і зусилля, що створюються механічною частиною приводу, можна розділити на *двигунні або рушійні моменти і гальмівні або моменти опору*. Рушійний (обертаючий) момент створюється двигуном (це момент на валу ротора). Момент опору (момент статичний, або момент навантаження) створюється робочим технологічним навантаженням. Статичний момент складається з двох складових: зумовлених технологічним навантаженням і силами тертя.

За своїм характером статичні моменти діляться на *активні і реактивні*.

Реактивний момент опору з'являється тільки внаслідок руху - це реакція механічної ланки ЕП на рух. Реактивний момент створюється силами реакції середовища на рухоме тіло. Прикладом реактивного моменту є момент тертя. Реактивний момент *завжди направлений проти руху* (тобто має знак, протилежний знаку швидкості). При зміні напрямку обертання знак реактивного моменту змінюється. Елемент, що створює реактивний момент може бути тільки споживачем енергії.

Активний момент опору з'являється незалежно від руху електропривода і створюється стороннім джерелом механічної енергії (наприклад, вагою вантажу, що піднімається або опускається; силою вітру, і т.д.). *Напрямок активного моменту не залежить від напрямку обертання*, тобто знак активного моменту не пов'язаний із знаком кутової швидкості. При зміні напрямку обертання знак активного моменту не змінюється. Джерело активного моменту може, як споживати, так і віддавати енергію.

На рис. Т1.3. наведені графіки активного і реактивного моментів:

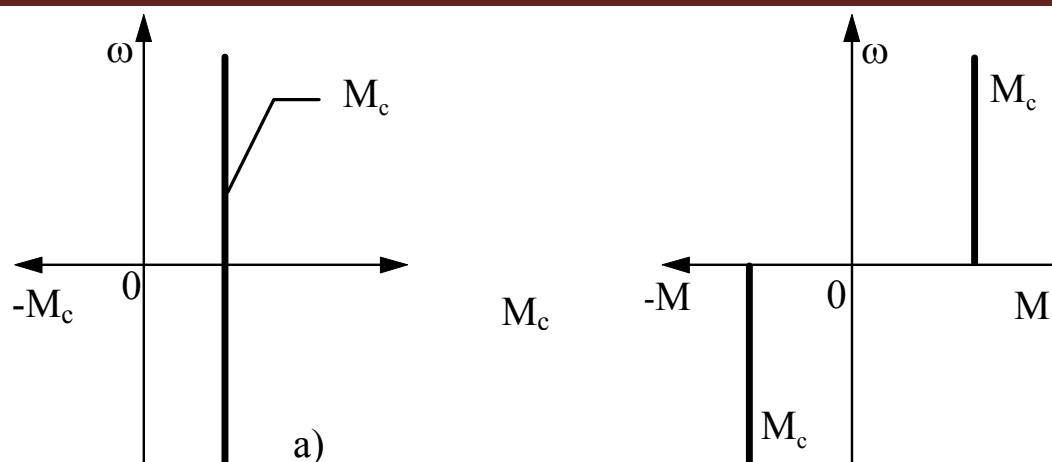


Рисунок Т1.3 - Графіки моментів опору: а) активний момент опору; б) реактивний момент опору

Т1.2. Рівняння руху електропривода

Рух електропривода зумовлений взаємодією моменту, що розвивається двигуном, і моменту опору (причому, момент опору, у залежності від його характеру, може як сприяти, так і перешкоджати руху). Слід відзначити, що ЕП може працювати в різних режимах: *статичному (усталеному)* із постійною швидкістю, або в *динамічному (перехідному)* режимі, якому відповідають стани прискорення або уповільнення привода, що викликаються цілим рядом факторів (наприклад, механічними коливаннями навантаження внаслідок зміни технологічних параметрів, вмиканням і вимиканням пускових або гальмівних опорів, зміною напруги живлення або параметрів самого електропривода).

Будь-яке порушення усталеної швидкості ЕП супроводжується зміною запасу кінетичної енергії в системі двигун - робоча машина, що впливає на роботу електродвигуна, викликаючи зміни його моменту, потужності, швидкості обертання.

Дослідження характеру руху електропривода або його окремих органів може бути здійснене за допомогою *рівняння руху ЕП, що враховує взаємодію всіх зусиль і моментів у системі в будь-який момент часу.*

Рівняння руху електропривода можна отримати на основі рівняння енергетичного балансу системи “двигун - робоча машина”. У відповідності до основного призначення електропривод здійснює перетворення електричної енергії в механічну і її передачу виконавчому органу робочої машини для здійснення корисної роботи.

Вся енергія, що вироблена двигуном W_d , розподіляється наступним чином, одна частина її W_c витрачається на подолання сил опору руху, а інша частина $W_{дин}$ - на зміну запасу кінетичної енергії рухомих частин системи. Рівняння енергетичного балансу має вид:

$$W = W_c + W_{дин} \quad (1.1)$$

Переходячи до рівняння балансу потужностей, можна записати

$$P_d = P_c + P_{дин} \quad (1.2)$$

де P_d - потужність що розвивається двигуном;

P_c - потужність, що витрачається на подолання корисних і шкідливих опорів у системі;

$P_{дин}$ - динамічна потужність, що характеризує зміну кінетичної енергії системи.

З курсу теоретичної механіки відомо, що запас кінетичної енергії системи, що обертається з кутовою швидкістю ω , дорівнює:

$$W_k = J \frac{\omega^2}{2}, \quad (1.3)$$

де J - момент інерції системи.

Момент інерції залежить від маси тіла, що обертається і відстані від осі обертання та може бути визначений за виразом:

$$J = mr^2 \quad (1.4)$$

Момент інерції не залежить ні від кутової швидкості, ні від величини прикладених моментів.

На практиці у переважній більшості випадків доводиться мати справу із системами, що мають незмінний, або мало-змінний за величиною момент інерції ($J = \text{const}$). Проте, є категорія машин і механізмів, для яких момент інерції є функцією кута повороту. Тому в загальному випадку будемо вважати, що $J = f(\alpha)$, де α - кут повороту.

Визначимо значення динамічної потужності $P_{\text{дин}}$ як похідну від запасу кінетичної енергії W_k за часом:

$$P_{\text{дин}} = \frac{dW_k}{dt} = \frac{dJ}{dt} \frac{\omega^2}{2} = J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{dt}. \quad (1.5)$$

Підставляючи значення $P_{\text{дин}}$ у вираз балансу потужностей, одержимо:

$$P_d - P_c = J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ}{dt} \quad (1.6)$$

Розділивши цей вираз на ω , одержимо рівняння руху системи (або, як його ще називають, рівняння моментів, віднесене до валу, що обертається зі швидкістю ω):

$$M_d - M_c = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \cdot \frac{dJ}{dt}. \quad (1.7)$$

Оскільки кутова швидкість обертання - це похідна від кута повороту за часом $\left(\omega = \frac{d\varphi}{dt}\right)$, то рівняння моментів можна записати й у такому вигляді:

$$M_d - M_c = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ}{d\varphi}, \quad (1.8)$$

причому закон зміни $J = f(\alpha)$, як правило, відомий.

Права частина рівняння – це вираз для *динамічного моменту*, що виникає тільки в перехідному режимі, коли $\frac{d\omega}{dt} \neq 0$; $\frac{dJ}{d\varphi} \neq 0$.

$$M_d - M_c = M_{\text{дин}}, \quad (1.9)$$

$$\text{де - } M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}$$

Динамічний момент зумовлюється, як зміною швидкості руху, так і зміною кінетичної енергії системи внаслідок зміни моменту інерції (прикладом систем електропривода із змінним моментом інерції можуть бути кривошипні механізми різноманітних пресів, перекидачі, ткацькі верстати, конвеєри, мішалки і ін.).

Найчастіше на практиці момент інерції незмінний, або змінюється незначно ($J = \text{const}$ або $J \approx \text{const}$). У цьому випадку рівняння руху електроприводу спрощується та набуває виду:

$$M_d - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.10)$$

У загальному випадку, знаки моментів, що входять у до складу рівняння руху, можуть бути різними, що необхідно враховувати для конкретного математичного опису.

Таке рівняння в цілому вірно описує рух у цілому, коли вплив пружних зв'язків несуттєвий. На основі рівняння (1.10) складається передаточна функція та структурна схема механічної частини. Оскільки входом є різниця моментів $M_d - M_c$, а виходом швидкість ω , то після заміни

$$\frac{d}{dt} \Rightarrow p, Jp\omega = M_d - M_c$$

передаточна функція набуває вигляду:

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{M(p) - M_c(p)} = \frac{1}{Jp} \quad (1.11)$$

Згідно (1.11) механічна частина електропривода є інтегруючою ланкою (рис. 1.4).

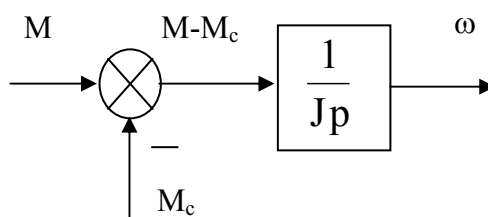


Рисунок 1.4 - Структурна схема механічної частини ЕП

Якщо вихідною координатою механічної частини є кут повороту (1.8), то структурна схема на рис. 1.4 доповнюється інтегратором, оскільки

$\frac{d\varphi}{dt} = \omega$, тоді $p\varphi = \omega$ і передаточна функція набуває виду:

$$W(p) = \frac{\varphi(p)}{\omega(p)} = \frac{1}{p}, \quad (1.12)$$

а структурна схема вигляду (рис. 1.5).

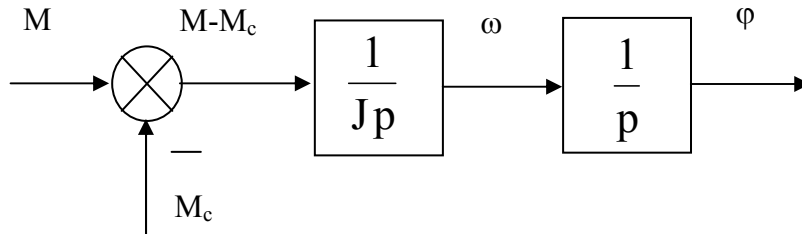


Рисунок 1.5 - Структурна схема механічної частини ЕП з врахуванням кута повороту

Обертаючий (крутний) момент M_d , двигуна при роботі, приймається додатнім (позитивним), якщо він спів-направлений з рухом привода. Якщо ж він направлений в зворотному до руху напрямку, то він вважається від'ємним (негативним). Момент опору M_c , вважається позитивним, якщо він виконує гальмівну дію (цей знак мають усі реактивні M_c , а також моменти опору при підніманні вантажу, стискуванні пружини і т.п., тобто активні моменти опору у випадках, коли їх дія перешкоджає руху). У всіх інших випадках (спуск вантажу, розтягування пружини) момент опору приймається негативним. Вибір знаків моментів залежить як від режиму роботи ЕП, так і від характеру M_c . Знак динамічного моменту $M_{дин}$ визначається алгебраїчною сумою M_d і M_c .

З урахуванням вищенаведеного, рівняння руху електропривода може бути записане наступним чином:

$$\pm M_d \pm M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.13)$$

Аналіз рівняння руху показує, що воно може характеризувати систему, як у статичних, так і в динамічних режимах, тому рівняння руху називають також *рівнянням динаміки ЕП*.

Слід відзначити, що більшість електромеханічних систем мають не тільки елементи, що обертаються. В основному доводиться зустрічатися із системами де поєднується обертальний та поступальний рух елементів, а інколи в системі присутні лише елементи, що рухаються поступально. Для поступального руху рівняння руху можна записати в такому вигляді:

$$F_d - F_c = F_{\text{дин}} = m \frac{dV}{dt}, \quad (1.14)$$

де F_d – рушійна (двигунна) сила;

F_c - сила статичних опорів;

m - маса рухомого тіла;

V - лінійна швидкість переміщення тіла.

Для поступального руху передаточна функція будується аналогічно а структурна схема набуває вигляду (рис. Т1.6).

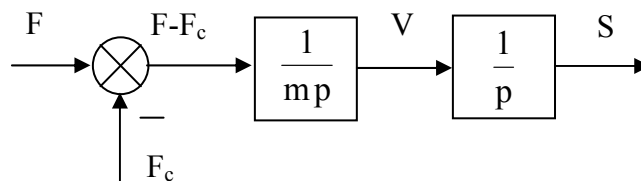


Рисунок Т1.6 - Структурна схема механічної частини ЕП, що рухається поступально

У теорії електропривода, як правило, використовується рівняння руху для обертального руху, за умови, що всі елементи, що поступально рухаються, спеціальним чином приведені до обертального руху.

Окрім того, розглянуті рівняння руху справедливі тільки для систем з абсолютно жорстким зв'язком механічних елементів електропривода і робочої машини. Насправді всі механічні елементи мають пружні властивості, внаслідок чого в деяких випадках виникають режими роботи ЕП, що докорінно відрізняються від поведінки абсолютно жорсткої системи.

Рівняння руху електропривода дозволяє вирішувати основні задачі електропривода.

Перша з них - *задача аналізу системи ЕП*, полягає у визначенні характеру руху приводу при відомих моментах двигуна й опору. Так, знайшовши з рівняння руху (1.10) прискорення :

$$\varepsilon = \frac{M_d - M_c}{J} \quad (1.15)$$

нескладно відзначити, що:

- якщо $M_d > M_c$, то $\varepsilon > 0$, що відповідає режиму прискорення (розгону) у випадку коли $\omega > 0$ або гальмування (сповільнення), якщо $\omega < 0$.

- якщо $M_d = M_c$, то $\varepsilon = 0$ (тобто, $M_{дин} = 0$) і має місце усталений (статичний) режим роботи з $\omega = \text{const}$.

- якщо $M_d < M_c$, то $\varepsilon < 0$, що відповідає режиму гальмування (сповільнення) коли $\omega > 0$ або прискорення (розгону) при $\omega < 0$.

Інтегруванням виразу $\frac{d\omega}{dt} = \frac{\pm M_d \pm M_c}{J}$, можна визначити закон зміни швидкості

$$\omega = \int_0^t \frac{M_d - M_c}{J} dt + \omega_{\text{поч}} \quad (1.16)$$

або час протікання перехідного режиму (розгону, гальмування і т.д.) при зміні швидкості від ω_1 до ω_2 :

$$t = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J}{M_d - M_c} d\omega. \quad (1.17)$$

У загальному випадку, обидва моменти (M_d і M_c) є функціями швидкості.

Якщо прийняти, що рух відбувається під впливом моментів, що не залежать від швидкості, то час руху ЕП при зміні швидкості від ω_1 до ω_2 буде дорівнювати:

$$t = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J}{M_d - M_c} d\omega = \frac{J(\omega_2 - \omega_1)}{M_d - M_c}. \quad (1.18)$$

Зокрема, якщо $\omega_1=0$, як показано на рис. Т1.7,

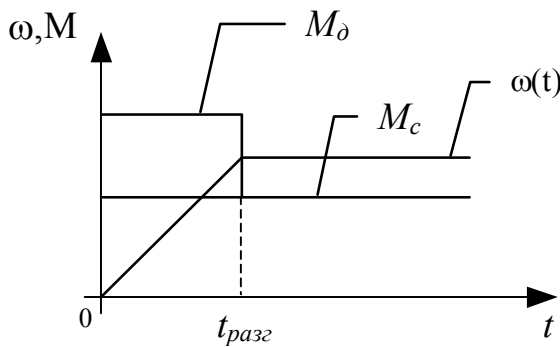


Рисунок Т1.7 - Часові характеристики розгону електропривода

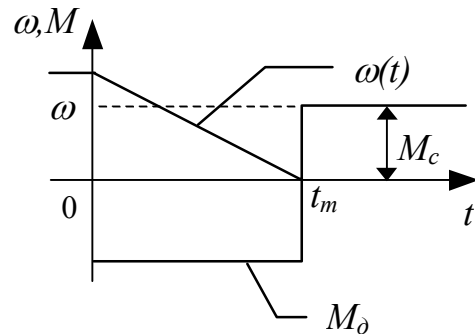


Рисунок Т1.8 - Часові характеристики гальмування електропривода

час пуску двигуна до визначеної швидкості можна визначити як:

$$t_{\text{пуску}} = \frac{J\omega_2}{M_d - M_c}.$$

Для режиму гальмування ЕП (рис. Т1.8) динамічний момент негативний, що відповідає рівнянню руху виду:

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

Відповідно час гальмування може бути визначений за виразом:

$$t_r = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J}{-(M_d + M_c)} d\omega = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J}{M_d + M_c} d\omega. \quad (1.19)$$

Зокрема, якщо $J = \text{const}$, $M_c = \text{const}$ і $M_d = \text{const}$, то час гальмування дорівнює:

$$t_r = \frac{J\omega_1}{M_d + M_c}.$$

Друга задача - *задача синтезу системи ЕП* - дозволяє визначити необхідний закон зміни моменту двигуна, що забезпечує роботу ЕП у відповідності до заданого закону зміни прискорення або швидкості ($M_d = M_c + J\varepsilon$). Ця задача достатньо складна і вирішуються спеціальними методами.

Т1.3. Приведення моментів і сил опору, моментів інерції та інерційних мас

Приведення моментів і сил опору

Розглянуте рівняння руху електропривода виду :

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

де M_d - момент двигуна; M_c - момент опору, що створюється навантаженням (робочою машиною); $J = J_d + J_{pm}$ - момент інерції системи,

що складається з моментів інерції обертових мас механічної частини, відноситься до найпростіших систем привода, у яких механічна частина представлена двигуном (рухомим ротором) і робочою машиною, з'єднаними безпосередньо.

У більшості електроприводів, двигун рухає виробничий механізм за допомогою різноманітних передач, при цьому окремі елементи привода рухаються з різними швидкостями. Найчастіше у виробничих механізмах одні елементи здійснюють обертальний рух, а інші - поступальний. При цьому кожний елемент кінематичного схеми має пружність і деформується під дією сил і моментів, а в з'єднаннях елементів є повітряні зазори. Таким чином, механічна частина ЕП, як правило є багато-масовою системою, що має дуже складну кінематичну схему, і розрахунок руху такої системи, за умови врахування всіх перерахованих вище факторів ускладнений (у деяких випадках розрахунок такої системи можливий тільки із застосуванням складного математичного апарату в сучасних пакетах прикладних програм).

З урахуванням того, що основні закономірності руху багато-масових електромеханічних систем визначаються найбільшими масами і зазорами і найменшими жорсткостями зв'язків між елементами системи, можна було б дещо спростити схему механічної частини ЕП привівши її або до три-масової, або до двомасової механічної системи з еквівалентними пружними зв'язками і сумарним зазором (або без нього), приведеними до кутової швидкості валу двигуна. Такі схеми достатньо складні для аналізу та розглядається при дослідженні динаміки систем електропривода.

Для більшості практичних випадків в інженерних розрахунках, що не потребують великої точності, можна нехтувати пружністю і зазорами в передачах, прийнявши механічні зв'язки абсолютно жорсткими. Тоді рух будь-якого одного елемента дає повну інформацію про рух всіх інших елементів, тому рух ЕП у цілому можна розглядати за одним механічним

елементом. Зазвичай за такий елемент приймають вал двигуна, а реальну схему механічної частини системи замінюють більш простою еквівалентною (розрахунковою) схемою.

Для електромеханічної системи без врахування пружних зв'язків еквівалентна схема складається з одного елемента. При цьому фактичну швидкість окремих елементів, моменти інерції і моменти опору, що діють у системі, заміняють еквівалентними величинами.

Розглянемо побудову еквівалентних схем.

Нехай механічна частина системи електропривода складається з декількох елементів із моментами інерції J_1 ; J_2 ; і J_3 , що обертаються з кутовими швидкостями ω_1 ; ω_2 ; і ω_3 , а також елементу із масою m , що рухається поступально із швидкістю V (рис. Т1.10).

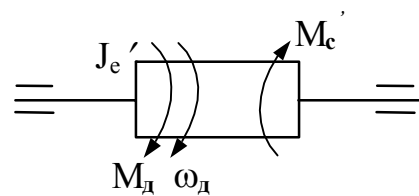
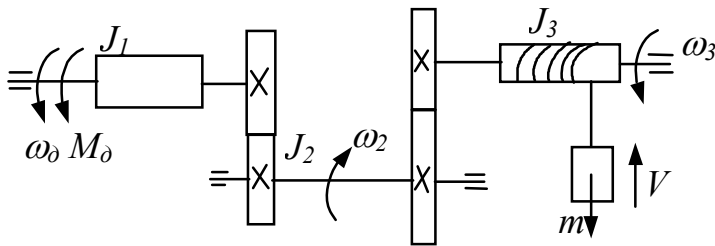


Рисунок Т1.9 - Схема механічної частини системи ЕП.

Рисунок Т1.10 - Еквівалентна схема механічної частини ЕП.

Момент опору залежить від ваги елемента, що рухається поступально

$$G = mg, \quad (1.20)$$

який створюється на валу робочого органу (барабана з радіусом R і моментом інерції J_3):

$$M_c = G \cdot R. \quad (1.21)$$

Слід відзначити, що вибір еквівалентної розрахункової схеми, яка замінює реальну схему, залежить від поставленої задачі розрахунку. Зазвичай мета полягає у визначенні параметрів руху одного з елементів системи, (як уже зазначалося вище, в електроприводі це як правило вал двигуна). Еквівалентна схема для цього випадку представлена на рис. 1.10.

Рух такої еквівалентної системи також може бути описаний за допомогою рівняння руху, але вже такого виду:

$$M_d - M'_c = J'_E \frac{d\omega_{дв}}{dt}, \quad (1.22)$$

де J'_E - приведений до валу двигуна еквівалентний момент інерції;

M'_c - приведений до валу двигуна статичний момент.

Задача побудови еквівалентної розрахункової схеми полягає у визначенні еквівалентного моменту інерції і статичного моменту за відомими параметрами для елементів реальної системи, що рухаються з різними швидкостями,. Тому момент інерції J'_E і статичний момент M'_c називають *приведеними* або еквівалентними.

Приведення статичних моментів і зусиль виконують на основі рівняння енергетичного балансу, складеного для робочого органу і приводного електродвигуна.

Наприклад, у випадку, коли обидва елементи здійснюють обертальний рух (рис. Т1.11 а) еквівалентна схема наведена на рис Т1.11. б).

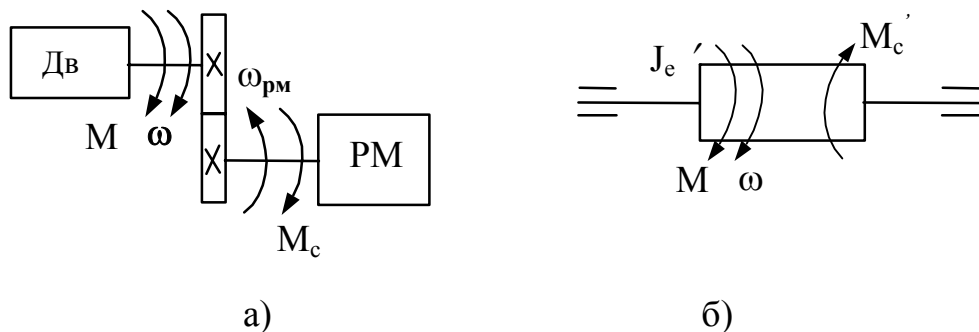


Рисунок Т1.11 - Приведення обертального руху системи ЕП до обертального: а) реальна схема механічної частини, б) еквівалентна

Рівняння енергетичного балансу має вигляд:

$$M'_c \omega_d = M_d \omega_d = M_c \cdot \omega_{pm} \cdot \frac{1}{\eta_n}, \quad (1.23)$$

де $M_c \cdot \omega_{pm}$ - механічна потужність навантаження;

η_n - ККД механічної передачі, що враховує втрати на тертя (для одного ступеня циліндричного редуктора коливається в межах $\eta_n=0,95 \div 0,98$).

Тоді момент M'_c , що приведений до валу:

$$M'_c = M_d = \frac{M_c \omega_{pm}}{\eta_n \omega_d} = \frac{M_c}{i \cdot \eta_n}, \quad (1.24)$$

де $i = \frac{\omega_d}{\omega_{pm}}$ - передаточне відношення (число) редуктора.

Якщо робочий орган (РМ) рухається поступально (рис. Т1.12), то рівняння енергетичного балансу має вид:

$$M_d \omega_d = M'_c \omega_d = F \cdot V \cdot \frac{1}{\eta_n}. \quad (1.25)$$

Тоді

$$M'_c = \frac{F \cdot V}{\omega_d \cdot \eta_n} = \frac{F \rho}{\eta_n}, \quad (1.25)$$

де $\rho = \frac{V}{\omega_d}$ - радіус приведення.

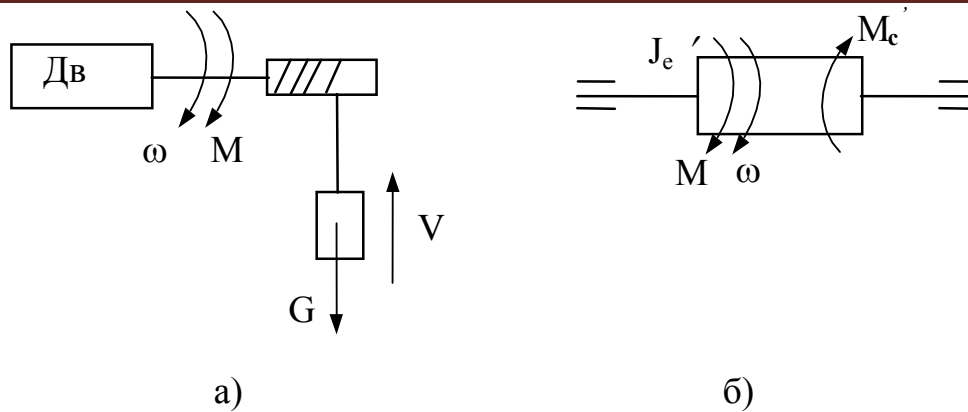


Рисунок Т1.12 - Приведення поступального руху системи ЕП до обертального а) реальна схема механічної частини ЕП, б) еквівалентна

Іноді існує необхідність приведення обертального руху до поступального. У цьому випадку приведенне зусилля може бути визначене за виразом:

$$F'_d = \frac{M_d \cdot \omega_d \cdot \eta_p}{V} \quad (1.26)$$

Слід зазначити, що вищенаведені залежності для приведення статистичного моменту справедливі для системи, що працює в режимі споживання енергії приводом, тобто для двигунного режиму роботи.

У тих випадках, коли привод працює в режимі рекуперативного гальмування, тобто за рахунок енергії, що споживається від навантаження, рівняння балансу потужностей виглядає дещо інакше, як-от:

$$M_d \omega_d = M'_c \cdot \omega_d = M_{pm} \cdot \omega_{pm} \cdot \eta_p = M_c \cdot \omega_{pm} \eta_p, \quad (1.27)$$

звідки

$$M'_c = \frac{M_c \cdot \omega_{pm} \cdot \eta_p}{\omega_d} = \frac{M_c \cdot \eta}{i}, \quad (1.28)$$

або у випадку поступального руху робочої машини:

$$M'_c = \frac{F \cdot V \cdot \eta}{\omega_d} = F \rho \eta . \quad (1.29)$$

Якщо механічна частина ЕП складається з декількох передаточних пристроїв, як наприклад приводу з вентиляторним навантаженням (рис. Т1.13).

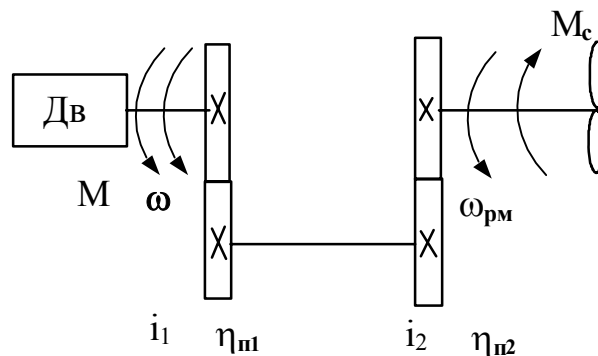


Рисунок Т1.13 - Механічна частина ЕП із декількома передаточними пристроями

то приведенний до валу двигуна момент визначається як

$$M'_c = \frac{M_c}{i_1 \cdot i_2 \cdot \eta_{n1} \cdot \eta_{n2}} . \quad (1.30)$$

Приведення моментів інерції й інерційних мас

Для оцінки сумарної інерційності механічної частини привода виконують приведення моментів інерції до загальної осі. Приведення інерційних мас і моментів інерції до загального валу (наприклад, валу двигуна) полягає в заміні всіх мас і моментів інерції одним еквівалентним моментом інерції J'_c на валу двигуна. Умовою приведення є рівність кінетичної енергії в реальній і еквівалентній схемах.

Розглянемо, наприклад, систему ЕП підйомної лебідки, механічна частина якої представлена кінематичною схемою (рис. Т1.14), де (M_1 і M_2

- з'єднувальні муфти). Цій схемі відповідає еквівалентна схема, аналогічна наведеній на рис. 1.10:

Запас кінетичної енергії в реальній системі визначається за виразом:

$$W_k = \frac{J_d \omega_d^2}{2} + \frac{J_{M1} \omega_d^2}{2} + \frac{J_p \omega_6^2}{2} + \frac{J_{M2} \omega_6^2}{2} + \frac{m V_{PM}^2}{2}, \quad (1.31)$$

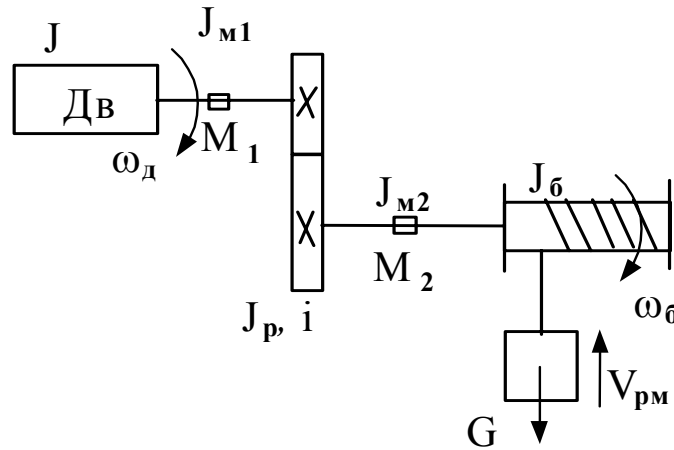


Рисунок Т1.14 - Кінематична схема системи ЕП підйомного механізму

а в еквівалентній схемі:

$$W_k = \frac{J'_E \omega_d^2}{2}. \quad (1.32)$$

Прирівнюючи ці вирази, отримаємо вираз для еквівалентного моменту інерції, приведенного до валу двигуна:

$$J'_E = J_{дв} + J_{M1} + \frac{J_p \omega_6^2}{\omega_d^2} + \frac{J_{M2} \omega_6^2}{\omega_d^2} + \frac{m_{PM} V_{PM}^2}{\omega_d^2}, \quad (1.33)$$

або з урахуванням того, що $\frac{\omega_d}{\omega_6} = i$

$$J'_E = J_d + J_{M1} + \frac{J_p}{i^2} + \frac{J_{M2}}{i^2} + m_{PM} \frac{V_{PM}^2}{\omega_d^2}. \quad (1.34)$$

У практичних розрахунках, якщо немає повної інформації про механічні елементи системи то можна наближено приймати момент інерції редуктора рівним $(0,2 \div 0,3) J_{\text{дв}}$, а момент інерції муфти - $(0,05-0,1) J_{\text{дв}}$.

У загальному випадку, коли до складу механічної частини приводу входить декілька передаточних пристроїв, що мають відповідні передаточні числа $i_1, i_2 \dots i_n$ і декілька елементів, що здійснюють обертальний і поступальний рух, еквівалентний приведений момент інерції визначають за формулою:

$$J'_E = J_{\text{дв}} + J_{\Sigma} + \sum \frac{J_n}{i_n^2} + \sum m_n \cdot \frac{V_n^2}{\omega_d^2}, \quad (1.35)$$

де J_{Σ} - сумарний момент інерції ланок, що обертаються зі швидкістю двигуна;

J_n - момент інерції n-го елемента;

i_n - загальне передаточне відношення для n-го елемента;

m_n - маса n-го елемента, що рухається поступально;

V_n - лінійна швидкість руху n-го елемента.

Момент інерції двигуна $J_{\text{дв}}$, визначається за паспортними даними, або за значенням його махового моменту GD^2 , вираженого в $\text{кг} \cdot \text{м}^2$:

$$J = \frac{GD^2}{4g}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (1.36)$$

Якщо маховий момент GD^2 вказаний у $[\text{кг} \cdot \text{м}^2]$, то

$$J = \frac{GD^2}{4}$$

У тих випадках, коли потрібно визначити приведену інерційну масу системи, що рухається поступально, вихідним рівнянням також є рівняння

рівності запасу кінетичної енергії в реальній і еквівалентній схемах, але розрахунок виконується відносно елемента, що рухається поступально.

Для розглянутої вище схеми (рис. Т1.14), приведена інерційна маса може бути визначена таким чином:

$$W_{k(\text{реал})} = \frac{J_d \omega_d^2}{2} + \frac{J_{m1} \omega_d^2}{2} + \frac{J_p \omega_6^2}{2} + \frac{J_{m2} \omega_6^2}{2} + \frac{J_6 \omega_6^2}{2} + \frac{m_{pm} v_{pm}^2}{2},$$

$$W_{k(\text{прив})} = \frac{m'_E v_{pm}^2}{2},$$

де

$$m'_E = \frac{J_d \omega_d^2}{v_{pm}^2} + \frac{J_{m1} \omega_d^2}{v_{pm}^2} + \frac{J_p \omega_6^2}{v_{pm}^2} + \frac{J_{m2} \omega_6^2}{v_{pm}^2} + \frac{J_6 \omega_6^2}{v_{pm}^2} + m_{pm}.$$

Т1.4. Механічні характеристики електродвигунів і виробничих механізмів

При вирішенні різноманітних задач дослідження роботи ЕП або його проектування, дуже важливим є знання механічних властивостей основних ланок приводного двигуна і робочого механізму (або його виконавчих органів). Так, наприклад, на стадії проектування, знання цих властивостей необхідне для правильного підбору елементів електропривода, яке забезпечить надійну і економічну роботу системи. Також у процесі експлуатації доводиться корегувати параметри приводу, виходячи з вимог або змін у технологічному процесі, що потребує порівняння властивостей і характеристик двигуна і робочої машини.

Встановлення механічних властивостей і особливостей названих ланок ЕП можливе при дослідженні та аналізі їх механічних характеристик, які є залежностями, що пов'язують момент і швидкість руху.

Залежність між швидкістю обертання двигуна і його моментом в будь-якому режимі роботи, у тому числі і перехідному, називається *динамічною механічною характеристикою*.

Якщо ЕП працює в усталеному (статичному) режимі, то залежність швидкості його обертання від моменту називається *статичною механічною характеристикою* (часто цю характеристику називають просто механічною характеристикою). Механічні характеристики можуть бути представлені як в аналітичному, так і графічному вигляді. У останньому випадку механічна характеристика є геометричним місцем точок на координатній площині (ω , M), що відповідають усталеному режиму роботи.

Слід відзначити, що для виробничих механізмів, які рухаються за допомогою електродвигуна, незалежною змінною є швидкість. Оскільки момент опору виникає як реакція зовнішніх сил на рухоме тіло, тому:

механічною характеристикою виробничого механізму називається залежність моменту опору від його кутової швидкості

$$M_c = f(\omega).$$

Момент опору M_c , який ще називають статичним моментом (або моментом навантаження) - це момент, що створюється робочою машиною, який доводиться долати двигуну.

Для електродвигуна навпаки, момент, що зумовлений взаємодією струму двигуна з магнітним потоком, є незалежною змінною, тому:

механічною характеристикою двигуна називають залежність кутової швидкості обертання двигуна від його електромагнітного моменту

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

Механічна характеристика двигуна визначає його навантажувальні властивості, показуючи, як змінюється його швидкість обертання від зміни навантаження на валу. Іноді механічні характеристики можуть бути представлені також і іншими залежностями.

Механічні характеристики робочих машин

Досліджуючи різноманітні виробничі механізми, нескладно відзначити, що вони мають різні механічні властивості, тобто мають різні механічні характеристики.

Для більшості виробничих механізмів механічні характеристики можуть бути описані аналітично за допомогою узагальненої формули виду:

$$M_c = M_o + (M_{c.\text{ном.}} - M_o) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^x, \quad (1.38)$$

де $M_{c.\text{ном.}}$ - момент опору механізму при номінальній швидкості обертання;

M_o - момент холостого ходу (момент тертя в рухомих частинах);

x - показник ступеня, що характеризує зміну моменту при зміні швидкості.

В залежності від значення ступеня зміни моменту опору від швидкості обертання можна класифікувати механічні характеристики виробничих механізмів на такі основні категорії.

Механічна характеристика робочої машини, що не залежить від кутової швидкості.

Очевидно, що при $x = 0$ $M_c = \text{const}$. Для реактивного моменту залежність $M_c = f(\omega)$ можна представити таким чином

$$M_c(\omega) = \text{sign}\omega \cdot \left(M_0 + (M_{\text{сн\text{ом}}} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^x \right).$$

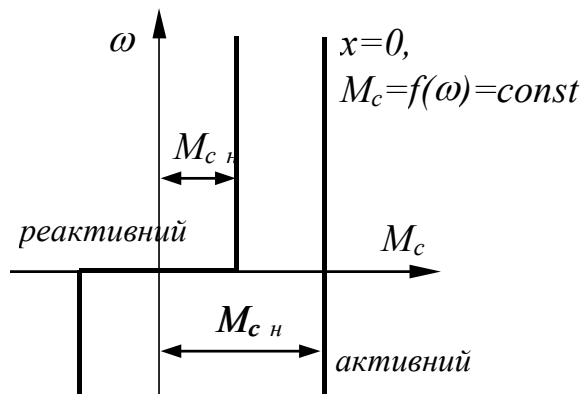


Рисунок Т1.16 - Механічна характеристика робочої машини, що не залежить від швидкості обертання

Для характеристик, зображених на рис. Т1.16., статичний момент $M_c = \text{const}$, ($x = 0$), і він не залежить від швидкості. Таку характеристику мають підйомні крани, лебідки, конвеєри і, з деяким наближенням, усі механізми, в яких основним видом опору є тертя, оскільки в межах робочих швидкостей момент тертя зазвичай змінюється незначно.

Лінійно зростаюча механічна характеристика робочої машини

Для цього випадку ($x = 1$), статичний момент опору лінійно залежить від швидкості. Таку характеристику, наприклад, має генератор постійного струму з незалежним збудженням, що працює на постійний зовнішній резистор (рис. Т1.17). Ця система використовується для лабораторних досліджень, коли потрібно навантажити електричний двигун.

$$M_c = M_0 + (M_{\text{сн\text{ом}}} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega_1}{\omega_H} \right)^x; \quad x = 1,0$$

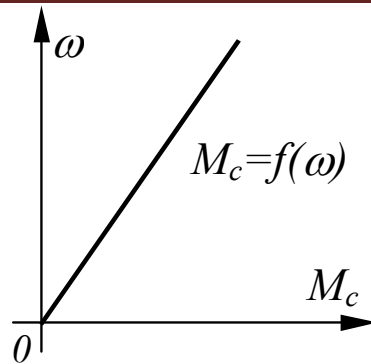


Рисунок Т1.17 - Механічна характеристика робочої машини, що лінійно залежить від швидкості обертання.

Нелінійно-зростаюча (параболічна, або вентиляторна) механічна характеристика моменту опору.

Цій характеристиці відповідає вираз:

$$M_c = M_0 + (M_{\text{сном}} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^{2-4} .$$

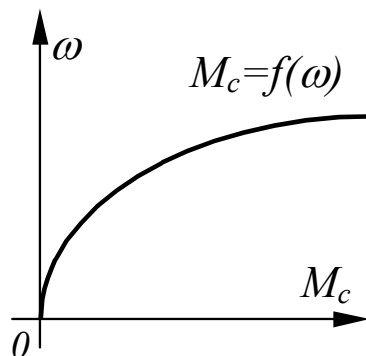


Рисунок Т1.18 - Нелінійно-зростаюча (вентиляторна) механічна характеристика робочої машини

Механізми, що мають таку характеристику, називають механізмами з вентиляторним моментом, оскільки у вентиляторів M_c залежить від ω^2 (рис. Т1.18). Прикладами механізмів із вентиляторною характеристикою можуть бути: вентилятори, відцентрові насоси, турбокомпресори. Вони

називаються також турбомеханізмами, а їх відмінність полягає лише в значенні показника ступеня x :

для вентиляторів - $x = 2$;

для турбокомпресорів - $x = 2 \div 2.5$;

для насосів - $x = 3 \div 4$, (причому значення x залежить від протитиску в мережі).

*Нелінійно-спадаюча (гіперболічна) механічна характеристика
робочої машини.*

Залежність статичного моменту можна представити у вигляді:

$$M_c = M_0 + (M_{\text{сном}} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^{-1}$$

Для таких характеристик, у першому наближенні, моменти опору змінюються обернено пропорційно швидкості (рис. Т1.19):

$$M \cong \frac{k}{\omega}, \text{ або } M\omega = k.$$

Це значить, що потужність, що споживається механізмом, з такою характеристикою, завжди залишається незмінною. Така характеристика властива різноманітним металорізальним верстатам (токарним, фрезерним, розточним), моталкам і т.п.

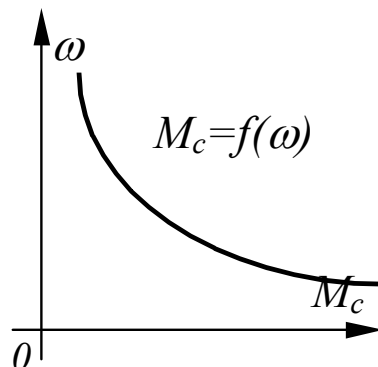


Рисунок Т1.19 - Нелінійно-спадаюча механічна характеристика робочої машини

Окрім названих (найбільше поширених), механічних характеристик виробничих механізмів (робочих машин), слід відзначити характеристики кривошипно-шатунних механізмів (рис. Т1.20). Момент опору таких РМ залежить від кута повороту ротора двигуна (від положення кривошипа). Прикладом можуть служити поршневі насоси, ткацькі верстати, рульовий привод морських суден і т.д. :

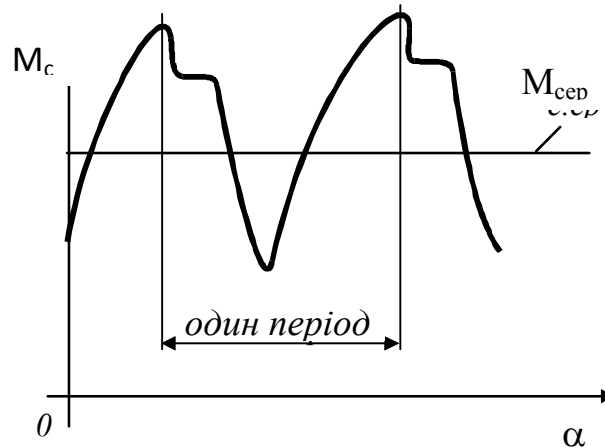


Рисунок Т1.20 - Механічні характеристики циклічного типу

В цього випадку момент M_c складається з постійної складової і змінної M_z , що періодично змінюється від кута повороту (α) валу двигуна. Така змінна складова може бути представлена у вигляді суми гармонійних коливань (рядом Фур'є).

Варто відзначити, що в транспортних і підйомних механізмів M_c залежить не тільки від швидкості, але і від положення механізму відносно шляху його переміщення.

Механічні характеристики електричних двигунів

Всі електричні двигуни, за винятком синхронних, мають таку основну властивість - їх швидкість обертання є спадаючою функцією моменту двигуна. Проте, ступінь зменшення швидкості зі зміною моменту

в різних двигунів різна і визначається параметром, що називається жорсткістю механічної характеристики.

Жорсткість механічної характеристики - це відношення різниці електромагнітних моментів, що розвиваються електричним двигуном, до відповідної різниці кутових швидкостей:

$$\beta = \frac{M_2 - M_1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} . \quad (1.39)$$

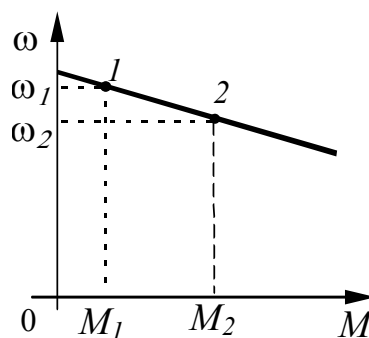


Рисунок Т1.21 - Графічне визначення жорсткості механічної характеристики

В залежності від того, за яким законом змінюється швидкість при зміні моменту на валу двигуна (лінійно чи нелінійно), жорсткість характеристик може бути як сталою (рис. Т1.21), так і змінною.

Для нелінійної механічної характеристики жорсткість визначається як перша похідна моменту за швидкістю в кожній точці характеристики (рис. Т1.22):

$$\beta = dM/d\omega \quad (1.40)$$

Зазвичай на робочих ділянках механічні характеристики двигунів мають від'ємну жорсткість. Поняття жорсткості можна застосувати і до характеристик виробничих механізмів.

За жорсткістю характеристики електродвигунів можна розділити на чотири категорії.

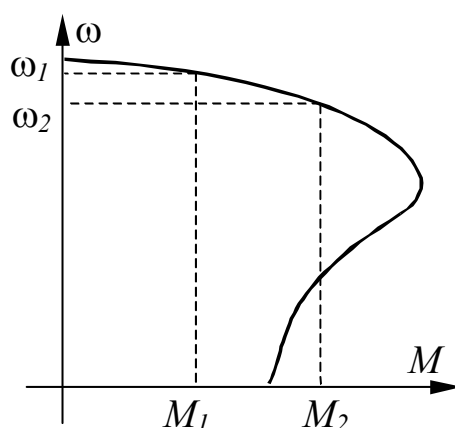


Рисунок Т1.22 - Визначення жорсткості нелінійних механічних характеристик

Абсолютно жорстка механічна характеристика електродвигуна.

Це така характеристика, для якої при зміні моменту на валу двигуна швидкість обертання залишається незмінною (рис. Т1.23):

$$\beta = \frac{M_2 - M_1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\Delta M}{0} = \infty$$

Таку характеристику мають синхронні двигуни.

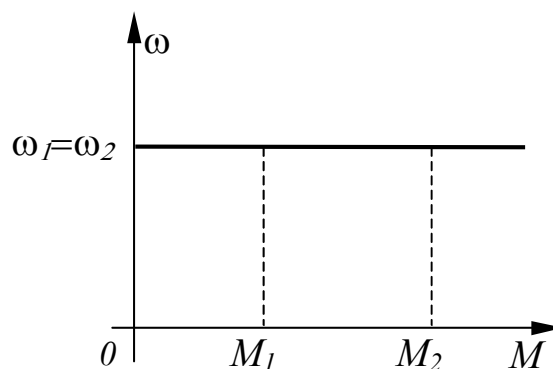


Рисунок Т1.23 - Абсолютно жорстка механічна характеристика електродвигуна

Жорстка механічна характеристика електродвигуна.

Це характеристика, в якій швидкість із зміною моменту зменшується достатньо мало (рис. Т2.24). Таку характеристику мають, наприклад, асинхронні двигуни в межах робочої частини характеристики, або двигуни

постійного струму незалежного збудження. Для таких характеристик жорсткість $\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} \geq 10$.

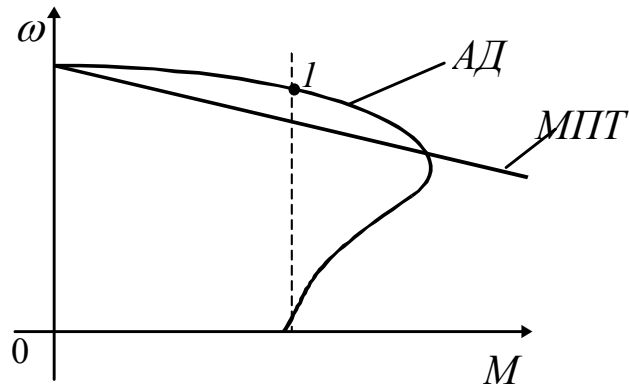


Рисунок Т1.24 - Жорстка механічна характеристика електродвигуна

М'яка механічна характеристика електродвигуна.

Ця характеристика має місце при жорсткості $\beta < 10$. Для таких характеристик при зміні моменту швидкість змінюється в значних межах ($\Delta \omega > 10\% \omega_{ном}$) (рис. Т1.25).

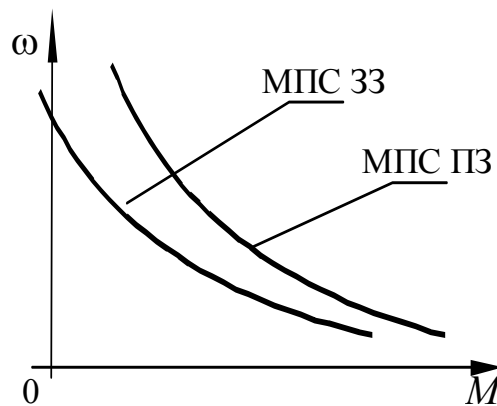


Рисунок Т1.25 - М'яка механічна характеристика електродвигуна

До м'яких характеристик відносяться характеристики двигуна постійного струму послідовного та змішаного збудження, реостатні характеристики двигунів постійного струму незалежного збудження та асинхронних двигунів.

Абсолютно м'яка механічна характеристика електродвигуна.

Це характеристика, для якої момент двигуна зі зміною швидкості залишається незмінним, тобто жорсткість $\beta = 0$ (рис. Т1.26). Таку характеристику, наприклад, має двигун постійного струму незалежного збудження при роботі в замкнутих системах у режимі стабілізації струму, або асинхронний двигун в системі частотний перетворювач - двигун:

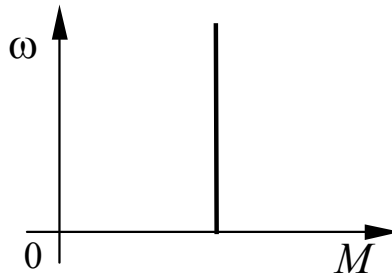


Рисунок Т1.26 - Абсолютно м'яка механічна характеристика.

В процесі роботи електропривод часто повинен забезпечити можливість регулювання швидкості двигуна.

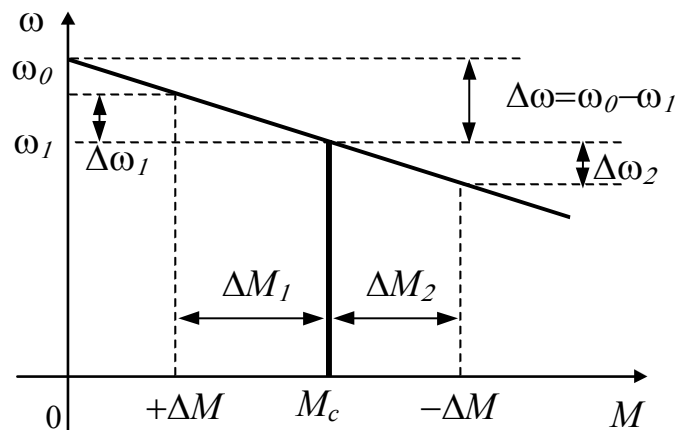


Рисунок Т1.27 - Визначення статичної похибки та статизму механічної характеристики.

При цьому одним із основних показників є статизм механічної характеристики, що досягається в процесі регулювання і який залежить від жорсткості механічної характеристики.

Статизм характеристики (Δ) - це відношення статичної похибки за швидкістю $\Delta\omega$ до швидкості ідеального холостого ходу що визначається у відсотках:

$$\Delta = \frac{\Delta\omega}{\omega} \cdot 100\%. \quad (1.41)$$

Статична похибка за швидкістю - це відхилення швидкості від заданого значення при зміні моменту навантаження на валу. Якщо в процесі регулювання жорсткість характеристики змінюється, то відхилення швидкості також буде змінюватися. Чим вище швидкість, тим менше $\Delta\omega$ і тим менший статизм характеристик. Величина статизму характеристик має безпосередній вплив на точність ЕП і продуктивність механізму.

При розробці систем електроприводу варто добиватися зменшення статизму характеристик.

В усталеному режимі обертальний момент дорівнює статичному моменту, $M_d = M_c$. Тому механічна характеристика виробничого механізму відображає закон зміни приведенного до валу двигуна моменту навантаження в залежності від швидкості. Механічна характеристика електродвигуна показує, як змінюється швидкість його обертання при різних навантаженнях. Статична складова моменту двигуна врівноважує момент, навантаження, тому вони рівні за абсолютною величиною, але протилежні за знаком, тобто $M_c = -M_{PM}$ (рис. Т1.28).

За цією умовою легко визначити координати усталеного руху ω_c і момент M_c двигуна, побудувавши на загальному графіку механічні характеристики двигуна $\omega = f(M_{dv})$ і дзеркальне відображення механічної характеристики робочої машини (механізму) $\omega = f(M_c)$.

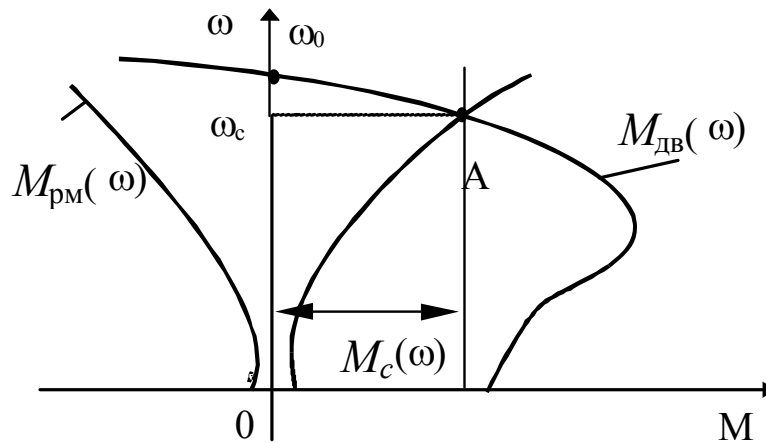


Рисунок Т1.28 - Суміщені механічні характеристики двигуна і робочої машини.

Т1.5. Статична стійкість електропривода

Роботі електродвигуна і робочої машини в усталеному режимі відповідає рівновага моментів двигуна і робочої машини, а точка усталеного режиму на координатній площині може бути визначена як точка перетину механічних характеристик електродвигуна і робочої машини для значень взятих за абсолютною величиною. Тоді є можливість підтримки тривалої стійкої роботи привода в усталеному режимі.

Встановимо фізичну сутність процесів, що виникають в електроприводі при відхиленні від параметрів усталеного режиму. Якщо, наприклад, момент опору M_{c1} (точка А) на валу двигуна змінився, як показано на рис. Т1.29 до величини M_{c2} , то це призведе до того, що швидкість і обертальний момент двигуна також зміняться і електропривод буде продовжувати працювати в усталеному режимі, але вже з іншою швидкістю і обертальним моментом (точка В).

Причому, для всіх неелектричних двигунів для відновлення рівноваги між моментом опору, що змінився, і моментом двигуна необхідна участь спеціальних зовнішніх регуляторів, що впливають на джерело енергії (зменшують або збільшують подачу палива, пару і т.д.) і,

тим самим, змінюють M_d , то в електричних двигунах роль такого автоматичного регулятора виконує ЕРС двигуна. Особливість електричних двигунів полягає в здатності автоматично (без зовнішніх регуляторів) підтримувати рівновагу системи при виникненні збурень та є дуже цінною властивістю системи електропривода.

Розглянемо, посилаючись на рис. Т1.29, як це відбувається. Характеристика 1 відповідає, наприклад, роботі конвеєра в режимі холостого ходу (тобто $M_{c1} = M_{xx}$). Якщо конвеєр завантажити, то момент опору зросте і буде дорівнювати M_{c2} . Слід відзначити, що поки двигун працював в режимі холостого ходу, його швидкість була ω_1 .

При зростанні навантаження двигун починає гальмуватися, швидкість його знижується і його ЕРС при цьому зменшується ($E = f(\omega)$). Зменшення ЕРС призведе до зростання струму в колі якоря і електромагнітного моменту, що розвивається двигуном. Зростання моменту буде продовжуватися доти, поки не наступить рівновага моментів двигуна і навантаження M_{c2} (точка ω_2). Ця точка відповідає новому усталеному режиму.

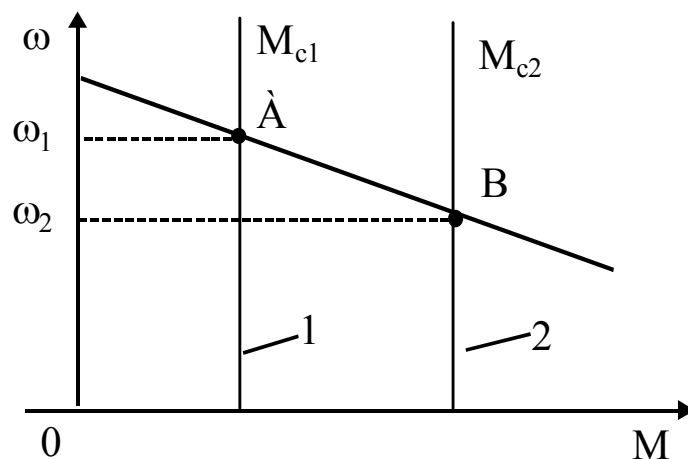


Рисунок Т1.29 - Зміна точки усталеного (статичного) режиму електродвигуна при зовнішньому впливі

Розглянуті умови роботи електропривода в усталеному режимі, характеризують статичну стійкість привода. Як і будь-який стан рівноваги, усталений режим може бути стійким і нестійким.

Стійким станом електропривода, або просто статичною стійкістю, називається здатність системи повертатися до стану стійкої рівноваги після того, як вона була виведена з цієї рівноваги нескінченно малими збуреннями.

Іншими словами, якщо при будь-яких малих відхиленнях від статичного режиму система повертається знову до усталеного режиму, то можна вважати, що така система стійка. Умови стійкості системи, визначаються формою механічної характеристики двигуна і робочої машини.

Для механічної системи критерієм стійкості є умова виникнення динамічного зусилля, що повертає систему у вихідний стан при виведенні системи з рівноваги. Знак динамічного зусилля повинен бути протилежним знаку приросту координати, що характеризує виведення системи зі стану рівноваги (рис. Т1.30).

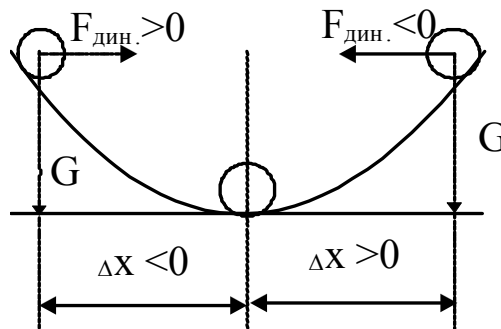


Рисунок Т1.30 - Умова статичної рівноваги системи

Стосовно ЕП можна сформулювати, що, *необхідною і достатньою умовою стійкої роботи електропривода є протилежність знаків у приросту швидкості, що характеризує виведення ЕП із стану рівноваги, і динамічного моменту що виникає при цьому:*

$$\frac{M_{\text{дин}}}{\Delta\omega} < 0. \quad (1.42)$$

Розглянемо випадок, коли момент механізму є сталою величиною, тобто $\beta_c = 0$, а в якості приводного двигуна використовується асинхронний двигун (АД), рис. Т1.31.

За умови, що $M_d = M_c$ двигун працює з усталеною швидкістю ω_c в точці А. Якщо під впливом яких-небудь збурень швидкість зменшиться до величини ω_1 (при цьому приріст швидкості $\omega_1 - \omega_c = \Delta\omega < 0$), то момент двигуна зростає до значення M_{d1} , а момент механізму M_c залишається незмінним. Під впливом позитивного динамічного моменту, що виник $M_{\text{дин}} = M_{d1} - M_c > 0$ електропривод починає розганятися, оскільки $\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{\text{дин}}}{J} > 0$. Цей процес закінчиться, коли швидкість обертання двигуна досягне значення $\omega = \omega_c$.

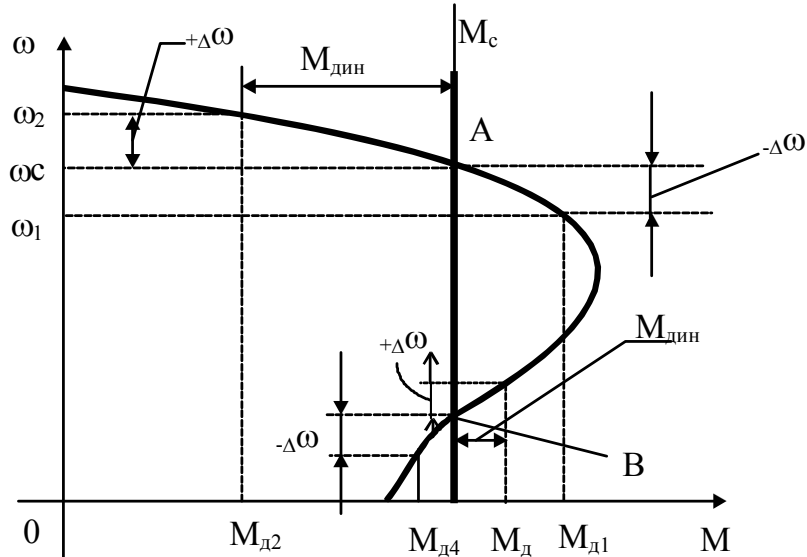


Рисунок Т1.31 - Стійкість асинхронного двигуна при $M_c = \text{const}$.

При зростанні швидкості на $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 > 0$ виникає динамічний момент $M_{\text{дин}} = M_{d2} - M_c < 0$ і, отже, $\frac{d\omega}{dt} < 0$. Завдяки цьому привод буде

уповільнюватися до швидкості ω_c . Отже, можна зробити висновок, що в точці А привод статично стійкий.

Відношення динамічного моменту $M_{\text{дин}}$ до перепаду швидкості $\Delta\omega$ називається коефіцієнтом стійкості:

$$k_{\text{ст}} = \frac{M_{\text{дин}}}{\Delta\omega}. \quad (1.43)$$

Усталений режим роботи можливий і в точці В, для якої також справедлива умова $M_d = M_c$. Проте, при виникненні позитивного приросту швидкості динамічний момент $M_{\text{дин}}$ у даному випадку $M_{\text{дин}} = M_{d3} - M_c > 0$ буде також позитивним, що призведе до подальшого зростання швидкості, тому що в цьому випадку $\frac{d\omega}{dt} > 0$.

І, навпаки, при зниженні швидкості на $\Delta\omega$ (для точки В) $M_{\text{дин}}$ також стає від'ємним, і швидкість привода буде зменшуватися. Умова стійкості не виконується, отже, у точці В електропривод статично нестійкий.

Розглянемо інший приклад. Нехай характеристика робочої машини має змінний характер (наприклад, вентиляторна характеристика), рис. Т1.32.

Очевидно, що при зміні швидкості від ω_c до ω_1 момент двигуна змінюється від M_c до M_1 а динамічний момент може бути визначений за виразом:

$$M_{\text{дин}} = \Delta M_d - \Delta M_c = \beta_d \Delta\omega - \beta_c \Delta\omega,$$

де - $\Delta M_d = M_1 - M_d$; $\Delta M_c = M_2 - M_c$; $\beta_d = \frac{\Delta M_d}{\Delta\omega}$; $\beta_c = \frac{\Delta M_c}{\Delta\omega}$, причому, в

даному випадку $\Delta M_d < \Delta M_c$, отже, коефіцієнт стійкості:

$$k_{\text{ст}} = \frac{M_{\text{дин}}}{\Delta\omega} = \frac{(\beta_d - \beta_c)\Delta\omega}{\Delta\omega} = (\beta_d - \beta_c) < 0.$$

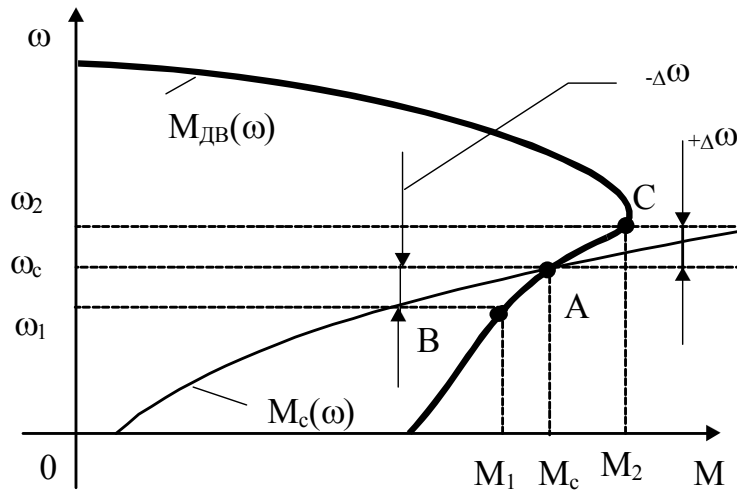


Рисунок Т1.32 - Стійкість асинхронного двигуна з вентиляторним

Якщо ж швидкість змінюється, наприклад, від ω_c до ω_2 , то $\Delta\omega > 0$ а динамічний момент :

$$M_{\text{дин}} = \Delta M_{\text{д}} - \Delta M_{\text{с}} = (\beta_{\text{д}} - \beta_{\text{с}})\Delta\omega < 0,$$

і коефіцієнт стійкості

$$k_{\text{ст}} = \frac{M_{\text{дин}}}{\Delta\omega} < 0.$$

Таким чином, можна зробити висновок, що стійкість приводу залежить від характеру моментів двигуна і робочої машини.

У точці А робота приводу в даному випадку буде стійкою. Неважко зробити висновок, виходячи з виразів для динамічного моменту і коефіцієнта стійкості

$$M_{\text{дин}} = \beta_{\text{д}}\Delta\omega - \beta_{\text{с}}\Delta\omega \quad \text{і} \quad k = \frac{M_{\text{дин}}}{\Delta\omega} = \beta_{\text{д}} - \beta_{\text{с}},$$

що в точках стійкої рівноваги виконується така нерівність:

$$\beta_{\text{д}} - \beta_{\text{с}} < 0 \quad \text{або} \quad \beta_{\text{д}} < \beta_{\text{с}}.$$

Відповідно, якщо $\beta_{\text{д}} - \beta_{\text{с}} > 0$ або $\beta_{\text{д}} > \beta_{\text{с}}$, то режим роботи електропривода нестійкий.

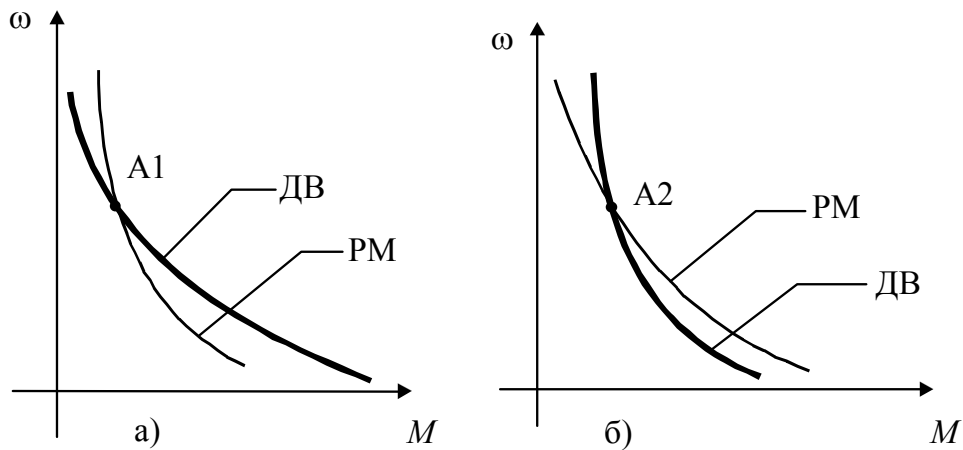


Рисунок Т1.33 - Сумісна робота двигуна і робочої машини: а) стійка; б) нестійка.

Наприклад, для двигуна постійного струму послідовного збудження (рис. Т1.33) у відповідності з вищенаведеними положеннями точка А1 точка стійкого режиму, а точка А2 - нестійкого.

Контрольні запитання

1. Які елементи входять до складу механічної частини ЕП?
2. Що називається жорсткістю та піддатливістю.
3. Від чого залежить жорсткість механічного валу.
4. Від чого залежить жорсткість механічного стрижня.
5. Правила приведення моментів інерції при обертальному русі.
6. Правила приведення мас при поступальному русі.
7. Правила приведення коефіцієнтів жорсткості та демпфірування.
8. Правила приведення прискорень та переміщень.
9. Які три найпоширеніші розрахункові схеми механічної частини.
10. Які моменти діють на механічну частину електропривода.
11. Що називається механічною характеристикою механізму.
12. Які є види статичного моменту та їх механічні характеристики.
13. Як враховуються втрати в кінематичному колі при обчисленні статичного моменту.

14. Як визначається знак моменту відносно знаку швидкості.
15. Які складові входять до рівняння Лагранжа 2-го роду.
16. Проаналізувати основне рівняння руху електропривода.
17. Чим визначається пружний момент.
18. Чим визначається момент в'язкого тертя.
19. Що таке динамічний момент та чим він визначається.
20. За яких умов настає статичний та динамічний режим роботи електропривода.
21. Що таке механічна характеристика двигуна та її жорсткість.
22. Чим визначається робоча точка двигуна на механічній характеристиці.
23. Що таке статизм характеристики?
24. Умови стійкості усталеного руху електропривода.
25. Що таке коефіцієнт стійкості системи?
26. Чому виникає задача про раціональне значення коефіцієнта передачі кінематичного кола.

Розділ Т2. ВЛАСТИВОСТІ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Т2.1. Двигуни постійного струму в електроприводі

Нерегульованим електроприводом називають систему, в якій відсутня можливість регулювання швидкості обертання двигуна засобами самого електропривода.

Це найбільш простий вид ЕП, який широко використовується практично у всіх галузях народного господарства в установках, що не потребують регулювання швидкості обертання виробничих машин або їх робочих органів. В даний час нерегульований електропривод складає близько 80 % від загального числа електроприводів і є основним споживачем електричної енергії.

Основою нерегульованого електропривода є електричний двигун (асинхронний, синхронний або двигун постійного струму), що безпосередньо або через трансформатор підключають до мережі живлення. Зміна частоти обертання може бути досягнута тільки за рахунок зміни навантаження на валу двигуна. Так, якщо до структури нерегульованого ЕП входить двигун постійного струму, то привод називають приводом постійного струму.

Оскільки конструктивні особливості і електричні властивості електричної машини забезпечують перетворення енергії в обох напрямках, тобто як із боку мережі до валу, так і з боку валу до мережі, то природно припустити, що ЕП у нерегульованому варіанті (крім ЕП на базі двигунів постійного струму послідовного збудження) може працювати в будь-якому з режимів: двигунному або гальмівному. При цьому властивості нерегульованого ЕП практично

цілком визначаються механічними й електричними властивостями самого двигуна.

Двигуни постійного струму (ДПС) є основою широкого класу ЕП постійного струму, як у нерегульованому, так і в регульованому варіантах. На базі ДПС реалізується привод різноманітних механізмів у промисловості, сільському господарстві, на транспорті, у вантажопідійомних і землерийних пристроях, на морських і річкових судах, у металообробній, текстильній, поліграфічній промисловості і ще цілому ряду пристроїв і механізмів. Малопотужні ДПС широко застосовуються в системах автоматики. У поєднанні з тиристорними чи транзисторними перетворювачами, що дозволяють здійснювати живлення ДПС від мережі змінного струму, ці двигуни набули широкого поширення в системах регульованого ЕП постійного струму (варто зауважити, що останнім часом основна перевага надається ЕП на базі двигунів змінного струму завдяки цілому ряду переваг, і, насамперед, через відсутність колекторного вузла і можливість нарощування потужностей установок). Дотепер широко використовувалися машини постійного струму як генератори для живлення двигунів постійного струму в стаціонарних і пересувних установках, як джерела електроенергії для заряду акумуляторних батарей, живлення електролізних і гальванічних ванн, для електропостачання різних споживачів в автомобілях, літаках, пасажирських вагонах і ін. Використання генераторів постійного струму, в сучасних умовах, знизилося завдяки впровадженню напівпровідникових перетворювачів (на транспорті синхронних генераторів, що працюють разом із напівпровідниковими випрямлячами), які набагато надійніші в експлуатації і простіші в обслуговуванні.

Двигуни постійного струму поділяють на три основні групи:

- двигуни постійного струму незалежного збудження (ДПС НЗ);
- двигуни постійного струму послідовного збудження або серієсні (ДПС ПЗ);
- двигуни постійного струму змішаного збудження (ДПС ЗЗ).

Розглянемо характеристики й електромеханічні властивості кожної групи.

Т2.2. Властивості і характеристики електроприводів з двигунами постійного струму незалежного збудження

Двигуни постійного струму незалежного збудження (ДПС НЗ) випускаються в даний час у діапазоні потужностей від 0.1÷20 кВт до 10 МВт. Обмеження їх потужності обумовлено такими причинами:

- із збільшенням потужності ДПС колектор машини стає за масою і габаритами спів-розмірним із масою якоря (діаметр колектора потужних ДПС НЗ досягає 2÷2,5 м);
- ускладнюються умови комутації, знижується надійність машини і її робото-здатність.

Застосовують ДПС НЗ, в основному, для тривалого режиму роботи. Частково вони використовуються в механізмах із повторно-короткочасним режимом роботи, коли необхідна стійка робота із зниженими швидкостями.

У регульованому варіанті ДПС НЗ застосовують у системі генератор-двигун (Г-Д) і у системі керований перетворювач-двигун (КП-Д). Конструктивно ДПС НЗ є найбільш складною електричною машиною, проте легко керованою. В даний час на їх основі реалізується біля 60% систем регульованих ЕП. Діапазон швидкостей сучасних ДПС НЗ коливається в межах 6÷200 с⁻¹.

Т2.2.1. Електромеханічні та механічні характеристики електроприводів з двигунами постійного струму незалежного збудження

Аналіз властивостей і статичних режимів роботи ДПС НЗ достатньо повно можна здійснити на основі його електромеханічної і механічної характеристик.

Електромеханічною або швидкісною характеристикою називається залежність кутової швидкості двигуна від струму в силовому колі:

$$\omega = f(I).$$

Механічною характеристикою електродвигуна називається залежність його кутової швидкості від електромагнітного моменту, що створюється взаємодією магнітного потоку і струму в його обмотках :

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

Характеристика називається природною, якщо вона отримана за відсутності додаткових опорів в якірному колі і номінальних значеннях напруги і магнітного потоку двигуна.

Штучними називаються характеристики, що одержуються при зміні параметрів двигуна: напруги живлення, потоку збудження або опору силового кола.

Штучні механічні характеристики використовують для плавного пуску і гальмування, а також для регулювання швидкості двигуна.

Механічні характеристики використовуються для аналізу роботи двигуна спільно з робочою машиною, а швидкісні дозволяють оцінити навантаження двигуна за струмом, що обмежується умовами

нагрівання і нормальної (безіскрової) комутації. Водночас, електромеханічні і механічні характеристики тісно взаємозв'язані, оскільки електромагнітний момент двигуна, визначається значеннями струму і магнітного потоку машини.

Схема включення ДПС НЗ представлена на рис. Т2.1. Якір двигуна і обмотка збудження (ОЗ) живляться від незалежних джерел напруги, що дає можливість окремо регулювати напругу на якорі та ОЗ і виготовляти їх з різною номінальною напругою.

Якщо потужність джерела живлення, U_m значно перевищує номінальну потужність ДПС, то його внутрішній опір дуже малий і практично не залежить від струму в мережі. Завдяки цьому ОЗ може бути з'єднана паралельно з якорем (показано пунктиром), а включення ДПС із паралельним (шунтовим) збудженням до мережі не викликає коливань напруги мережі ($U_m = \text{const}$). В такому випадку кола якоря і обмотки збудження не впливають одне на одного, тобто стають незалежними, як і для схеми з незалежним збудженням.

При виведенні рівнянь електромеханічної та механічної характеристик ДПС НЗ припускається, що:

- в двигуні є компенсаційна обмотка (КО) і обмотка додаткових полюсів (ДП), що дозволяє не враховувати вплив реакції якоря;
- напруга мережі стала $U_m = \text{const}$;
- джерело живлення має нескінченну потужність;
- опір з'єднувальних проводів дорівнює нулю;
- магнітний потік двигуна сталий і дорівнює номінальному;
- щітки двигуна розташовані на геометричній нейтралі; комутація машини вважається ідеальною.

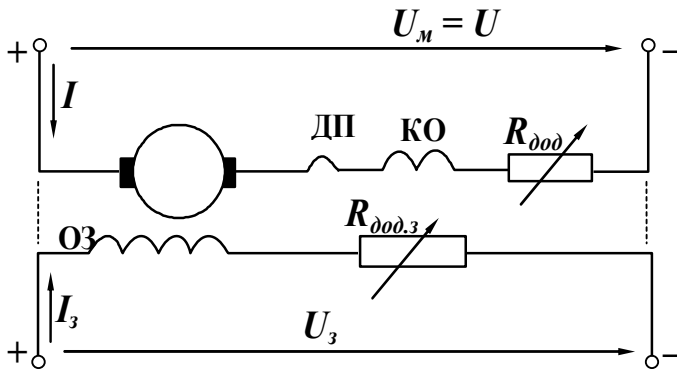


Рисунок Т2.1 - Принципова схема двигуна постійного струму незалежного збудження

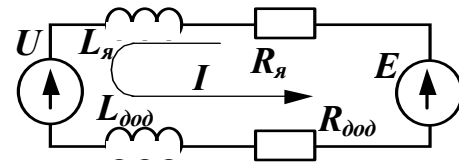


Рисунок Т2.2 - Схема заміщення двигуна постійного струму незалежного збудження

На основі схеми заміщення якірного кола ДПС НЗ (рис.2.2.) запишемо рівняння електричної рівноваги якірного кола для будь-якого моменту часу:

$$R_{\Sigma} I(t) + L_{\Sigma} \frac{dI(t)}{dt} + E(t) = U(t), \quad (2.1)$$

де - $I(t)$, $U(t)$, $E(t)$ - відповідно миттєве значення струму, напруги прикладеної до якоря і ЕРС двигуна;

$R_{\Sigma} = R_{я\Sigma} + R_{дод}$; $R_{я\Sigma} = R_{я} + R_{ди} + R_{ко} + R_{щ}$ - активний опір якірного кола;

$L_{\Sigma} = L_{я\Sigma} + L_{дод}$; $L_{я\Sigma} = L_{я} + L_{ди} + L_{ко}$ - індуктивність якірного кола.

Робота ДПС НЗ описується також такими рівняннями:

- рівнянням ЕРС двигуна:

$$E(t) = k_e \Phi \omega(t), \quad (2.2)$$

де $k_e = \frac{pN}{2\pi a}$ - конструктивний параметр ДПС: p - число пар полюсів,

N - число активних провідників обмотки якоря; a - число паралельних віток обмотки якоря,

Φ - магнітний потік (Вб),

ω - кутова швидкість (рад/с);

- рівнянням моменту (на основі закону Ампера):

$$M(t) = \kappa_m \Phi I(t), \quad (2.3)$$

де - $M(t)$ - електромагнітний момент двигуна (Нм),

$\kappa_m = \kappa_e = \kappa$ - конструктивний коефіцієнт (рівність κ_e і κ_m справедлива тільки за умови, що всі параметри у формулі виражені в одиницях СІ);

- рівнянням руху:

$$M(t) - M_c = J'_\Sigma \frac{d\omega(t)}{dt}, \quad (2.4)$$

де - $M(t)$ - електромагнітний момент двигуна,

M_c - момент опору,

J'_Σ - сумарний момент інерції електропривода, приведений до валу двигуна,

ω - кутова швидкість двигуна.

Таким чином ДПС НЗ може бути описаний системою рівнянь:

$$\begin{aligned} U(t) &= I(t) \cdot R_\Sigma + L_\Sigma \frac{dI(t)}{dt} + E(t); \\ M(t) &= \kappa \Phi I(t); \\ E(t) &= \kappa \Phi \omega(t); \\ M(t) - M_c &= J'_\Sigma \frac{d\omega(t)}{dt}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Ці рівняння можна застосовувати для аналізу електродвигуна як у статичних, так і в динамічних режимах. Зокрема, для статичного (усталеного режиму) система рівнянь (2.5) набуде виду :

$$\begin{aligned} U &= IR_\Sigma + \kappa \Phi \omega; \\ \kappa \Phi I &= M = M_c, \end{aligned} \quad (2.6)$$

де U , I , ω , M - параметри ДПС НЗ в усталеному режимі.

З рівняння (2.6) можна записати вираз для електромеханічної характеристики:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{IR_{\Sigma}}{k\Phi}, \quad \text{або} \quad \omega = f(I). \quad (2.7)$$

Підставивши в (2.7) замість значення струму I його вираз через момент двигуна

$$I = \frac{M}{k\Phi}, \quad (2.8)$$

одержимо вираз для механічної характеристики ДПС НЗ:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR_{\Sigma}}{(k\Phi)^2}, \quad \text{або} \quad \omega = f(M). \quad (2.9)$$

Для значень $U = U_{\text{ном}}$, $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$, $R_{\Sigma} = R_{\text{я}\Sigma}$ рівняння (2.7) і (2.9) описують природну електромеханічну (2.10) і механічну (2.11) характеристики двигуна:

$$\omega_{\text{п}} = \frac{U_{\text{ном}} - IR_{\text{я}\Sigma}}{k\Phi_{\text{ном}}}; \quad (2.10)$$

$$\omega_{\text{п}} = \frac{U_{\text{ном}}}{k\Phi_{\text{ном}}} - \frac{MR_{\text{я}\Sigma}}{(k\Phi_{\text{ном}})^2}. \quad (2.11)$$

За умови, що $\Phi = \text{const}$, рівняння електромеханічної і механічної характеристик ДПС НЗ є прямими лініями, що відтинають на осях координат ω і M відрізки:

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}, \quad (\text{при } M=0, \text{ або } I=0); \quad (2.12)$$

$$I_{\text{кз}} = \frac{U}{R_{\Sigma}}, \quad (\text{при } \omega=0); \quad (2.13)$$

$$M_{\text{к.з.}} = \frac{Uk\Phi}{R_{\Sigma}}. \quad (2.14)$$

Загальний вигляд природної електромеханічної і механічної характеристик ДПС НЗ наведений на рис. Т2.3:

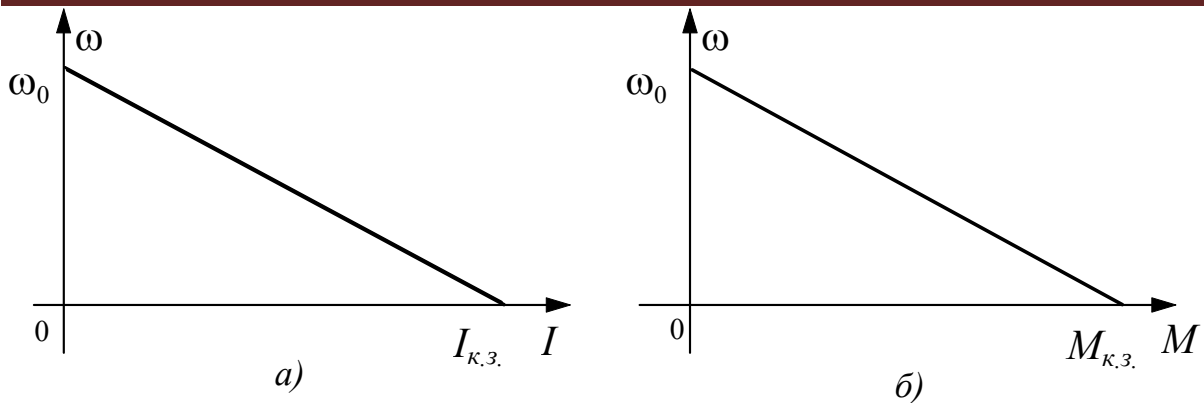


Рисунок Т2.3 - Характеристики ДПС а) електромеханічна; б) механічна.

Вираз (2.12) визначає швидкість ідеального холостого ходу двигуна. Реально якір може обертатися зі швидкістю $\omega = \omega_0$ тільки за умови, що до нього буде прикладений обертаючий момент із боку механізму, що компенсує постійні втрати двигуна (втрати на тертя, гістерезис, вентиляційні втрати).

Значення струму і моменту двигуна, що наведені у формулах (2.13) і (2.14), називаються відповідно струмом і моментом короткого замикання, причому струм короткого замикання не залежить від величини магнітного потоку (для ДПС $I_{к.з.}/I_{ном} = 8 \div 10$, тобто на порядок вищий номінального).

Робота двигуна при значеннях струму $I > I_{ном}$ негативно впливає на роботу щітково-колекторного вузла, тому на практиці необхідно обмежувати величину пускового струму до $(2 \div 2,5)I_{ном}$.

Відношення

$$\frac{I_{к.з.}}{I_{ном}} = 2 \div 2,5 = \lambda_i \quad (2.15)$$

називається допустимою перевантажувальною здатністю за струмом.

Другий член у рівняннях (2.7) і (2.9), що зумовлений навантаженням двигуна й опором якірного кола називається

статичним падінням кутової швидкості електропривода ($\Delta\omega_c$). Таким чином, вираз електромеханічної або механічної характеристики двигуна можна записати в такому вигляді:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega_c, \quad (2.16)$$

$$\text{де } \Delta\omega_c = \frac{IR_\Sigma}{k\Phi} = \frac{MR_\Sigma}{(k\Phi)^2}$$

Найменше значення $\Delta\omega_c$ має місце на природній характеристиці.

При введенні в якірне коло додаткового опору $R_{\text{дод}}$ кут нахилу характеристик збільшується, а швидкість двигуна для однакового значення навантаження зменшується (рис. Т2.4).

Штучні характеристики, що одержуються введенням в якірне коло двигуна додаткового опору, називають *реостатними*. На практиці для роботи ДПС НЗ у складі ЕП використовують як природну, так і штучні (реостатні) характеристики.

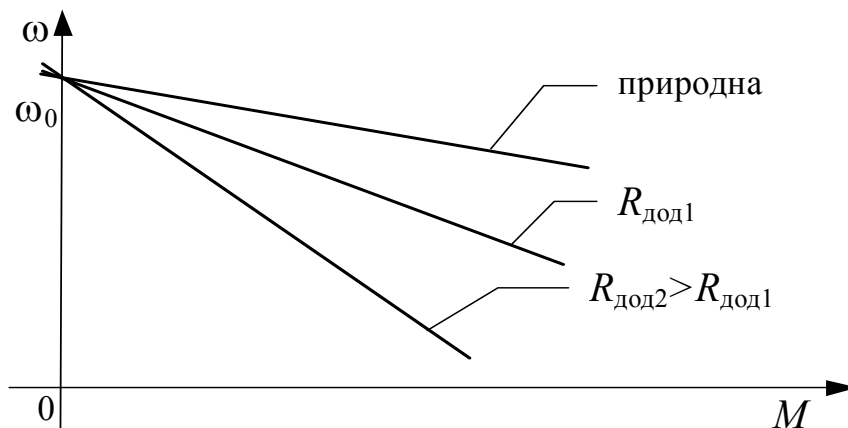


Рисунок Т2.4 - Штучні характеристики ДПС НЗ

У загальному випадку механічна характеристика ДПС є прямою лінією, що проходить через II, I, IV квадранти, причому, це справедливо лише для механічних характеристик $\omega = f(M)$. Механічні характеристики (рис. Т2.5), розраховані у функції моменту на валу

$\omega = f(M_B)$, мають розрив неперервності за рахунок того, що в двигунному режимі

$$M_B = M - M_0, \quad (2.17)$$

а в гальмівному

$$M_B = M + M_0. \quad (2.18)$$

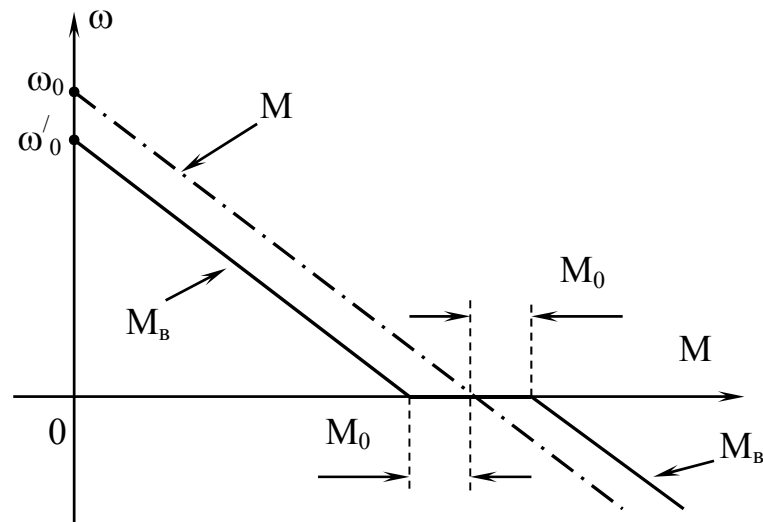


Рисунок Т2.5 - Механічні характеристики ДПС НЗ у функції електромагнітного моменту і моменту на валу.

Т2.2.2. Визначення параметрів двигунів постійного струму незалежного збудження за каталожними даними

В інженерних розрахунках, часто виникає необхідність, визначення параметрів та дослідження характеристик електродвигунів за умови коли інформації мало, або є тільки паспортні дані.

Як правило, у паспортних даних на двигун постійного струму наводяться такі параметри: $P_{ном}$; $n_{ном}$; $U_{ном}$; $I_{ном}$; $\eta_{ном}$. Ці дані дозволяють визначити всі основні параметри, що характеризують двигун.

Номінальний момент на валу:

$$M_{\text{ном}} [\text{Нм}] = \frac{P_{\text{ном}} [\text{Вт}]}{\omega_{\text{ном}} [\text{с}^{-1}]}, \quad \text{де } \omega_{\text{но}} = \frac{\pi n_{\text{ном}}}{30} \approx 0,1047n_{\text{ном}}.$$

Номинальний опір якоря $R_{\text{я}}$ і якірної обмотки $R_{\text{я}\Sigma}$ визначаються таким чином:

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

Індуктивність якірної обмотки:

$$L_{\text{я}\Sigma} = k \frac{R_{\text{я}\Sigma}}{pn_{\text{ном}}} = k \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}} pn_{\text{ном}}},$$

де p - число пар полюсів;

k - залежить від конструкції якірної обмотки і знаходиться в таких межах: $k = 4 \div 6$ для ДПС нормального виконання; $k = 7 \div 9$ для двигунів із компенсаційною обмоткою.

Момент інерції двигуна:

$$J = 0,00015M_{\text{ном}}^{1,5} \quad [\text{кгм}^2].$$

Іноді в паспортних даних вказується маховий момент GD^2 , при цьому:

$$\text{якщо } GD^2 [\text{кгм}^2], \text{ то } J = \frac{GD^2}{4};$$

$$\text{якщо } GD^2 [\text{кгсм}^2], \text{ то } J = \frac{GD^2}{4g};$$

$$\text{якщо } GD^2 [\text{Нм}^2], \text{ то } J = \frac{GD^2}{4g},$$

- коефіцієнт потоку ДПС:

$$k\Phi_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} R_{\text{я}\Sigma}}{\omega_{\text{ном}}}$$

де $R_{\text{я}\Sigma} = R_{\text{я}} + R_{\text{д.п.}} + R_{\text{щ}} + R_{\text{к.о.}}$.

Т2.2.3. Режими роботи двигунів постійного струму незалежного збудження

Двигун, як електромеханічний перетворювач, може працювати в одному із двох режимів:

- двигунному (рушійному, коли електрична енергія, що споживається двигуном від мережі, перетворюється в механічну);
- гальмівному (генераторному, коли механічна енергія, джерелом якої є РМ, перетворюється в електричну).

До гальмівних режимів роботи відносять:

- генераторне гальмування з віддачею енергії в мережу (рекуперативне гальмування) коли $E > U$;
- гальмування противмиканням коли E збігається з U за напрямком;
- електродинамічне гальмування $U=0$.

Двигунний режим роботи

Двигунному режиму роботи відповідає ділянка характеристики ДПС, що розташована у I (або III) квадранті (рис. Т2.6).

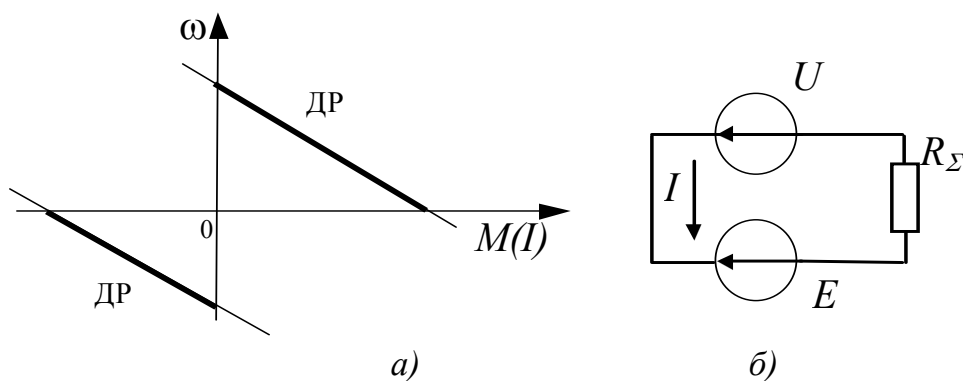


Рисунок Т2.6 - Двигунний режим роботи: а) механічна характеристика; б) схема заміщення

У двигунному режимі величина напруги, що прикладена до якоря більша за величину наведеної електрорушійної сили (ЕРС), причому ЕРС направлена зустрічно напрузі U , а напрямок струму якоря збігається з напрямком напруги (*це основний закон двигунного режиму*). На основі цього струм у двигунному режимі:

$$I = \frac{U - k\Phi_{\text{ном}}\omega}{R_{\Sigma}} = \frac{U - E}{R_{\Sigma}} > 0, \quad (2.19)$$

а електромагнітний момент:

$$M = k\Phi I, \quad (2.20)$$

також буде більшим нуля.

А з позицій перетворення енергії

$$\begin{aligned} P_m &= IU = (E + IR_{\Sigma})I; \\ UI &= IE + I^2R_{\Sigma}, \end{aligned} \quad (2.21)$$

Звідки

$$P_m = P_e + \Delta P_e$$

тобто $P_m > P_e$, отже, двигун споживає енергію з мережі.

Гальмівні режими роботи

Для реалізації гальмівного режиму двигуна необхідно, щоб напрямки його ЕРС і струму в якорному колі I_a збігалися. Згідно схеми заміщення це можливо за таких умов:

- якщо $E > U$ (режим рекуперативного гальмування);
- якщо E збігається з U за напрямком (режим гальмування противмиканням);
- якщо $U = 0$ (режим електродинамічного гальмування).

Розглянемо окремо кожний випадок.

Режим рекуперативного гальмування

Перехід у цей режим має місце, коли з боку виробничого механізму на вал двигуна діє момент M , що збігається за напрямом з моментом двигуна (наприклад: спуск вантажу, або рух транспортного засобу вниз похилою поверхнею та ін.).

З рівняння електричної рівноваги струм, що споживається із мережі в двигунному режимі,

$$I = \frac{U - E}{R_{\Sigma}} = \frac{U - k\Phi\omega}{R_{\Sigma}}. \quad (2.22)$$

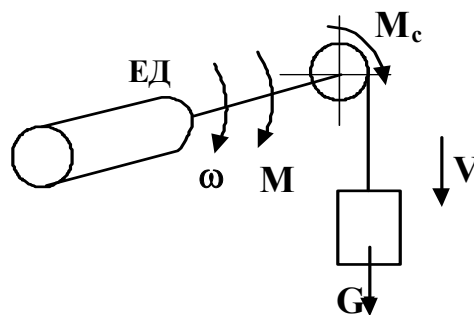


Рисунок Т2.7 - Електропривод підйомної установки в режимі рекуперативного гальмування

Під дією сумарного моменту з боку двигуна і робочої машини система буде прискорюватися, ЕРС двигуна буде зростати, а струм - відповідно зменшуватися (рис. Т2.7. і рис. Т2.8).

При досягненні швидкості двигуна $\omega = \omega_0$, ЕРС буде дорівнювати напрузі, що прикладена до якоря і машина буде працювати в режимі ідеального холостого ходу.

Подальше збільшення швидкості під дією моменту робочої машини призведе до того, що ЕРС двигуна за абсолютною величиною стане більшою напруги живлення ($|E| > |U|$), при цьому струм якоря змінить свій напрямок:

$$I = \frac{U - E}{R_{\Sigma}} = \frac{-(E - U)}{R_{\Sigma}} < 0, \quad (2.23)$$

і машина перейде з двигунного режиму в генераторний, віддаючи енергію в мережу, а двигун буде розвивати гальмівний момент. Усталеному режиму роботи будуть відповідати точки 1(1'), або 2(2') координатної площини.

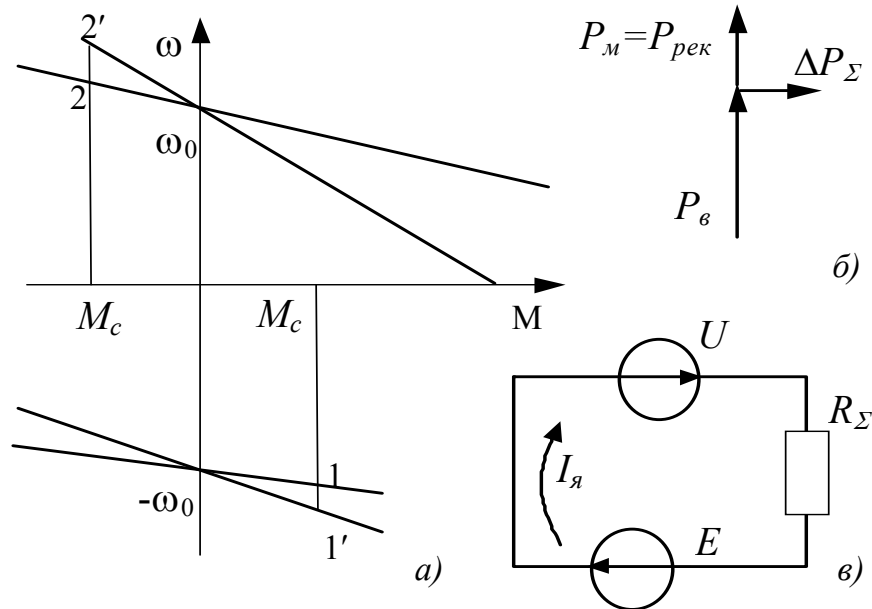


Рисунок Т2.8 - Рекуперативне гальмування ДПС НЗ: а) механічні характеристики, б) діаграма перетворення потужності, в) схема заміщення

Оскільки перехід в цей режим відбувся без зміни параметрів електропривода і схеми його включення, а тільки за рахунок підведення до валу машини додаткового механічного моменту, то рівняння електромеханічної і механічної характеристик залишаються такими ж, як і для двигунного режиму:

Електромеханічна характеристика:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{(-I)R_{\Sigma}}{k\Phi} = \frac{U + IR_{\Sigma}}{k\Phi}. \quad (2.24)$$

Механічна характеристика:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{(-M)R_{\Sigma}}{(k\Phi)^2} = \frac{U}{k\Phi} + \frac{MR_{\Sigma}}{(k\Phi)^2}. \quad (2.25)$$

Гальмівному режиму з рекуперацією енергії в мережу відповідає ділянка характеристики, що розміщена у II або IV квадранті для $|\omega| > |\omega_0|$. Як і в двигунному режимі, збільшення опору кола якоря збільшує крутизну характеристики; при цьому той же гальмівний момент двигун розвиває вже за більшої швидкості (тому на практиці режим рекуперативного гальмування реалізують без зміни опору якорного кола).

Характеристика двигуна в цьому випадку є продовженням механічної характеристики в двигунному режимі. Такий спосіб гальмування найбільш економічний, але реалізується лише в тих системах ЕП, де можлива робота зі швидкістю $\omega > \omega_0$.

Режим гальмування противмиканням

Гальмування противмиканням двигуна постійного струму незалежного збудження може бути реалізоване двома способами:

- зміною полярності напруги обмотки якоря або обмотки збудження, тобто зміна напрямку обертання. На рис. Т2.9 наведений фрагмент схеми включення ДПС НЗ, що забезпечує реверс напруги на якорі

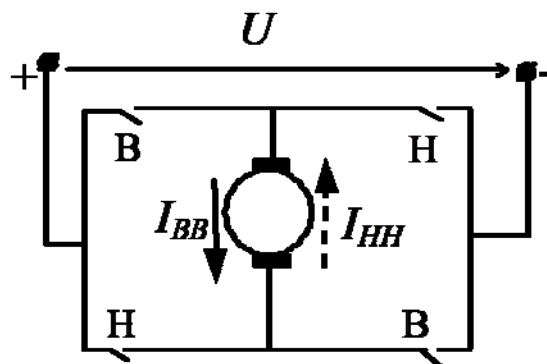


Рисунок. Т2.9 - Реверсивна схема включення ДПС НЗ із реверсом у якорному колі

- примусовим обертанням якоря двигуна в зворотному напрямку за рахунок моменту навантаження (рис.Т2.10).

При прикладенні до двигуна напруги зворотної полярності (показано пунктиром на схемі заміщення (рис. Т2.9), струм у колі якорі змінить свій напрямок і момент двигуна стане гальмівним.

Для такого способу

Процес гальмування при зміні полярності напруги на якорі і діаграма перетворення потужності представлені на рис. Т2.10 (II і III квадрант):

В момент реверсу напруги на якорі, двигун через інерційність, з тією ж швидкістю переходить із двигунного режиму (точка А) у режим проти-вмикання (точка В). Гальмування в цьому режимі (ділянка характеристики від точки В до точки С) здійснюється до повної зупинки двигуна (точка С, що відповідає режиму короткого замикання ($\omega = 0$, $M = M_{кз}$)). Якщо в цей момент не відключити двигун, то у випадку реактивного характеру моменту навантаження але меншого за величиною ніж момент реверсу за швидкістю для $M_{рев}$, двигун почне обертатися в зворотному напрямку.

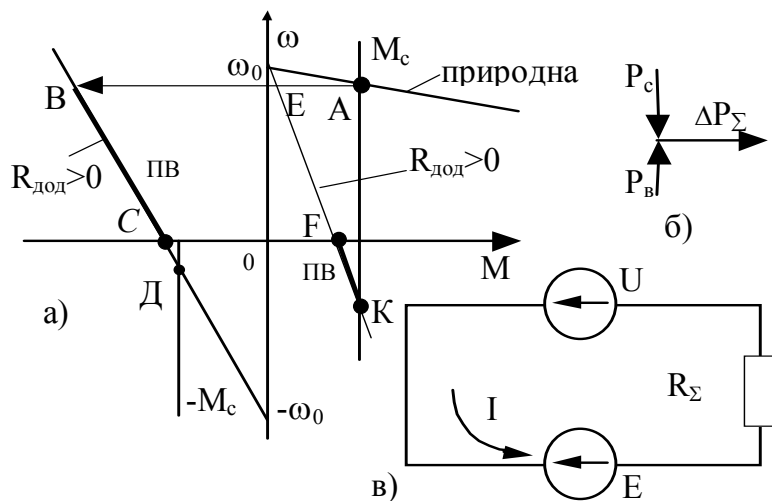


Рисунок Т2.10. Гальмування противмиканням ДПС НЗ: а) механічні характеристики; б) діаграма перетворення потужності; в) схема заміщення

Струм в режимі ПВ згідно (2.26) змінює свій знак і за величиною перевищує струм короткого замикання, тому для нормальної роботи ЕП необхідно обмежувати струм проти-вмикання введенням у якірне коло додаткового опору $R_{\text{дод}}$. На практиці цей режим використовують для одержання малих швидкостей механізмів (зокрема, підйомних механізмів).

Гальмування противмиканням можна реалізувати в ЕП, що працює з активним моментом навантаження, якщо забезпечити пусковий момент двигуна, менший ніж момент опору на його валу. На практиці це досягається введенням великого додаткового опору в силове коло, як показано на рис. 2.10. (I і VI квадрант):

Збільшення опору переводить двигун на штучну характеристику з більшою крутизною (точка E), для якої пусковий момент двигуна значно менший статичного моменту $M_{\text{пуск}} \ll M_c$. Двигун починає уповільнюватися спочатку в двигунному режимі до повної зупинки (точка F), а потім реверсується за швидкістю і переходить в режим проти-вмикання. Під дією динамічного моменту $M_{\text{дин}} < 0$ швидкість двигуна в зворотному напрямку зростає, поки момент двигуна не стане рівним моменту навантаження (точка K).

Механічна характеристика двигуна в цьому випадку має вид:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR_{\Sigma}}{(k\Phi)^2}, \quad (2.28)$$

а її жорсткість визначається величиною додаткового опору, введеного в якірне коло.

Режим електродинамічного гальмування

Режим електродинамічного (динамічного) гальмування виникає за умови, коли якірне коло двигуна відключити від мережі (причому

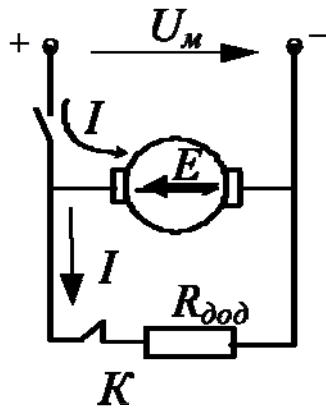


Рисунок Т2.11 - Схема включення якірного кола ДПС НЗ у режимі динамічного гальмування

двигун залишається збудженим) і замкнути на зовнішній опір (рис. Т2.11).

У такому режимі електрична машина працює як генератор за рахунок кінетичної енергії, запасеної в обертових частинах ЕД і РМ, або за рахунок потенціальної енергії вантажу, що опускається. У обох випадках генерована енергія витрачається на нагрівання обмоток якоря і додаткового опору $R_{\text{дод}}$.

Причиною, що зумовлює наявність струму в колі якоря, є ЕРС, величина і знак якої визначаються потоком і швидкістю обертання машини.

У режимі динамічного гальмування напрямок обертання двигуна не змінюється, і отже, знак ЕРС зберігається (рис. Т2.12, б). При цьому напрямок струму в обмотці якоря по відношенню до двигунного режиму, зміниться на протилежний. Це очевидно з аналізу рівняння електричної рівноваги, що у даному випадку набуває вигляду:

$$IR_{\Sigma} = 0 - E; \quad I = \frac{-E}{R_{\Sigma}}, \quad (2.29)$$

Вираз для швидкісної і механічної характеристик :

$$\omega = \frac{-IR_{\Sigma}}{k\Phi}; \quad (2.20)$$

$$\omega = \frac{-MR_{\Sigma}}{(k\Phi)^2}. \quad (2.21)$$

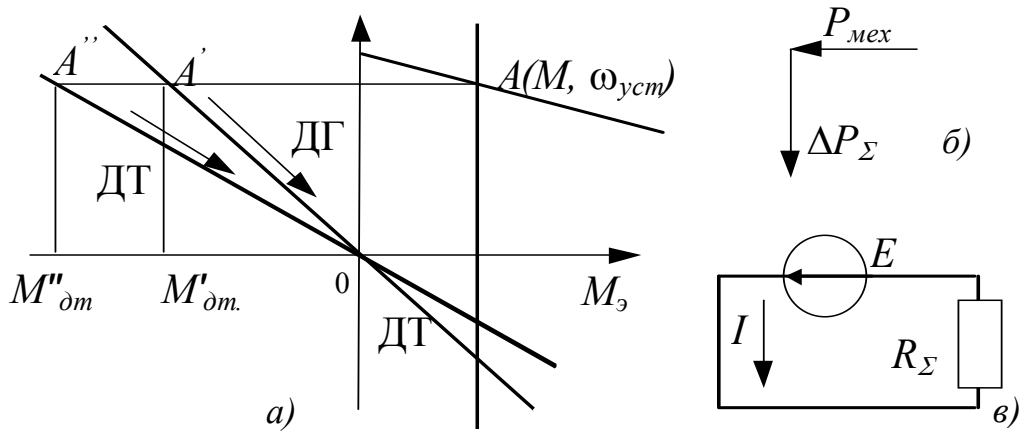


Рисунок Т2.12 - Електродинамічне гальмування ДПС НЗ: а) механічні характеристики, б) діаграма перетворення потужності в) схема заміщення,

Нескладно бачити, що коли струм (момент), дорівнює нулю, швидкість обертання двигуна також дорівнює нулю:

$$\omega = \frac{-IR}{\text{кФ}} = \frac{-MR_{\Sigma}}{(\text{кФ})^2} = 0,$$

тобто характеристики ДПС НЗ у режимі динамічного гальмування є прямими лініями, які розташовані в II або IV квадрантах, і проходять через нуль координатної площини. Нахил характеристик для одного і того ж навантаження пропорційний $R_{\text{дод}}$, введеному в якірне коло.

Найбільш інтенсивне гальмування одержується при закорочуванні якоря (при цьому характеристика динамічного гальмування паралельна природній в двигунному режимі). Проте за умовами нагрівання ДПС, струм доводиться обмежувати введенням $R_{\text{дод}}$.

Динамічне гальмування може бути використане для гальмування при опусканні вантажу. При цьому новий усталений режим - це точка перетину характеристик двигуна і РМ. Якщо двигун був включений на піднімання то для активного навантаження переведення його в режим ДГ. буде супроводжуватися спочатку гальмуванням двигуна при підйомі, а потім (при переході через 0) його швидкість

(напрямок обертання) змінює свій знак, і двигун вже розганяється в режимі ДГ до усталеної швидкості. Тому для зупинки двигуна в режимі динамічного гальмування при $\omega \approx 0$ накладається механічне гальмо.

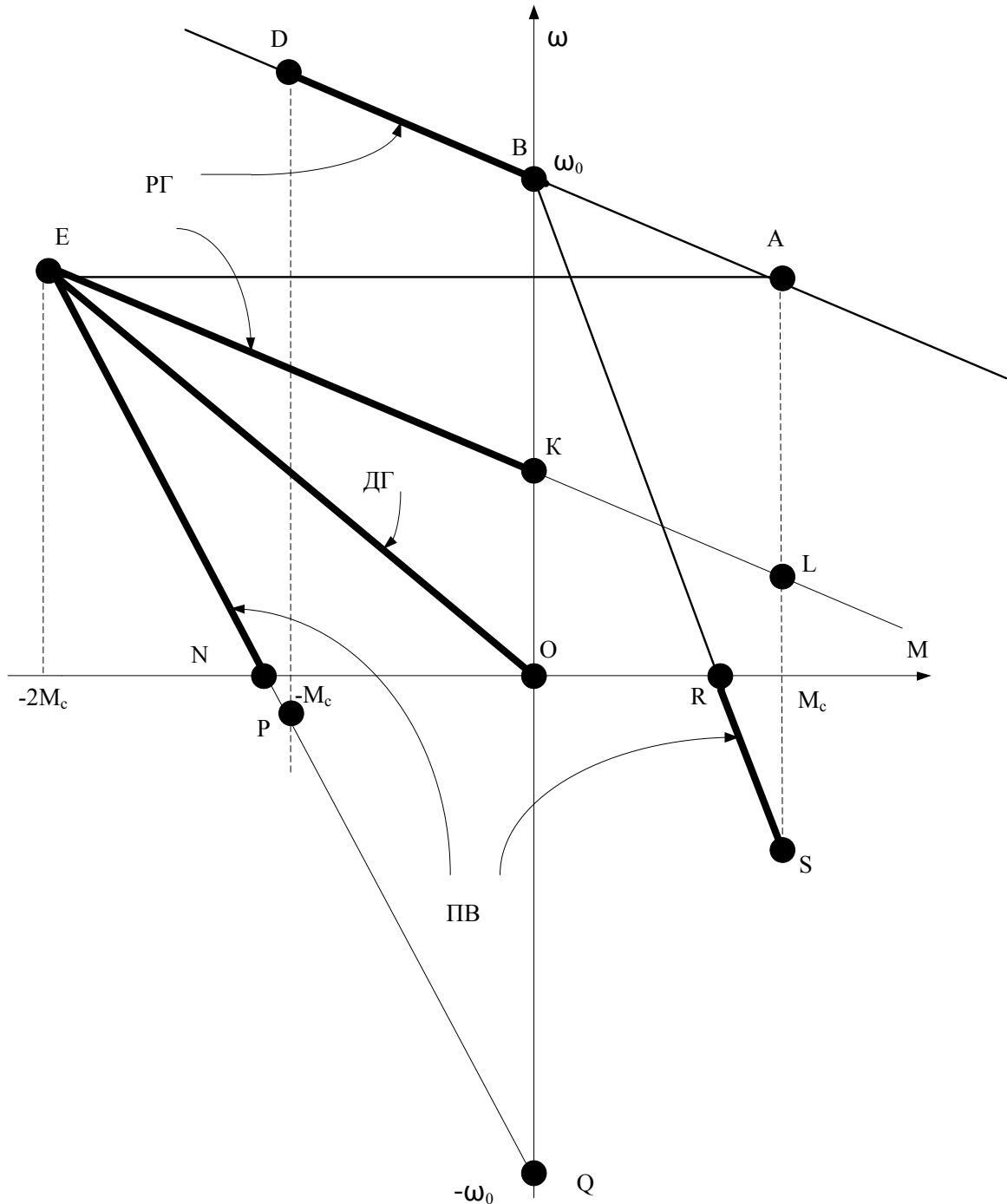


Рисунок Т2.13 Розташування характеристик ДПС НЗ для різних режимів роботи на координатній площині

Якщо ж M_c - реактивний, то гальмування здійснюється до $\omega=0$ і настає зупинка, оскільки для $\omega = 0$ $M_c = 0$. З енергетичної точки зору режим ДГ вигідніший ніж режим ПВ, проте поступається режиму РГ.

Графічно загальна картина роботи ДПС НЗ у всіх режимах роботи буде відповідати рис. Т2.13.

Підсумовуючи розгляд характеристик і режимів роботи ДПС НЗ, можна відзначити таке:

- двигун постійного струму незалежного збудження може працювати в двигунному і у всіх гальмівних режимах;
- характеристиками двигуна у всіх режимах є прямі лінії, причому, якщо $R_\Sigma = \text{const}$ і однаковий для всіх режимів, то характеристика $\omega = f(M_n)$ є неперервною лінією для режимів рекуперативного гальмування, двигунного і проти-вмикання, а характеристика динамічного гальмування паралельна характеристиці для двигунного режиму і проходить через точку “нуль” координатної площини.
- жорсткість характеристик визначається величиною $R_{\text{дод}}$ у якорному колі (за умови, що $U_m = \text{const}$, $\Phi = \text{const}$).

Т2.2.4. Способи регулювання швидкості електроприводів з двигунами постійного струму незалежного збудження

Цілий ряд технологічних установок розрахований на роботу з можливістю регулювання швидкості двигуна системи електропривода.

Регулювання швидкості ЕП - це примусова її зміна (незалежно від навантаження) зміною швидкості двигуна за рахунок зміни параметрів двигуна або передаточного відношення між ЕД і РМ.

Найпоширеніший перший спосіб, оскільки другий - дуже складний конструктивно, малонадійний і не забезпечує плавного регулювання швидкості.

Регулювання швидкості можна виконувати в замкнутих і розімкнутих системах.

У розімкнутих системах це реалізується коли немає необхідності підтримувати сталість швидкості при зміні навантаження або коливаннях параметрів самого приводу.

Основними показниками регулювання є :

- жорсткість механічних характеристик;
- діапазон регулювання;
- плавність регулювання;
- стійкість електропривода;
- характер зміни моменту на валу двигуна;
- допустиме за умовами нагрівання навантаження;
- економічність.

З рівняння механічної характеристики

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR_{\Sigma}}{(k\Phi)^2}$$

впливає, що швидкість ДПС НЗ можна регулювати зміною: опору якірного кола R_{Σ} , прикладеної до якоря напруги U або зміною магнітного потоку машини Φ . Розглянемо кожний із способів окремо.

Регулювання швидкості введенням додаткового опору в коло якоря

Схема включення ДПС НЗ із додатковим опором у колі якоря наведена на рис. Т2.14.

Реостатні характеристики, що отримані в процесі регулювання швидкості веденням додаткового опору, наведені на рис. Т2.15.

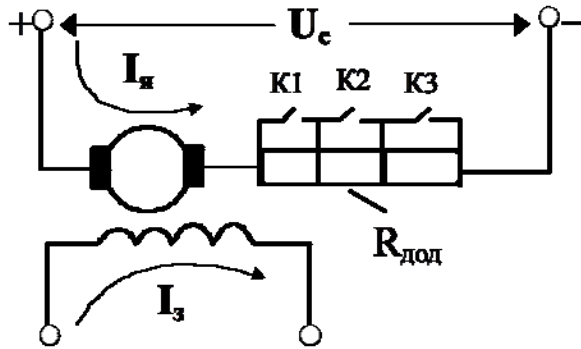


Рисунок Т2.14 - Схема включення ДПС НЗ для регулювання швидкості обертання реостатним способом

Двигун працює в точці А в усталеному режимі з навантаженням M_c . При введенні додаткового опору (наприклад, $R_{\text{дод}2}$) швидкість двигуна через механічну інерційність не може змінитися миттєво, а його момент відповідно з виразом

$$M = \frac{U - E}{R_{\text{я}\Sigma} + R_{\text{дод}3}} k\Phi$$

зменшиться і стане рівним M_1 (при цьому двигун перейде в точку А). Оскільки $M < M_c$, то усталений режим порушується і відповідно до рівняння динаміки привод почне сповільнюватися:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_1 - M_c}{J} < 0.$$

Зниження швидкості призведе до зменшення ЕРС завдяки чому момент двигуна знову починає зростати, і новий усталений режим настане, коли момент двигуна стане рівним моменту навантаження M_c , але вже з меншою швидкістю.

Величина додаткового опору $R_{\text{дод}2}$ котрий необхідно ввести, щоб одержати швидкість ω_1 , може бути розрахована з виразу для швидкісної характеристики :

$$\omega_1 = \frac{U - I(R_{\text{я}\Sigma} + R_{\text{дод}3})}{k\Phi},$$

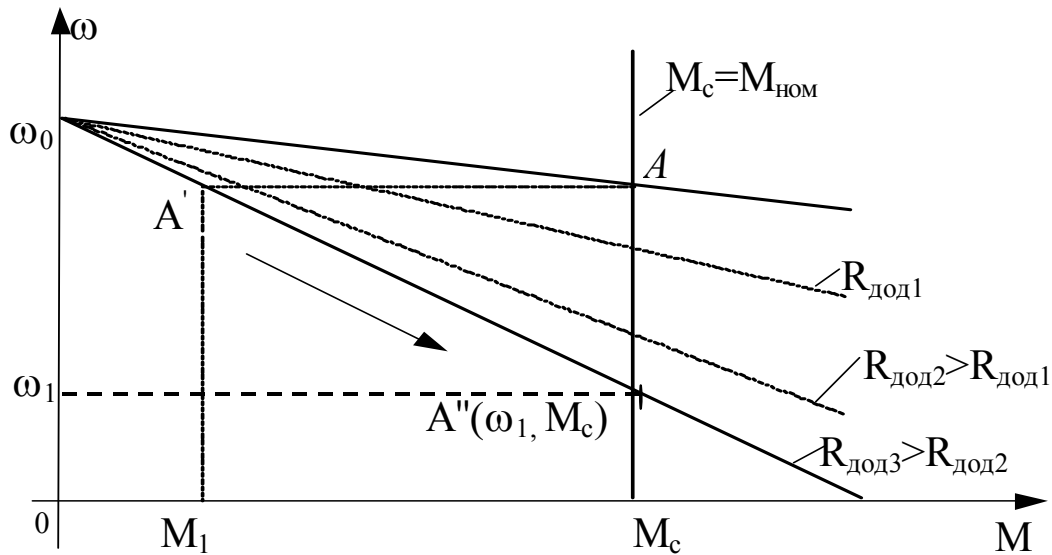


Рисунок Т2.15. Реостатні характеристики ДПС НЗ.

Звідки

$$R_{\text{доd3}} = \frac{U - k\Phi\omega_1}{I} - R_{\text{я}\Sigma}. \quad (2.22)$$

Додатковий опір необхідно вибрати для тривалого режиму роботи зі зниженою швидкістю при повному навантаженні.

Відзначимо переваги і недоліки цього способу регулювання швидкості.

Оскільки швидкість ідеального холостого ходу $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$ не залежить від величини опору силового кола, то регулювання швидкості цим способом доцільно тільки при достатньо великих навантаженнях.

Забезпечити достатню плавність регулювання дуже важко оскільки ускладнюється конструкція системи керування і регулювального реостату при великому числі позицій регулювання.

Жорсткість характеристик, із збільшенням діапазону регулювання, знижується і відповідно до цього можлива поява коливань швидкості на малих швидкостях.

Економічність роботи на регульовальних характеристиках дуже низька, втрати потужності зростають пропорційно відносному зниженню швидкості (це означає, що наприклад, зниження швидкості двигуна на 50 % від значення ω_0 призведе до втрат в опорах якорного кола буде біля 50 % підведеної потужності).

Оскільки в процесі регулювання потік двигуна залишається незмінним ($\Phi = \text{const}$), то гранично допустимий за нагріванням момент $M = k\Phi I_{\text{ном}} = \text{const} = M_{\text{ном}}$.

Це означає, що аналізований спосіб відноситься до способів регулювання швидкості з постійним моментом. Такий спосіб регулювання неефективний і неекономічний. Використовують його винятково для обмеження струмів у процесі запуску двигуна.

Регулювання швидкості зміною напруги на якорі

Даний спосіб регулювання швидкості застосовується в системах ЕП з автономними джерелами живлення або при живленні двигуна від керованого напівпровідникового перетворювача. На рис. Т2.16. наведені регульовальні характеристики ДПС НЗ при зміні напруги на якорі.

Регулювання швидкості обертання двигуна цим способом здійснюється вниз від основної швидкості, оскільки у відповідності з ДЕСТом відхилення напруги вище номінального допустимо в межах 5%, тобто в широких межах зміна напруги можлива тільки в сторону зменшення від номінальної. Враховуючи, що у цьому випадку $\Phi = \text{const}$, то за умовами нагрівання $M = k\Phi I_{\text{ном}} = \text{const} = M_{\text{ном}}$, цей спосіб відноситься до способу регулювання швидкості з постійним моментом.

Швидкість ідеального холостого ходу змінюється пропорційно до прикладеної напруги, жорсткість характеристик залишається сталою

(оскільки величина статичної зміни швидкості $\Delta\omega_c$ залишається незмінною), тобто характеристики паралельні між собою.

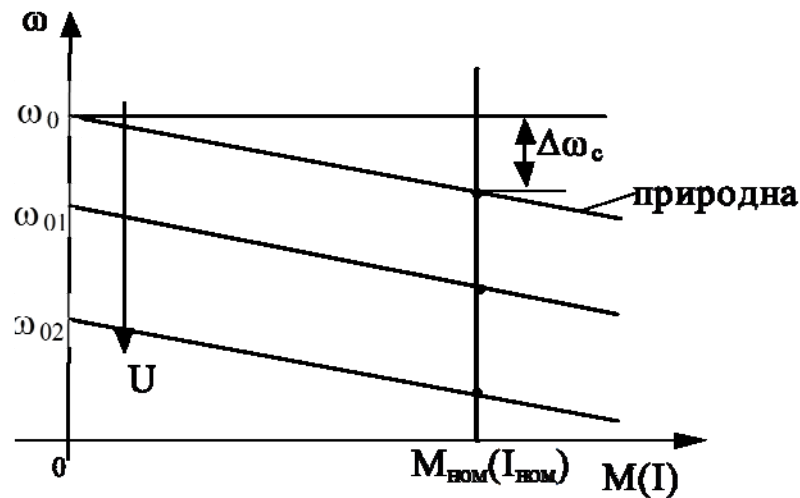


Рисунок Т2.16 - Характеристики ДПС НЗ при зміні напруги на якорі

Діапазон регулювання можна визначити з виразу для $\omega_{\text{ном}}$ і ω_{min} :

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}} - IR_{\text{я}\Sigma}}{k\Phi_{\text{ном}}}; \omega_{\text{min}} = \frac{U_{\text{min}} - IR_{\text{я}\Sigma}}{k\Phi_{\text{ном}}},$$

звідки

$$D = \frac{\omega_{\text{ном}}}{\omega_{\text{min}}} = \frac{U_{\text{ном}} - IR_{\text{я}\Sigma}}{U_{\text{min}} - IR_{\text{я}\Sigma}}, \quad (2.22)$$

З виразу (2.22), випливає що діапазон регулювання обмежується в розімкнутих системах значеннями $D=(8\div 10):1$ через збільшення статизму характеристик при зниженні напруги ($\Delta = \frac{\Delta\omega_{\text{ном}}}{\omega_0}$). В замкнутих системах можна отримати діапазон $D=1000:1$ і вище. Плавність регулювання визначається плавністю зміни напруги живлення.

Через малі втрати потужності в колі якоря цей спосіб регулювання є економічним. В цілому, це найбільш поширений спосіб регулювання швидкості двигунів.

Регулювання швидкості зміною магнітного потоку двигуна

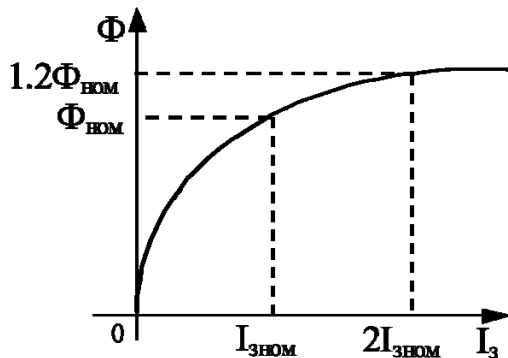


Рисунок Т2.17 - Крива намагнічування ДПС НЗ

Можливість регулювання швидкості двигуна, зміною магнітного потоку вниз від номінальної обмежена явищем насичення магнітного кола машини і перегрівом обмоток збудження, що очевидно з кривої намагнічування машини (рис. Т2.17):

Ослаблення магнітного потоку при регулюванні (регулювання швидкості вгору від номінальної) також має обмеження.

Виходячи з того, що в усталеному режимі струм у колі якоря знаходиться за виразом $I = \frac{M_c}{k\Phi}$, можна зробити висновок, що із зменшенням магнітного потоку машини при роботі з заданим навантаженням струм у якорному колі зростає.

Оскільки при зниженні магнітного потоку швидкість ідеального холостого ходу двигуна $\omega_0 = \frac{U_{\text{НОМ}}}{k\Phi}$ збільшується, а струм короткого замикання залишається незмінним, швидкісні характеристики будуть виходити з однієї точки ($I_{кз}$), а жорсткість їх буде зменшуватись із зменшенням потоку (рис. Т2.18.).

На відміну від струму, момент короткого замикання, визначається як $M_{кз} = k\Phi I_{кз}$, і при зниженні магнітного потоку зменшується, що призводить до значного зниження жорсткості механічних характеристик. Тому зниження магнітного потоку при роботі двигуна з заданим навантаженням на валу може призвести

спочатку до збільшення швидкості (точки ω_1 на рис. Т2.19), а потім до її різкого зниження (точка ω_2).

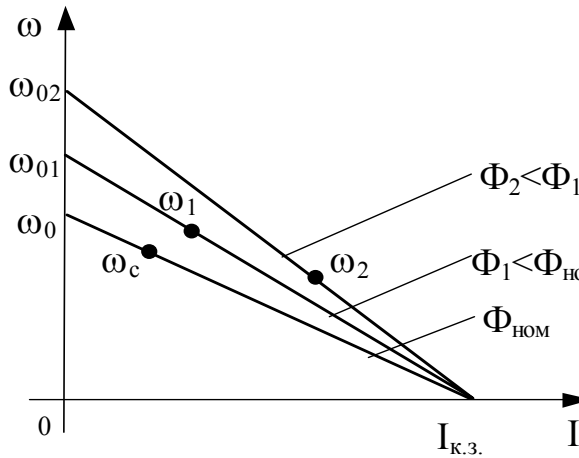


Рисунок Т2.18 - Електромеханічні характеристики ДПС НЗ при зниженні магнітного потоку двигуна.

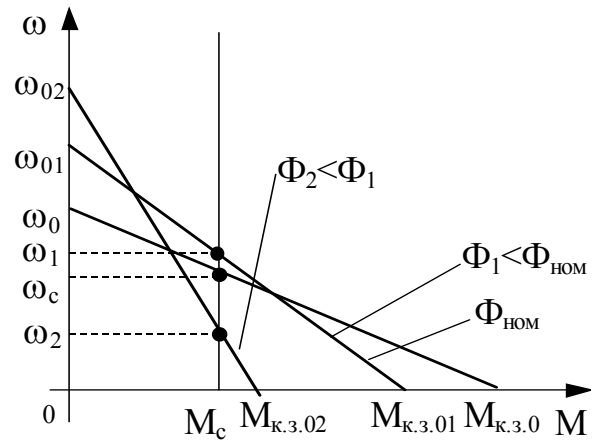


Рисунок Т2.19 - Механічні характеристики ДПС НЗ при зниженні магнітного потоку двигуна.

Явище зменшення швидкості двигуна при зниженні магнітного потоку називається перекиданням двигуна при регулюванні потоком.

З виразу для механічної характеристики двигуна швидкість обертання:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M_c R_\Sigma}{(k\Phi)^2}.$$

Визначимо умови перекидання двигуна при регулюванні потоком. Для цього візьмемо першу похідну швидкості за потоком:

$$\frac{d\omega}{d(k\Phi)} = -\frac{U}{(k\Phi)^2} + \frac{2M_c R_\Sigma}{(k\Phi)^3},$$

і прирівнявши її до нуля, можна одержати значення потоку, що відповідає максимуму швидкості в залежності від потоку:

$$k\Phi = \frac{2M_c R_\Sigma}{U}. \quad (2.24)$$

З аналізу виразу (2.24) видно, що при даному значенні коефіцієнту потоку буде досягнута максимальна швидкість двигуна для заданого навантаження M_c . Іншими словами із збільшенням M_c чи зменшенням U меншою буде ω_{\max} котру можна отримати при ослабленні потоку

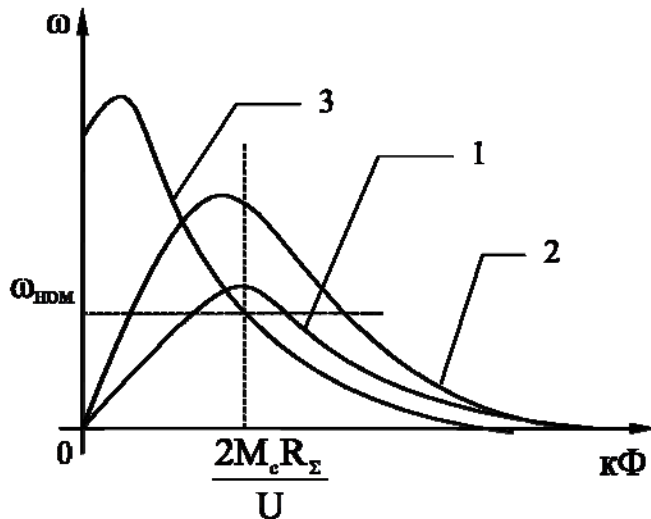


Рисунок Т2.20 - Графіки зміни швидкості ДПС НЗ при зниженні потоку для різних моментів навантаження (1- великий M_c ; 2- малий M_c ; 3- при $M_c \approx 0$).

(рис. Т2.20).

Оскільки магнітна система двигуна в номінальному режимі значною мірою насичена, то практично впливати на потік можна тільки в напрямку його зменшення. Здійснюється це шляхом введення $R_{\text{дод.}}$ у коло збудження двигуна.

Основні показники регулювання зміною потоку:

- для машин

нормального виконання діапазон регулювання

$$D = (1,5 \div 2):1, \text{ де } \omega_{\text{ном}} = 1;$$

- оскільки струми в обмотці збудження малі, то не складно здійснити плавне регулювання (при використанні тиристорних збуджувачів);

- спосіб є економічним, оскільки втрати, відносно номінальних значень, змінюються несуттєво;

- жорсткість характеристик знижується пропорційно величині потоку;
- оскільки момент двигуна $M = k\Phi I_{\text{ном}}$, то це означає, що із збільшенням швидкості момент зменшується і даний спосіб можна віднести до способу регулювання з постійною потужністю;
- діапазон зміни швидкості при зміні магнітного потоку є обмеженим; практично швидкість можна змінити до +20% від $\omega_{\text{ном}}$;
- із точки зору витрат на устаткування цей спосіб найбільш ефективний через малу потужність джерела живлення обмотки збудження.

На практиці цей спосіб використовують як допоміжний і застосовують для регулювання швидкості вверх від номінальної $\omega_{\text{ном}}$ разом із регулюванням напруги на якорі.

T2.3. Властивості і характеристики електроприводів з двигунами постійного струму послідовного збудження

T2.3.1. Двигунний режим роботи

Двигуни постійного струму послідовного збудження складають другу за кількістю групу ДПС, та мають достатньо цікаві та унікальні властивості.

Нормальна схема включення двигуна постійного струму послідовного збудження (ДПС ПЗ) наведена на рис. T2.21, а.

Характерною особливістю ДПС ПЗ є те, що ОЗ включена послідовно в коло якоря і тому струм якоря одночасно є і струмом збудження, отже, магнітний потік машини є змінною величиною, що залежить від струму навантаження (для порівняння: у ДПС НЗ потік не залежить від навантаження).

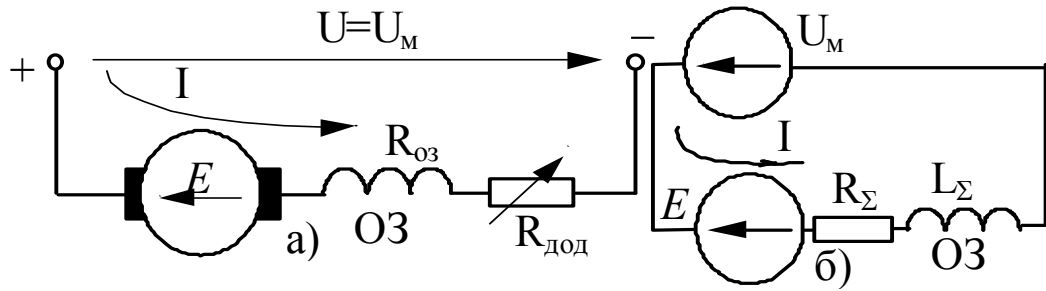


Рисунок Т2.21 - Схема включення двигуна постійного струму послідовного збудження: а) реальна; б) схема заміщення

Залежність потоку ДПС ПЗ від струму збудження називається характеристикою намагнічування:

$$\Phi = f(I). \quad (2.25)$$

Характеристика намагнічування (рис. Т2.22) не має аналітичного виразу для її опису, і її вид залежить від матеріалу, з якого виготовлений ярів і його конструкції:

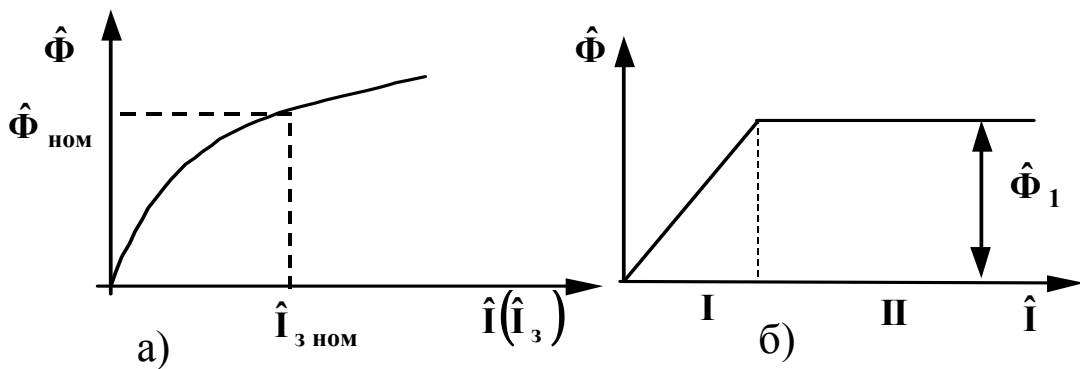


Рисунок Т2.22 - Характеристика намагнічування ДПС ПЗ:
а) реальна, б) апроксимована

Крива намагнічування зазвичай наводиться в довідкових даних чи в паспорті на ДПС ПЗ.

Схема заміщення для двигуна постійного струму послідовного збудження (рис. Т2.21. б) може бути представлена в тому ж виді, що

і для якірного кола ДПС НЗ, із тією лише різницею, що в загальний опір силового кола додається ще й опір обмотки збудження тобто:

$$R_{\Sigma} = R_{я\Sigma} + R_{оз} + R_{дод}; \quad L_{\Sigma} = R_{я\Sigma} + L_{оз}.$$

Для ДПС ПЗ справедливі рівняння для ЕРС і моменту двигуна, але вже за умови, що:

$$\Phi = f(I) = f(I_3), \quad E = k\Phi(I) \cdot \omega, \quad M_{дв} = k\Phi(I) \cdot I.$$

Складемо рівняння електричної рівноваги для схеми заміщення ДПС ПЗ в усталеному режимі:

$$U_m = IR_{\Sigma} + k\Phi(I) \cdot \omega. \quad (2.26)$$

Як очевидно, з цього рівняння не можна одержати аналітичні вирази для характеристик ДПС ПЗ, оскільки потік і струм (як очевидно з кривої намагнічування на рис. Т2.22 пов'язані між собою нелінійною залежністю, яку, як правило, важко, а то і взагалі неможливо представити аналітичним виразом. Рівняння електромеханічних і механічних характеристик ДПС ПЗ не відрізняються від відповідних виразів для ДПС НЗ:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi(I)} - \frac{IR_{\Sigma}}{k\Phi(I)}; \quad (2.27)$$

$$\omega = \frac{U}{k\Phi(I)} - \frac{M \cdot R_{\Sigma}}{[k\Phi(I)]^2}, \quad (2.28)$$

де $k\Phi(I)$ – залежний від навантаження, змінний потік машини.

У першому наближенні криву намагнічування можна апроксимувати ламаною, що складається з двох прямолінійних ділянок, як показано на рис. Т2.22 б.

Перша ділянка (I) відповідає області ненасиченої магнітної системи, а друга (II) – насиченої. Для I-ї ділянки можна вважати $k\Phi = \alpha I$, а для II-ї ділянки $\Phi = \text{const} = \Phi_1$. Тоді рівняння

електромеханічної характеристики для I-ї ділянки можна представити таким чином:

$$\omega = \frac{U}{\alpha I} - \frac{IR_{\Sigma}}{\alpha I} = \frac{U}{\alpha I} - \frac{R_{\Sigma}}{\alpha}, \text{ або } \omega = \frac{A}{I} - B, \quad (2.29)$$

де $A = \frac{U}{\alpha}$; $B = \frac{R_{\Sigma}}{\alpha}$.

Момент двигуна на I-й ділянці пропорційний квадрату струму якоря:

$$M = k\Phi(I) \cdot I = \alpha I \cdot I = \alpha I^2, \quad (2.30)$$

Звідки

$$I = \frac{\sqrt{M}}{\sqrt{\alpha}} \quad (2.31)$$

Підставляючи (2.31) у (2.29), одержимо вираз для механічної характеристики ДПС ПЗ :

$$\omega = \frac{U\sqrt{\alpha}}{\alpha \cdot \sqrt{M}} - \frac{\sqrt{M} \cdot R_{\Sigma} \cdot \sqrt{\alpha}}{\sqrt{\alpha} \cdot \alpha \cdot \sqrt{M}} = \frac{D}{\sqrt{M}} - B, \quad (2.32)$$

де $D = \frac{U\sqrt{\alpha}}{\alpha}$; $B = \frac{R_{\Sigma}}{\alpha}$.

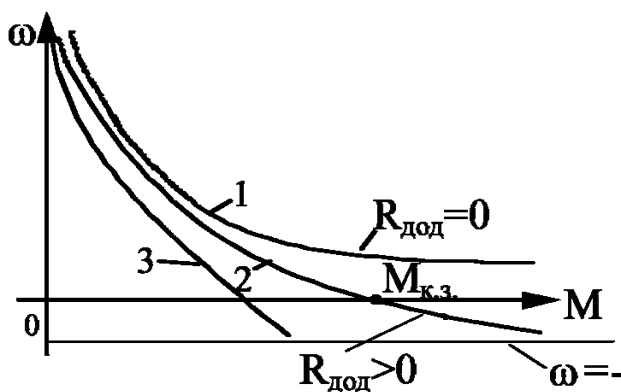


Рисунок Т2.23 - Механічні характеристики ДПС ПЗ

Таким чином, механічна характеристика ДПС ПЗ має вигляд гіперболи. Однією з асимптот її є вісь ординат, а іншою - пряма, паралельна осі абсцис, рівняння якої $\omega = -B$.

Жорсткість механічної характеристики змінюється і зростає із збільшенням

навантаження. Вид механічної і електромеханічної характеристик, описується залежностями (2.27) і (2.28), представлений на рис. Т2.23 і справедливий тільки для області ненасиченої магнітної системи двигуна. Як правило, сучасні двигуни мають насичені магнітні системи навіть у номінальному режимі, тому пропорційність між струмом якоря і потоком збудження порушується і в результаті цього характеристики з гіперболічних стають близькими до прямолінійних. Гіперболічна залежність зберігається лише на ділянках малих навантажень.

Хоча квадратична залежність між моментом і струмом двигуна в області насиченої магнітної системи не зберігається, проте ступінь цієї залежності залишається не нижчою 1,2-1.4 (тобто $M = \alpha I^{(1,2+1,4)}$), що є дуже цінною властивістю цих двигунів при пусках і перевантаженнях.

За однакового пускового струму ДПС ПЗ розвиває більший пусковий момент, ніж ДПС НЗ: якщо $I_{\text{пуск}} = (2.0...2.5)I_{\text{ном}}$, то $M_{\text{пуск}} = (2.4...2.8) M_{\text{ном}}$.

Це зумовлено тим, що для пускового струму магнітний потік стає більшим номінального і, отже, $M = k\Phi(I_{\text{пуск}}) \cdot I_{\text{пуск}}$ завжди більший ніж $k\Phi(I_{\text{ном}}) \cdot I_{\text{пуск}}$. Момент ДПС ПЗ не залежить від коливань напруги в мережі, оскільки магнітний потік залежить тільки від струму якоря.

Основні області застосування двигунів постійного струму послідовного збудження: тягові електроприводи, електроприводи механізмів переміщення, підйому та ін.

Як впливає з рівнянь (2.27) і (2.28), при малих навантаженнях двигун розвиває велику швидкість, оскільки із зменшенням струму якоря зменшується магнітний потік. Так, у режимі ідеального холостого ходу, коли $M = 0$; $I = 0$, швидкість двигуна теоретично

дорівнює нескінченності. Через наявність механічних втрат у двигуні і залишкове намагнічування полюсів, в дійсності, швидкість ідеального холостого ходу двигуна обмежена і досягає $(5...6)\omega_{ном}$, $(\omega = \frac{U}{k\Phi_{зал}})$.

Проте, навіть за такої швидкості двигун може вийти з ладу, оскільки він не розрахований на роботу з такими відцентровими навантаженнями. Тому для робочих машин та механізмів, що можуть працювати в режимі холостого ходу або дуже малого навантаження, застосовувати ДПС ПЗ в якості приводних двигунів недоцільно.

Окрім того, ДПС ПЗ недоцільно застосовувати в установках, з ремінними передачами, де можливе проковзування, або в передачах де кінематичний зв'язок може легко порушитися (наприклад, ланцюгові або фрикційні передачі).

Точка короткого замикання ($I_{кз}$ або $M_{кз}$) і область протivismкання для природної характеристики (крива 1 на рис. Т2.24), знаходиться далеко за межами номінального навантаження. Нескладно бачити, що при збільшенні R_{Σ} жорсткість характеристик буде змінюватися (зменшуватися) і точки короткого замикання набувають конкретних, допустимих за перевантажувальною здатністю значень.

Аналітичні вирази характеристик ДПС ПЗ справедливі тільки для двигунів із ненасиченою магнітною системою. Для більш точного розрахунку характеристик, на практиці зазвичай необхідно мати залежності

$$\hat{\omega}_n = f_1(\hat{I}); \quad (2.33)$$

$$\hat{M}_n = f_2(\hat{I}), \quad (2.34)$$

що задаються в каталогах у вигляді графіків. За допомогою цих характеристик неважко побудувати природну механічну характеристику $\omega_n = f(M)$. Для двигунів різної потужності і швидкості, що

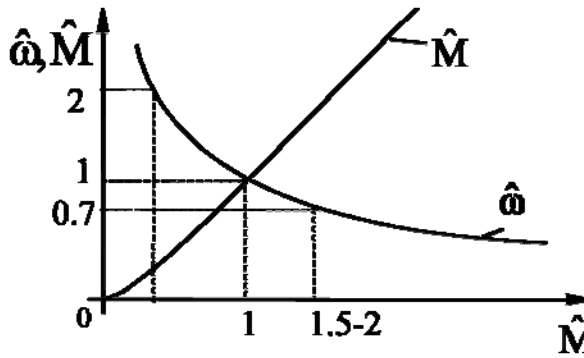


Рисунок Т2.24 - Універсальні характеристики для тягових ДПС ПЗ серії ДК

відносяться до однієї серії, характеристики $\hat{\omega}_n = f_1(\hat{I})$ у відносних одиницях практично збігаються. Також збігаються і залежності $\hat{M}_n = f_2(\hat{I})$. Тому характеристики всіх двигунів даної серії можуть бути представлені двома кривими у відносних одиницях, що

називаються універсальними.

Універсальні характеристики справедливі для ДПС ПЗ малої і середньої потужності. Для двигунів великої потужності, заводом-виробником у документації як правило, наводиться залежність $k\Phi = f(I)$.

Наближений вид цих характеристик (наприклад, для тягових двигунів серії ДК), що застосовуються в електровозах, наведений на рис. Т2.24.

Для характеристик, що наводяться в каталогах, а також для універсальних характеристик, як правило, вказаний обертовий момент на валу, а не електромагнітний момент двигуна. Користуючись цими характеристиками, за наявності паспортних даних на машину дуже просто зробити розрахунок природної характеристики.

Розрахунок природної механічної характеристики

Для розрахунку характеристики використовуються паспортні дані двигуна - параметри $\omega_{ном}$, $M_{ном}$, $I_{ном}$. Розрахунок виконується графічним методом.

Задаючись величиною \hat{I} за виразом $I = \hat{I} \cdot I_{\text{ном}}$ визначають відповідні значення струму в абсолютних одиницях. Для кожного заданого значення струму \hat{I} за універсальною кривою $\hat{\omega}_{\text{п}} = f_1(\hat{I})$ визначають відповідні значення $\hat{\omega}_{\text{п}}$ і за формулою $\omega_{\text{п}} = \hat{\omega}_{\text{п}} \cdot \omega_{\text{ном}}$ знаходять значення цього параметру в абсолютних одиницях. У такий спосіб одержують дані для електромеханічної характеристики ДПС ПЗ $\omega_{\text{п}} = f(I)$ (графік має точно такий вигляд, як і універсальної крива, але тільки в іншому масштабі).

Для побудови механічної характеристики необхідно за універсальною кривою $\hat{M}_{\text{п}} = f(\hat{I})$ для заданих значень \hat{I} визначити відповідні значення $\hat{M}_{\text{п}}$ і виконати перерахунок за формулою $M_{\text{п}} = \hat{M}_{\text{п}} \cdot M_{\text{ном}}$, а потім побудувати графік $\omega_{\text{п}} = f(M)$.

Іншим способом розрахунку як природних так і штучних електромеханічних і механічних характеристик ДПС НЗ є використання аналітичних залежностей (2.27) і (2.28), і попередньо розрахованої кривої намагнічування $k\Phi(I)$.

Для цього задаючись різноманітними значеннями \hat{I}_i , за універсальними кривими $\hat{\omega}_{\text{п}} = f(\hat{I})$ визначають відповідні значення $\hat{\omega}_i$, і використовуючи формули $\omega_{\text{п}} = \hat{\omega}_{\text{п}} \cdot \omega_{\text{ном}}$, $I = \hat{I} \cdot I_{\text{ном}}$, виконують перерахунок параметрів I_i й $\omega_{\text{п}}$ в абсолютних одиницях.

За формулою

$$\omega_{\text{п}} = \frac{U_{\text{ном}} - IR_{\text{я}\Sigma}}{k\Phi(I)}; k\Phi(I) = \frac{U_{\text{ном}} - IR_{\text{я}\Sigma}}{\omega_{\text{п}}},$$

визначають значення $k\Phi(I)$ для різних значень I і будують криву $k\Phi(I)$.

Використовуючи формули (2.27) і (2.28), розраховують природну або штучну характеристики для різних значень I (причому, параметр $k\Phi(I)$ береться з розрахункової кривої намагнічування).

T2.3.2. Гальмівні режими роботи двигунів постійного струму послідовного збудження

Двигуни постійного струму послідовного збудження можуть працювати як у двигунному, так і в гальмівних режимах. Проте, можливості створення гальмівних режимів ДПС ПЗ більш обмежені, ніж у ДПС НЗ. Так, наприклад, режим рекуперативного гальмування для нормальної схеми включення ДПС ПЗ (тобто за відсутності шунтуючих контурів) практично не може бути реалізований за двома причинами:

- при зменшенні моменту і переході в режим холостого ходу швидкість двигуна може досягти неприпустимих за умовами міцності механічних частин значень.

- при зміні напрямку струму якоря одночасно змінюється і напрямок магнітного потоку, тому, для збереження знаку МРС при переході в генераторний режим необхідне переключення кінців обмотки збудження, що пов'язано з ускладненням схеми включення двигуна.

Застосування комбінованих схем шунтування може створити умови переходу в генераторний режим, але він також не буде режимом рекуперативного гальмування.

Що ж стосується двох інших гальмівних режимів - проти-вмикання і динамічного гальмування - то вони цілком прийнятні та реалізуються для ДПС ПЗ як і для інших типів електричних машин.

Гальмування противмиканням

Цей режим для ДПС ПЗ є основним гальмівним режимом і широко застосовується, як у механізмах з активним статичним моментом (механізми підйому), так і в механізмах із реактивним статичним моментом (механізми переміщенням і ін.).

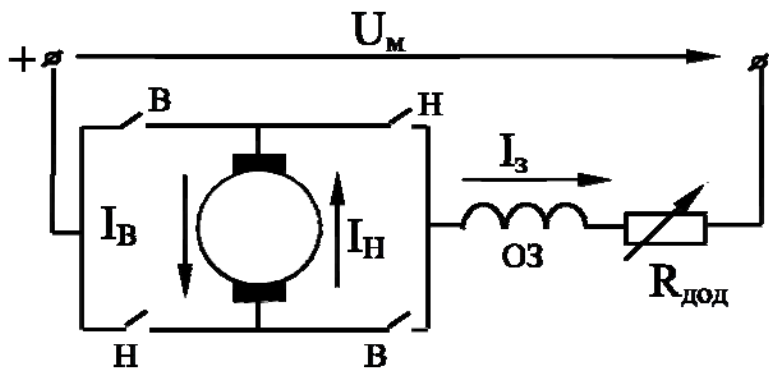


Рисунок Т2.25 - Схема включення ДПС ПЗ для режиму проти-вмикання

Можливі два способи реалізації режиму проти-вмикання:

- шляхом зміни полярності напруги на затискачах якоря;

- за наявності активного навантаження, коли $M_c > M_{к.з}$

двигуна, завдяки чому, під дією більшого статичного моменту M_c двигун починає обертатися в зворотному напрямку (електромагнітне гальмо).

Для реалізації гальмування за першим способом необхідно мати можливість змінити напрямок струму тільки в обмотці якоря, залишивши без зміни напрямок струму в ОЗ, як показано на рис. Т2.25.

При гальмуванні ДПС ПЗ противмиканням для обмеження струму необхідно ввести додатковий опір, величина якого може бути визначена наступним способом. Задавшись значенням початкового гальмівного струму (струму переходу) $I_{макс}=2\div 2,5(I_{ном})$, із рівняння електричної рівноваги для режиму проти-вмикання визначають $R_{дод}$:

$$-U = -I \cdot (R_{\Sigma} + R_{\text{оз}} + R_{\text{дод}}) + E;$$

$$R_{\text{дод}} = \frac{U + k\Phi(I_{\text{макс}}) \cdot \omega_c}{I_{\text{макс}}} - (R_{\Sigma} + R_{\text{оз}}), \quad (2.35)$$

де ω_c - швидкість у попередньому двигунному режимі.

Вид швидкісної (або механічної) характеристики двигуна в режимі проти-вмикання наведений на рис. Т2.26.

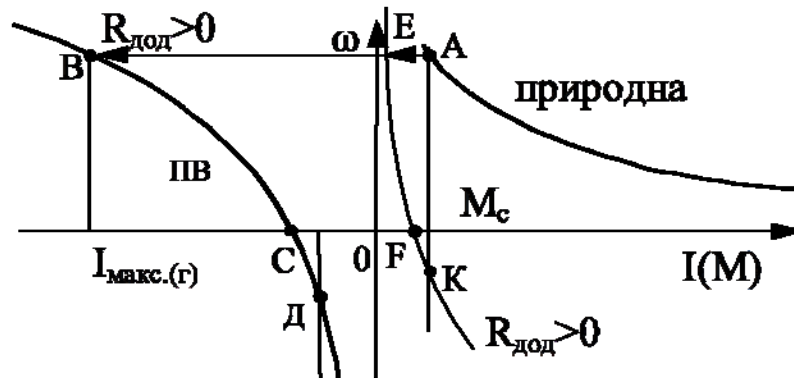


Рисунок Т2.26 - Характеристика ДПС ПЗ у режимі проти-вмикання (для реактивного моменту на валу)

Режиму проти-вмикання відповідає ділянка В-С штучної характеристики. При досягненні швидкості обертання $\omega = 0$ щоб уникнути аварійного режиму двигун відключають від мережі.

У випадку реактивного моменту на валу в процесі гальмування противмиканням (якщо двигун не відключити від мережі при $\omega = 0$) відбудеться реверс швидкості і двигун почне обертатися в зворотному напрямку, поки не досягне швидкості, що відповідає точці Д (рис. 2.26):

Другий спосіб гальмування противмиканням, як і для ДПС НЗ, застосовується для спуску вантажів із зниженою швидкістю. Двигун включається в режим піднімання вантажу, але в коло якоря вводиться

таке значення $R_{\text{дод}}$, щоб забезпечити примусове обертання в зворотному напрямку (I і IV квадрант).

При цьому двигун переходить на штучну характеристику, уповільнює обертання (підйом з уповільненням) і зупиняється в точці F, після чого змінює напрямок обертання (реверсується) за швидкістю і переходить у режим проти-вмикання (ділянка F-K). У точці K $M = M_c$, що відповідає усталеному режиму (спуск в режимі проти-вмикання з $\omega = \text{const}$). Зміна знаку швидкості відповідає зміні знаку ЕРС, тобто остання вже направлена як і вектор напруги мережі (умова режиму ПВ). Рівняння електричної рівноваги буде мати вид:

$$U = I(R_{\Sigma} + R_{\text{оз}} + R_{\text{дод}}) - E \quad (2.36)$$

Вираз для струму, у відповідності до (2.36):

$$I = \frac{U + E}{R_{\Sigma} + R_{\text{оз}} + R_{\text{дод}}} \quad (2.37)$$

показує, що струм якоря залишається додатнім. Але оскільки швидкість двигуна $\omega < 0$ то електромагнітна потужність двигуна:

$$P = k\Phi(I)I\omega < 0.$$

Таким чином, і в даному випадку двигун споживає потужність як від мережі, так і з боку валу цілком витрачаючи її на втрати в системі приводу.

Електродинамічне гальмування

Динамічне гальмування ДПС ПЗ може бути здійснено двома способами:

- з самозбудженням двигуна;
- з незалежним збудженням двигуна.

Спосіб динамічного гальмування із самозбудженням широко застосовується на практиці, оскільки він не потребує живлення обмоток двигуна від мережі, що є обов'язковою умовою для схем аварійного гальмування.

Суть цього способу гальмування полягає в тому, що двигун відключають від мережі і замикають на гальмівний опір $R_{дг}$, залишаючи в якірному колі обмотку збудження. При цьому двигун працює в режимі генератора із самозбудженням, як показано на відповідній схемі включення (рис. Т2.27).

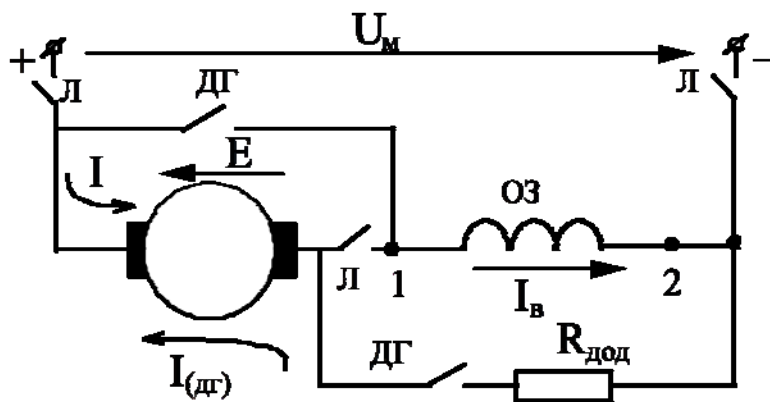


Рисунок Т2.27 - Схема включення ДПС ПЗ в режимі динамічного гальмування із самозбудженням

При роботі в двигунному режимі контакт ДГ розімкнутий, а контакти Л замкнуті. Струм в цьому випадку направлений проти ЕРС.

Для переведення двигуна в режим динамічного гальмування із самозбудженням контакти Л розмикають (двигун відключається від мережі), а контакти ДГ замикають.

При обертанні двигуна за рахунок запасеної кінетичної енергії механізму, або під дією активного моменту навантаження, потік залишкового намагнічування ($\Phi_{зал} \neq 0$) буде індукувати ЕРС залишкового намагнічування ($E_{зал} = k\Phi_{зал} \cdot \omega_c$), і в колі якоря буде протікати струм I вже в зворотному напрямку. Щоб уникнути

розмагнічування машини необхідно, щоб напрямок струму через ОЗ не змінився (це і дозволяє реалізувати запропонована схема включення). Завдяки виконанню цієї умови, струм, що створюється ЕРС залишкового потоку, підсилить магнітний потік та у свою чергу, викличе збільшення ЕРС і т. д. Таким чином, ДПС буде працювати в режимі самозбудження.

Рівняння електричної рівноваги в режимі динамічного гальмування із самозбудженням буде мати вигляд:

$$IR_{\Sigma} = -E, \quad (2.38)$$

де $R_{\Sigma} = R_{я\Sigma} + R_{оз} + R_{дод}$, $R_{дод}$ - додатковий (гальмівний) опір, який введений в контур гальмування для обмеження струму в момент переходу в режим динамічного гальмування;

$$E = k\Phi(I_3)\omega_c,$$

де ω_c – швидкість двигуна в момент переходу в режим динамічного гальмування.

З виразу (2.38) нескладно визначити величину $R_{дод}$, що забезпечує заданий максимальний гальмівний струм.

Наприклад, виходячи з того, що гальмування буде більш інтенсивним, коли двигун розвиває більший гальмівний момент (тобто коли більший гальмівний струм у колі якоря) але з іншого боку, за умовою перевантажувальної здатності цей струм не повинний перевищувати для ДПС $(2 \div 2,5)I_{ном}$, то задаються значенням максимального струму $I_{max} = 2I_{ном}$, визначають $k\Phi(I_{max})$ за кривою намагнічування, і знаючи швидкість ω_c , при якій відбувається перехід двигуна в режим динамічного гальмування, знаходять додатковий опір контуру динамічного гальмування:

$$R_{дод} = \frac{k\Phi(I_{max}) \cdot \omega_c}{I_{max}} - (R_{я\Sigma} + R_{оз}). \quad (2.39)$$

Вигляд характеристик ДПС ПЗ у режимі динамічного гальмування із самозбудженням наведений на рис. Т2.28.

Необхідно відзначити, що для забезпечення самозбудження ДПС ПЗ недостатньо виконання умови незмінності напрямку I_3 через ОЗ як у двигунному, так і в гальмівному режимах. Щоб встановити весь перелік умов, що забезпечують можливість самозбудження, розглянемо фізичну сутність цього процесу.

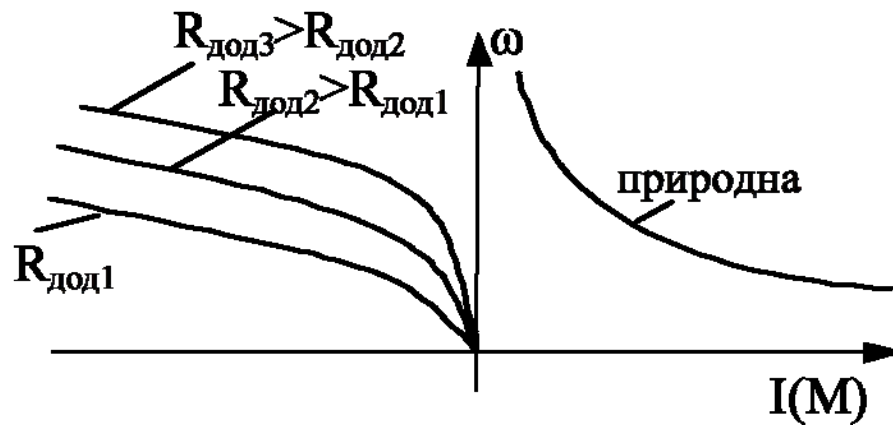


Рисунок Т2.28 - Характеристики ДПС ПЗ у режимі динамічного гальмування із самозбудженням

Якщо ДПС ПЗ працював у двигунному режимі з деякою швидкістю ω_c і струм у якірному колі при цьому був I_c , то ЕРС машини дорівнює

$$E = k\Phi(I_c) \cdot \omega_c.$$

При відключенні двигуна від мережі і замиканні на $R_{\text{дод}}$, у відповідності з наведеною вище схемою, знак ЕРС не змінюється, а її початкове значення визначається залишковим потоком і швидкістю ω_c :

$$E_{\text{зал}} = k\Phi(I_{\text{зал}}) \omega_c, \quad (2.40)$$

де $I_{\text{зал}}$ - струм, що створюється залишковою ЕРС (це достатньо мала величина).

Залишковий струм, протікаючи обмоткою, викликає виникнення потоку Φ_1 , величина якого залежить від $I_{\text{зал}}$, що, в свою чергу, дорівнює:

$$I_{\text{зал}} = \frac{E_{\text{зал}}}{R_{\text{я}\Sigma} + R_{\text{оз}} + R_{\text{дод}}}. \quad (2.41)$$

Якщо при цьому наведений потік Φ_1 виявиться більшим $\Phi_{\text{зал}}$, то відбудеться підсилення магнітного потоку. ЕРС двигуна з підсиленням потоку зростає, а значить і струм $I = I_3$ стане більшим, оскільки $I = \frac{E}{R_{\Sigma}}$, а це призведе до ще більшого зростання E , I , Φ и т. д. Поки Φ_1 залишається малим, то і струм I зростає повільно (частина характеристики динамічного гальмування з великою крутизною); при достатньому збільшенні потоку машини її струм починає зростати швидше. Це відповідає пологій частини характеристики.

Таким чином, процесу самозбудження відповідає полого ділянка характеристики динамічного гальмування. Якщо ж, при переведенні в режим ДГ опір $R_{\text{дод}}$ буде занадто великим і $I_{\text{зал}}$ через це буде наводити $\Phi_1 < \Phi_{\text{зал}}$, то самозбудження не відбудеться.

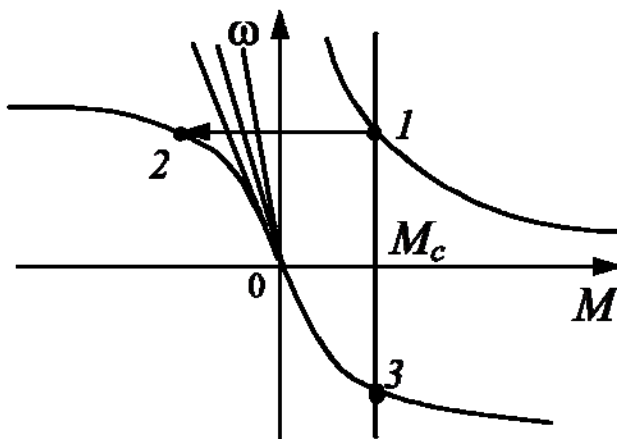


Рисунок Т2.29 - Характеристика динамічного гальмування при опусканні вантажу

Необхідні умови самозбудження можуть бути сформульовані таким чином:

- забезпечити протікання струму в ОЗ у тому ж напрямку, що й у двигунному режимі (реалізується за допомогою спеціальної схеми переключення);

- для заданої швидкості і величини залишкового потоку $\Phi_{\text{зал}}$ забезпечити струм, достатній для створення магнітного потоку $\Phi_1 > \Phi_{\text{зал}}$.

Гальмування буде більш інтенсивнішим, якщо значення $R_{\text{дод}}$ мале, тобто перехід у режим ДГ на заданій швидкості при менших $R_{\text{дод}}$ забезпечує більший за величиною струм $I_{\text{дг}}$, але при цьому варто враховувати, що задані $R_{\text{дод}}$ і $\omega_{\text{поч}}$ повинні забезпечити виконання другої умови самозбудження.

Недоліком цього способу гальмування є те, що процес протікає недостатньо плавно. Дійсно, при опусканні вантажу в перший момент переходу в режим ДГ швидкість двигуна і його гальмівний момент дуже малі (частина характеристики з великою крутизною). Вантаж практично вільно опускається під дією сили тяжіння; при опусканні швидкість швидко зростає, відбувається процес самозбудження і гальмівний момент різко збільшується. Двигун починає загальмовуватись (рис. Т2.29, ділянка 0 -2).

Тому режим ДГ із самозбудженням використовується переважно як аварійний. Втрати в цьому режимі пропорційні квадрату струму навантаження. Динамічне гальмування з незалежним збудженням дозволяє одержати більш плавний процес гальмування. У цьому випадку обмотка збудження підключається через додатковий опір до окремого джерела живлення, а якір двигуна замикається на гальмівний опір (рис. Т2.30).

Додатковий опір у колі збудження $R_{\text{д.оз}}$ може бути визначене як

$$R_{\text{д.оз}} = \frac{U}{I_{\text{н.з}}} R_{\text{оз}}. \quad (2.42)$$

Оскільки двигун працює з незалежним збудженням, то характеристики в режимі ДГ у цьому випадку подібні відповідним характеристикам ДПС НЗ і є лінійними (рис. Т2.31).

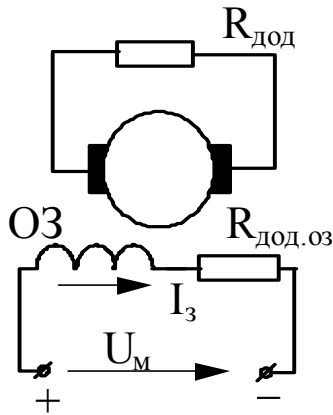


Рисунок Т2.30 - Схема включення ДПС ПЗ в режимі динамічного гальмування з незалежним збудженням

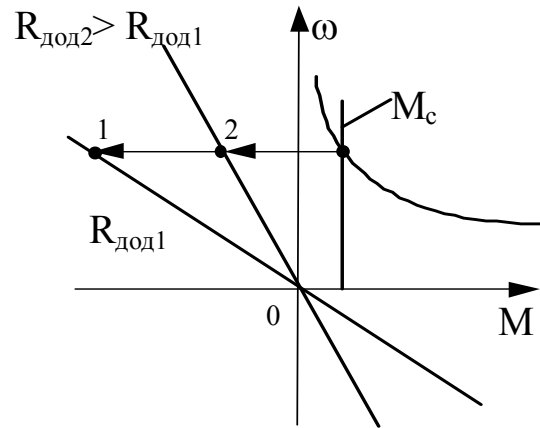


Рисунок Т2.31 - Характеристики ДПС ПЗ в режимі динамічного гальмування з незалежним збудженням

Із зростанням $R_{\text{доd}}$ у якірному колі зменшується величина гальмівного моменту, а отже, і інтенсивність гальмування. Для одержання достатнього гальмівного моменту двигун повинен мати магнітний потік, що приблизно дорівнює $\Phi_{\text{ном}}$, тобто в ОЗ повинен протікати струм збудження, що приблизно дорівнює номінальному. Отже, при ДГ із незалежним збудженням із мережі буде споживатися потужність, що майже дорівнює номінальній, тобто значно знижуються енергетичні показники електропривода:

$$\Delta P_{\text{ел}} = I_{\text{ном}}^2 (R_{\text{оз}} + R_{\text{доd}}). \quad (2.43)$$

І в тому, і в іншому випадку, режим динамічного гальмування, з точки зору енергетики електроприводу, характеризується великими втратами.

Т2.3.3. Способи регулювання швидкості електроприводів з двигунами постійного струму послідовного збудження

Зміна швидкості ДПС ПЗ можлива тоді, коли хоча б один із його параметрів відрізняється від номінального. Як і в ДПС НЗ регулювання може бути реалізоване одним із способів:

- введенням у коло якоря додаткового опору;
- зміною напруги прикладеної до якірного кола двигуна;
- зміною магнітного потоку двигуна.

Розрахунок штучних характеристик ДПС ПЗ незалежно від способу їх одержання виконується за рівняннями для ЕРС і моменту двигуна:

$$\omega_{ш} = E_{ш} / k\Phi(I_3);$$

$$E_{ш} = k\Phi(I_3)\omega_{ш};$$

$$M_{ш} = k\Phi(I_3) \cdot I_{я};$$

де $k\Phi(I_3)$ розраховується за універсальною кривою $\omega(I_я)$.

Регулювання швидкості введенням додаткового опору в коло якоря

Рівняння швидкісної і механічної характеристики двигуна при введенні додаткового опору в якірне коло має той же вид, що і для природної характеристики:

$$\omega = \frac{U_{ном}}{k\Phi(I)} - \frac{I \cdot (R_{я\Sigma} + R_{дод} + R_{оз})}{k\Phi(I)}, \quad (2.44)$$

де $R_{дод}$ - заданий додатковий опір.

Порядок розрахунку характеристик

За універсальною кривою $\hat{\omega}_n = f(\hat{I})$ визначають значення $\hat{\omega}_{ni}$ для ряду значень \hat{I}_i .

Розраховують криву намагнічування $k\Phi(I_3)$ за формулою

$$k\Phi(I) = \frac{U_{ном} - I \cdot (R_{я\Sigma} + R_{оз})}{\omega_n}$$

Відповідно до залежності (2.44) для заданого $R_{дод}$ розраховують швидкісні і механічні характеристики (рис. Т2.32). Використовуючи вираз (2.39), можна вирішити й зворотну задачу - знайти $R_{дод}$, якщо відомо ω_n і струм якоря.

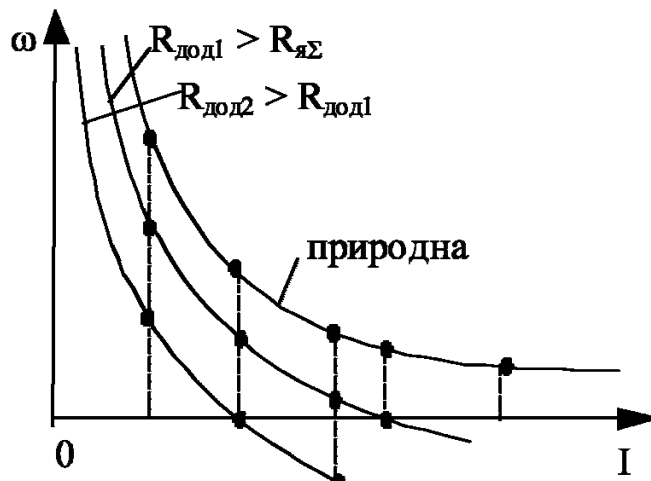


Рисунок Т2.32 - Реостатні характеристики ДПС ПЗ

Аналізуючи характеристики, що отримані при введенні $R_{дод}$, можна відзначити:

- для малих навантажень незалежно від величини додаткового опору швидкість ідеального холостого ходу прямує до нескінченності $\omega_{0ш} \rightarrow \infty$;
- жорсткість характеристик знижується із збільшенням $R_{дод}$;

- діапазон регулювання швидкості при введенні $R_{\text{дод}}$ не перевищує 2.5:1 і залежить від навантаження.

Окрім аналітичного методу розрахунку, характеристики при введенні $R_{\text{дод}}$, можна розрахувати і побудувати графічним способом.

Регулювання швидкості зміною напруги на якорі

Вираз для швидкісної характеристики ДПС ПЗ при зміні напруги на якорі можна отримати таким чином:

$$\frac{\omega_{\text{ш}}}{\omega_{\text{п}}} = \frac{U_1 - I \cdot R_{\text{я}\Sigma}}{U_{\text{ном}} - I \cdot R_{\text{я}\Sigma}}; \omega_{\text{ш}} = \omega_{\text{п}} \cdot \frac{U_1 - I \cdot R_{\text{я}\Sigma}}{U_{\text{ном}} - I \cdot R_{\text{я}\Sigma}}, \quad (2.45)$$

де U_1 - напруга, що прикладена до якоря (відрізняється від номінальної).

Аналізуючи залежність (2.45) можна зробити такі висновки:

- із зменшенням напруги на якорі, штучна характеристика розміщується нижче природної (тобто при зменшенні напруги зменшується $\omega_{\text{ш}}$);

- характеристики при зміні напруги умовно паралельні між собою, оскільки статичне падіння швидкості у всіх випадках однакове

$$\Delta\omega_c = \frac{I \cdot R_{\text{я}\Sigma}}{k\Phi(I)} \quad (\text{для однакових значень струмів});$$

- при зменшенні струму в колі якоря швидкість двигуна прямує до нескінченності, тобто і в даному випадку неможливий режим ідеального холостого ходу.

Вид характеристик при зміні напруги на якорі наведений на рис. Т2.33.

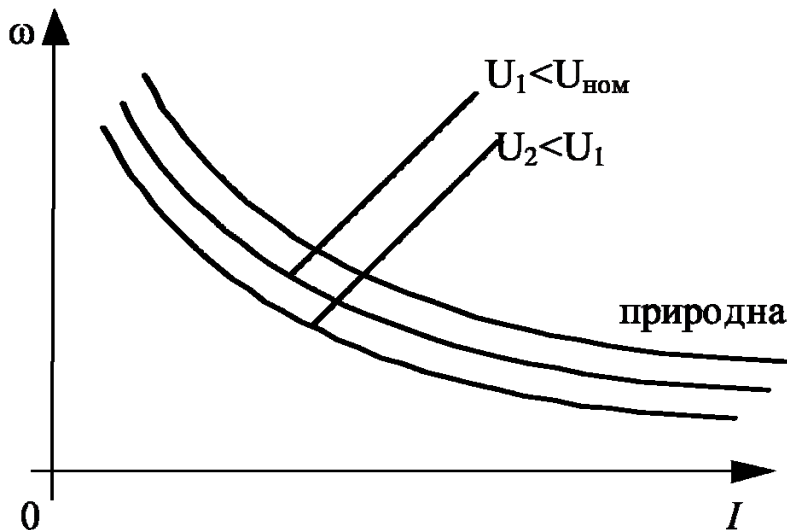


Рисунок Т2.33 - Характеристики ДПС ПЗ при зміні напруги на якорі

Регулювання швидкості зміною магнітного потоку

Цей спосіб може бути реалізований двома способами: шунтуванням обмотки збудження або якоря.

Регулювання швидкості при шунтуванні обмотки збудження

ДПС ПЗ є універсальною машиною, що дозволяє одержати велику кількість штучних механічних характеристик за допомогою різних способів включення ОЗ і якоря в комбінації з відповідними опорами (так звані шунтуючі контури).

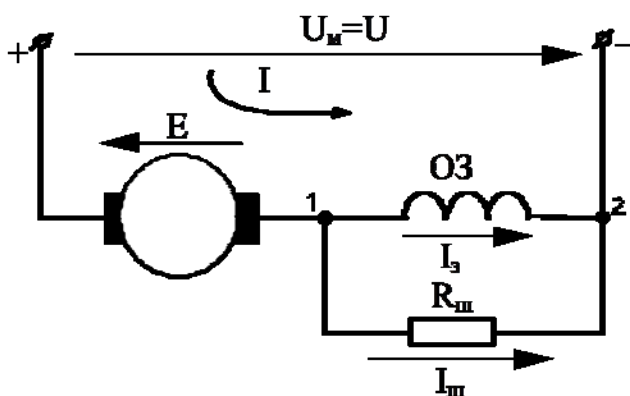


Рисунок Т2.34 - Схема ДПС ПЗ із шунтуванням обмотки збудження

Розглянемо схему включення ДПС ПЗ із шунтуванням ОЗ (рис. Т2.34).

Як видно зі схеми, при введенні в силове коло опору $R_{ш}$ (шунта), що включається паралельно

ОЗ, струм збудження буде відрізнятися від струму якоря і його величина буде залежати від опору шунта $R_{ш}$. Чим менше значення $R_{ш}$, тим менший струм буде протікати через ОЗ, отже, менший магнітний потік $\Phi(I_3)$ буде наводитися в машині.

Вихідними рівняннями, що описують таку схему, є:

- рівняння електричної рівноваги

$$U = I R_{я\Sigma} + I_{ш} R_{ш} + E_{ш}, \quad (2.46)$$

де $E_{ш}$ - ЕРС у штучній схемі включення ;

- рівняння ЕРС

$$E_{ш} = k(I_3) \cdot \square_{ш}; \quad (2.47)$$

- рівняння струмів

$$I = I_3 + I_{ш}. \quad (2.48)$$

Розрахунок штучних характеристик здійснюється за загальною методикою, тобто:

- задаючись різними значеннями струму збудження (I_3), за допомогою універсальних кривих і паспортних даних двигуна визначають залежність $k(I_3)$ за формулою:

$$k\Phi(I_3) = \frac{U_{ном} - I_3 \cdot (R_{я\Sigma} + R_{оз})}{\omega_{п}};$$

- визначають величину ЕРС двигуна $E_{ш}$ для штучної схеми включення

$$E_{ш} = U - I \cdot R_{я\Sigma} - I_3 \cdot R_{оз},$$

де $I = I_3 + I_{ш} = I_я + I_3 \cdot \frac{R_{оз}}{R_{ш}};$

- визначають кутову швидкість обертання $\square_{ш}$ за формулою:

$$\omega_{ш} = \frac{E_{ш}}{k\Phi(I_3)} \text{ і будують залежність } \omega_{ш} = f_1(I);$$

- визначають значення моменту двигуна в штучній схемі включення для різних I :

$$M = k\Phi(I_3) \cdot I,$$

де значення I розраховані для відповідних значень I_3 .

Оскільки включення $R_{ш}$ паралельно з ОЗ призводить до зменшення магнітного потоку машини відносно його значення для нормальної схеми включення, то природно припустити, що при $U = \text{const}$ можна одержати множину електромеханічних характеристик, розташованих вище природної. Загальний вид характеристик при цьому не змінюється, тобто вони будуть зміщуватися вгору від природної (рис. Т2.35).

Механічні характеристики для аналізованої схеми включення мають вид, згідно рис. Т2.36:

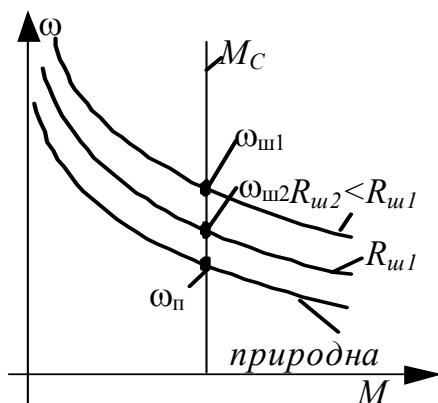


Рисунок Т2.35 - Електромеханічні характеристики ДПС ПЗ у схемі із шунтуванням обмотки збудження

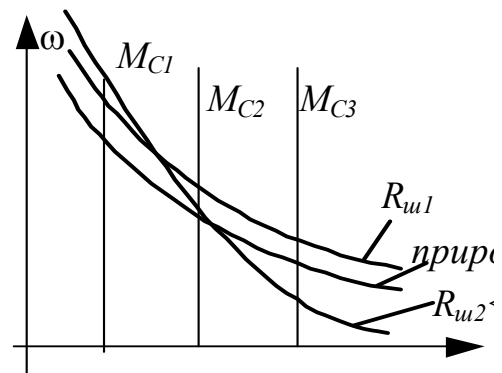


Рисунок Т2.36 - Механічні характеристики ДПС ПЗ у схемі із шунтуванням обмотки збудження

Очевидно, що із зменшенням $R_{ш}$, (тобто із зменшенням $\Phi(I_3)$), модуль жорсткості механічних характеристик знижується, оскільки із зменшенням потоку статичне падіння швидкості збільшується, а це

означає, що використовувати таку схему включення з метою регулювання швидкості приводу вище основної щоб запобігти перекидання можна лише в обмеженому діапазоні навантажень.

Регулювання швидкості при шунтуванні обмотки якоря

Схема включення двигуна постійного струму послідовного збудження наведена на рис. Т2.37.

Для даної схеми струм в обмотці збудження визначається як сума струмів $I_3 = I + I_{ш}$ і для його обмеження вводиться послідовно з обмоткою збудження додатковий опір $R_{дод}$. Наявність шунтуючого контуру створює можливість протікання струму обмоткою збудження навіть за відсутності останнього в колі якоря (дійсно, *при* $R_{ш}=0$ практично весь струм йде через шунт, а в якірній обмотці він дорівнює нулю). Ця обставина забезпечує можливість роботи двигуна в даній схемі на холостому ході (що в будь-якій іншій схемі ДПС ПЗ неможливо). Збільшення магнітного потоку за рахунок впливу струму шунтуючого контуру а також значний спад напруги від цього струму на послідовному опорі $R_{дод}$ призводить до значного зниження швидкості. Вид механічних характеристик для аналізованої схеми показаний на рис. Т2.38.

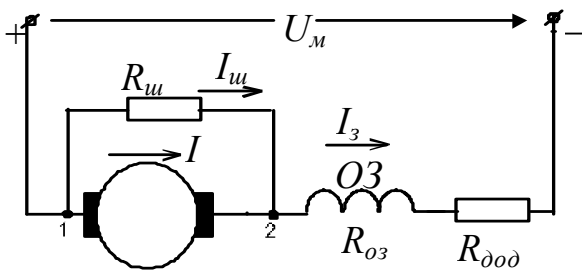


Рисунок Т2.37 - Схема ДПС ПЗ із шунтуванням обмотки якоря

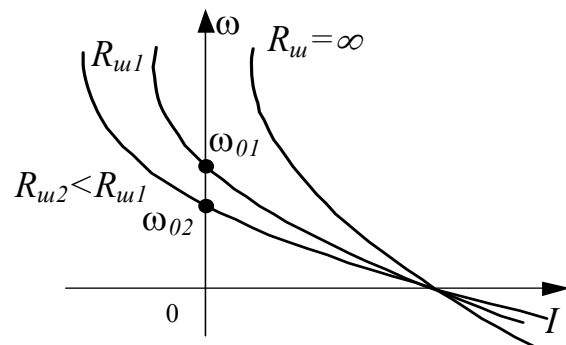


Рисунок Т2.38. - Механічні характеристики ДПС ПЗ у схемі із шунтуванням якоря

Як очевидно з рис. 2.38, зменшення $R_{ш}$ зміщує характеристику вниз і вліво в II квадрант. Очевидно, що ідеальний холостий хід буде реалізований, коли $E_{дв} = I_{ш} \cdot R_{ш}$. При подальшому збільшенні швидкості якір разом із мережею починає жити шунтуючий контур, внаслідок чого струм у ньому збільшується. Відповідно збільшується падіння напруги в цьому контурі ($I_{ш}R_{ш}$), а отже, зменшується і потік в обмотці збудження. Тому при деякій швидкості гальмівний момент досягає максимуму, а потім при подальшому її збільшенні починає зменшуватися (характеристики круто загинаються нагору). З характеристик видно, що при зменшенні $R_{ш}$ зменшується пусковий момент ($M_{пуск}$), а жорсткість характеристик зростає.

Порядок розрахунку характеристик

Використовуючи паспортні дані машини й універсальну характеристику $\hat{\omega}_n = f(\hat{I})$, визначають значення \square_n для довільно вибраних значень I (він же I_3 у звичайній схемі включення). За формулою

$$k\Phi(I_3) = \frac{U_n - I \cdot R_{я\Sigma}}{\omega_n},$$

розраховують криву намагнічування, задаючись різними значеннями I .

Визначають напругу на якорі

$$U = U_M - I_3 (R_{оз} + R_{дод})$$

і струм шунта: $I_{ш} = \frac{U}{R_{ш}}$.

Визначають струм якоря: $I = I_3 - I_{ш}$.

Визначають ЕРС. двигуна: $E_{ш} = U - IR_{я\Sigma}$.

Розраховують залежності $\omega = f(I)$ і $\omega = f(M)$.

Регулювання швидкості за допомогою комбінованої схеми включення

Такою схемою може служити схема ДПС ПЗ із паралельним включенням якоря й обмотки збудження за наявності додаткового опору (рис. Т2.39).

Розрахунок характеристик двигуна здійснюється за тією ж методикою, що й у попередніх випадках, тобто основною задачею розрахунку є знаходження ЕРС двигуна, за значенням якої з врахуванням кривої намагнічування, отриманої розрахунковим шляхом, можна визначити ряд точок ω_i , що належать штучним характеристикам.

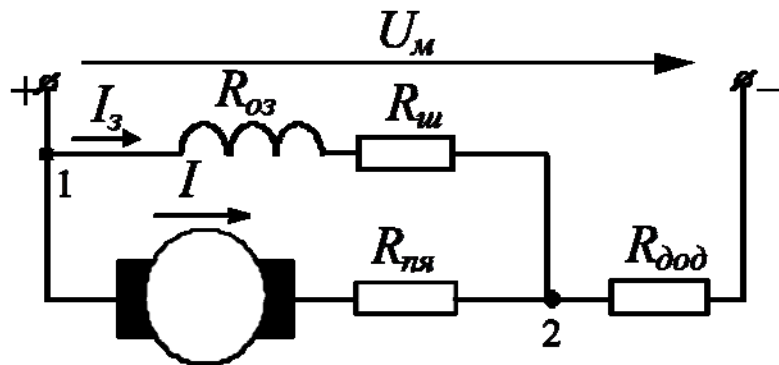


Рисунок. Т2.39 - Комбінована схема включення ДПС ПЗ

Характеристики двигуна для такої схеми мають вид, наведений на рис. Т2.40.

З рисунка видно, що за відсутності $R_{доп}$, включеного послідовно, схема двигуна нічим не відрізняється від схеми ДПС з незалежним збудженням і його характеристики є прямими лініями, причому, із зменшенням $R_{ш}$, підвищується їх жорсткість і зменшується швидкість двигуна.

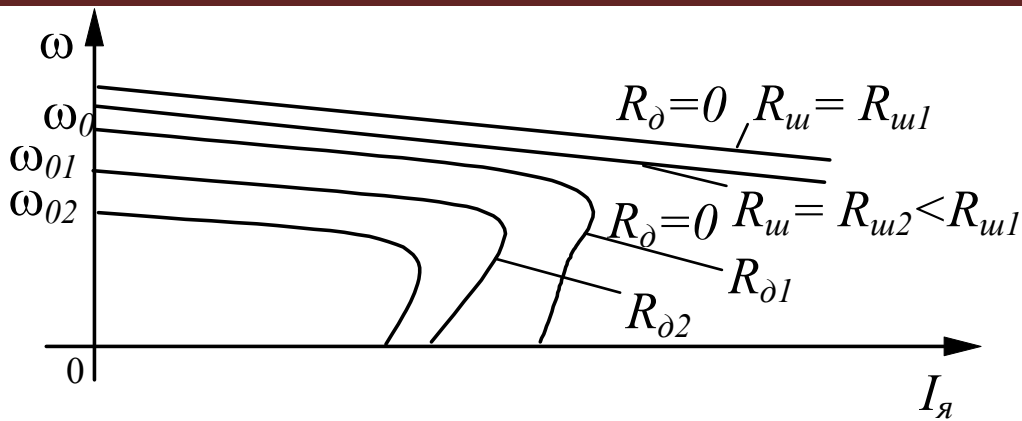


Рисунок Т2.40 - Механічні характеристики ДПС ПЗ для комбінованої схеми включення

У випадку, якщо $R_{\text{дод}} \neq 0$, двигун виявляється підключеним до частини діляника напруги, утвореного $R_{\text{ш}}$ і $R_{\text{дод}}$. Паралельний контур збудження забезпечує наявність магнітного потоку, коли струм якоря дорівнює нулю, завдяки чому характеристика має швидкість ідеального холостого ходу і можливість переходу в генераторний режим. При цьому, за рахунок додаткового падіння напруги на $R_{\text{дод}}$ напруга на якорі дещо знижується, а отже знижується і ω_0 .

Т2.4. Властивості і характеристики електроприводів з двигунами постійного струму змішаного збудження

Т2.4.1. Двигунний режим

Принципова схема включення двигуна постійного струму змішаного збудження (ДПС ЗЗ) має вид, наведений на рис. 2.41 а).

Як очевидно зі схеми, магнітний потік двигуна в даному випадку визначається алгебраїчною сумою потоків серієсної і шунтової обмоток:

$$\Phi = \Phi_{\text{ш}} \pm \Phi_{\text{с}}, \quad (2.49)$$

де знак «+» відповідає узгодженому включенню серієсної обмотки ($OЗ_{\text{с}}$) і шунтової обмотки ($OЗ_{\text{ш}}$), що характерне для двигунного

режиму роботи; знак «-» відповідає зустрічному вмиканню ОЗ_ш і ОЗ_с. Окрім того, магнітний потік ОЗ_с залежить від струму якоря (крива намагнічування), а магнітний потік шунтової обмотки є величиною сталою, що не залежить від $I_{я}$.

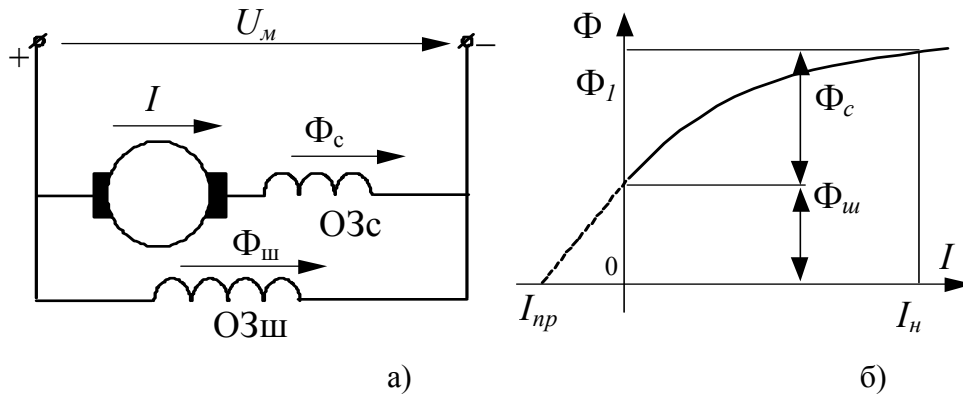


Рисунок Т2.41 - Узгоджене включення обмоток збудження ДПС ЗЗ: а) схема; б) графік результуючого магнітного потоку

Таким чином, повний результуючий потік ДПС ЗЗ можна представити графічно у вигляді суми двох потоків як показано на рис. Т2.41,б.

З графіку результуючого потоку очевидно, що при переході двигуна в генераторний режим, тобто коли I змінює свій знак, то знак магнітного потоку серієсної обмотки Φ_c також змінюється і при деякому значенні $I = I_{гр}$ результуючий потік стає рівним нулю, а машина виявляється повністю розмагніченою. Величина $\Phi_{рез}$ залежить від того, узгоджено чи зустрічно включені обмотки збудження.

Нескладно показати, що при зустрічному включенні обмоток ОЗ_с і ОЗ_ш (рис. 2.42 а) крива результуючого потоку буде мати вид, показаний на рис. Т2.42 б.

Варто враховувати також і те, що магнітний потік двигуна залежить від реакції якоря. У зв'язку з цим вид кривої результуючого потоку певною мірою буде визначатися співвідношенням

намагнічуючих сил обмоток збудження, тобто при різних співвідношеннях $\Phi_{ш}/\Phi_c$ універсальні характеристики ДПС ПЗ можуть виявитися непридатними.

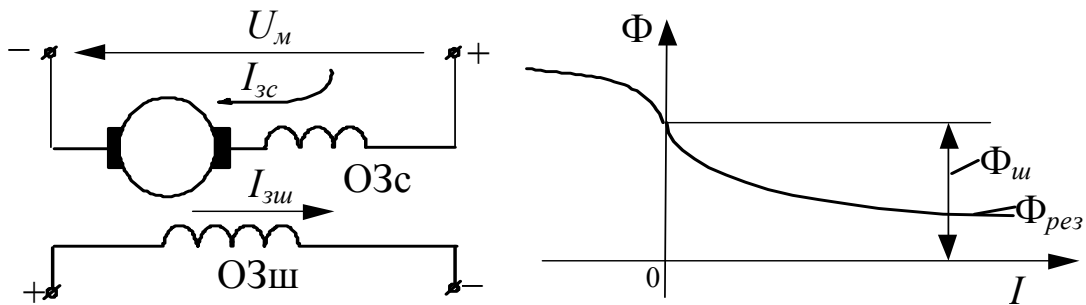


Рисунок Т2.42 - Зустрічне включення обмоток збудження ДСП 33: а) схема; б) графік результуючого магнітного потоку

Зазвичай у двигунах змішаного збудження, що випускаються промисловістю передбачено для номінального режиму роботи співвідношення $\Phi_{ш}/\Phi_c \approx 1,6 \div 2,6$ (іноді $\Phi_{ш} \approx \Phi_c$ для номінального режиму роботи), тобто значна частина магнітного потоку створюється незалежною обмоткою збудження.

Наявність двох обмоток збудження призводить до того, що електромеханічні і механічні характеристики займають проміжне положення між характеристиками ДПС НЗ і ДПС ПЗ. Зокрема, O3ш, що створює постійний магнітний потік $\Phi_{ш}$, забезпечує роботу двигуна навіть за відсутності струму якоря (тобто коли $\Phi_c = 0$), іншими словами, для ДПС 33 у звичайній схемі включення можливий режим ідеального холостого ходу. При цьому швидкість ідеального холостого ходу визначається величиною потоку паралельної обмотки збудження:

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi_{ш}}. \quad (2.50)$$

Ця швидкість вища, ніж для ДПС НЗ тієї ж потужності. Швидкісні і механічні характеристики ДПС 33 за своєю формою

наближаються до відповідних характеристик ДПС НЗ у залежності від співвідношення намагнічуючих сил обмоток збудження, що визначають величину відповідних потоків.

Розрахунок природної характеристики

ДПС ЗЗ звичайно будуються із значним насиченням магнітної системи. За цією причиною їх механічні характеристики, як і характеристики ДПС ПЗ, не можуть бути достатньо точно і просто виражені аналітично.

Загальний вид аналітичного виразу для швидкісної характеристики:

$$\omega = \frac{U_m - I \cdot R_\Sigma}{k \cdot [\Phi_{ш} + \Phi_c(I)]}$$

де $\Phi_c(I)$ - потік серієсної обмотки, що залежить від струму навантаження (струму якоря);

$$R_\Sigma = R_{озс} + R_{я\Sigma} + R_{дод}$$

де $R_{озс}$ - опір серієсної ОЗ.

Відповідно, механічна характеристика:

$$\omega = \frac{U_m}{k[\Phi_{ш} + \Phi_c(I)]} - \frac{MR_\Sigma}{\{k[\Phi_{ш} + \Phi_c(I)]\}^2}. \quad (2.53)$$

Реальні характеристики ДПС ЗЗ можна розрахувати і побудувати за допомогою наведених у каталогах універсальних кривих $\hat{\omega} = f_1(\hat{I})$ і $\hat{M} = f_2(\hat{I})$, що відображають механічні і швидкісні характеристики ДПС ЗЗ єдиної серії і наводяться у відносних одиницях (рис. Т2.43).

За універсальними кривими можна розрахувати природні електромеханічні і механічні характеристики ДПС ЗЗ, використавши методику розрахунку характеристик ДПС ПЗ.

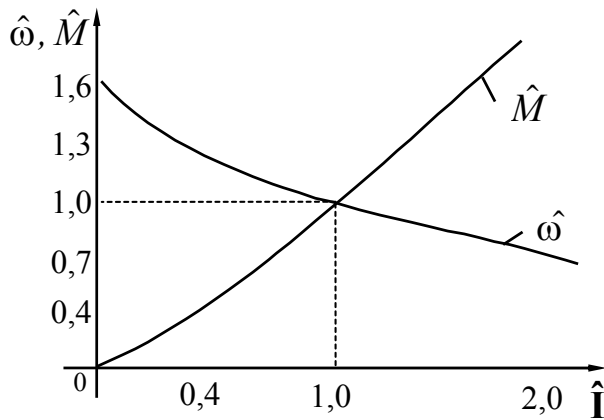


Рисунок Т2.43. Універсальні характеристики ДПС ЗЗ

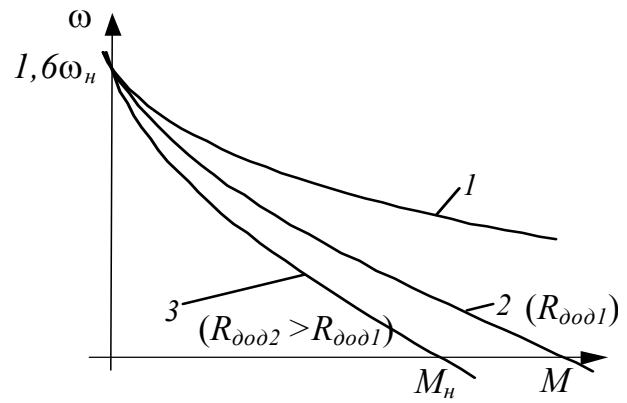


Рисунок Т2.44. Механічні характеристики ДПС ЗЗ

Вид механічних характеристик ДПС ЗЗ наведений на рис. Т2.44.

Аналізуючи механічні характеристики ДПС ЗЗ, відзначимо таке:

- усі характеристики перетинаються в одній точці, (точка ідеального холостого ходу), для котрої $I = 0$; $\Phi_c(I) = 0$; $\Phi_{ш} = \Phi_{ш-ном}$;

- при появі моменту на валу швидкість спочатку знижується різко, а потім, із збільшенням моменту зміна швидкості відбувається досить повільно. Це пояснюється тим, що при малих значеннях моменту, коли машина не насичена, її потік зростає досить швидко за рахунок збільшення $\Phi_c(I)$ при збільшенні струму якоря. При великих моментах, близьких і вищих номінального, настає насичення магнітної системи і потік $\Phi_c(I)$ майже не змінюється. Зниження швидкості при цьому відбувається, в основному, за рахунок падіння напруги в колі якоря $I \cdot R_{\Sigma}$. Механічна характеристика буде більш м'якою, коли вплив послідовної обмотки більший, тобто коли більша частка МРС серієсної обмотки в загальній МРС двигуна.

- жорсткість характеристик знижується із збільшенням опору якорного кола; якщо для природної характеристики значення $M_{к.з.} (I_{к.з.})$ дуже великі, то за наявності $R_{дод}$ в якорному колі значення $M_{к.з.} (I_{к.з.})$

можуть бути зменшені до допустимих значень, що дозволяє за достатньо великого навантаження (M_c) перевести двигун в режим проти-вмикання.

- за перевантажувальною здатністю ДПС ЗЗ займають проміжне положення між ДПС незалежного і послідовного збудження. Так, наприклад, для допустимого струму якоря $I_{\text{доп}} = (2-2,5)I_{\text{ном}}$ найбільше значення моменту $M_{\text{доп}}$ буде:

для ДПС НЗ - $M_{\text{доп}} = (2-2,5)M_{\text{ном}}$;

для ДПС ПЗ - $M_{\text{доп}} = (2,4- 2,0)M_{\text{ном}}$;

для ДПС ЗЗ - $M_{\text{доп}} = (2,2-2,7)M_{\text{ном}}$.

Т2.4.2. Гальмівні режими роботи двигунів постійного струму змішаного збудження

ДПС ЗЗ може працювати в тих же гальмівних режимах, що й інші двигуни постійного струму. Проте, гальмівні режими ДПС ЗЗ мають свою специфіку, зокрема, в режимі рекуперативного гальмування.

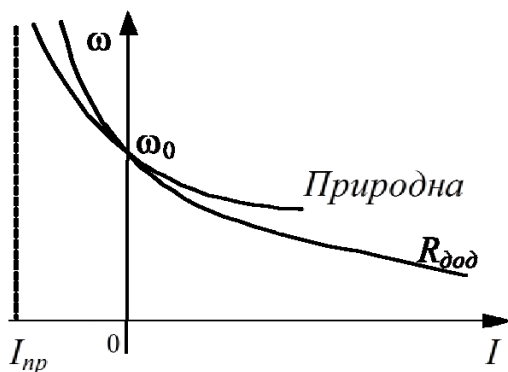


Рисунок. Т2.45 - Швидкісні характеристики ДПС ЗЗ в режимі рекуперативного гальмування

Режим рекуперативного гальмування

У режимі рекуперативного гальмування, коли $\omega > \omega_0$, тобто $E_d > U_m$ струм якоря змінює свій напрямок, що призводить до розмагнічування двигуна, і результируючий потік машин визначається як $\Phi_{ш} - \Phi_c(I_{я})$.

У цьому випадку швидкісні

характеристики двигуна (рис. Т2.45) будуть розміщуватися в II-му квадранті.

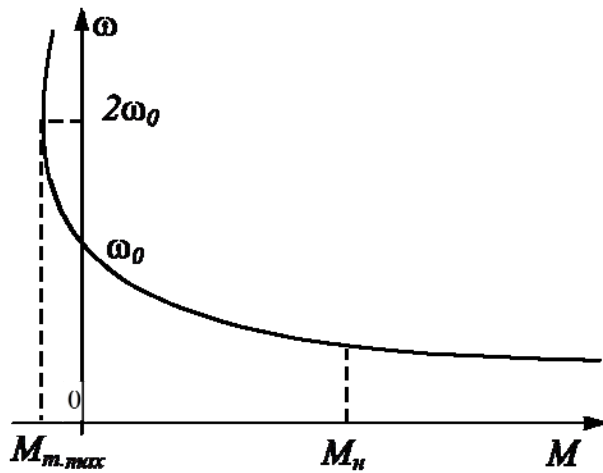


Рисунок. Т2.46 - Механічна характеристика ДПС 33 у режимі рекуперативного гальмування

Швидкісні характеристики є продовженням характеристик двигунного режиму в II квадранті, причому крутизна їх зростає. Коли швидкість прямує до нескінченності ($\omega \rightarrow \infty$) характеристики асимптотично наближаються до граничного струму якоря, коли $\Phi_{ш} - \Phi_c(I_{гр.}) = 0$.

Розрахунок швидкісних характеристик у цьому режимі можна здійснити за формулою:

$$\omega = \frac{U_m}{-k\Phi_c(I_{я}) + k\Phi_{ш}} - \frac{(-I_{я})R_{\Sigma}}{k\Phi_{ш} - k\Phi_c(I_{я})}. \quad (2.54)$$

Механічна характеристика має екстремум. Спочатку, із ростом швидкості, наростання гальмівного струму вище, ніж зниження результуючого потоку, тому гальмівний момент збільшується. При великих струмах машина практично цілком розмагнічується і гальмівний момент зменшується (рис. Т2.46).

Значення максимального моменту в режимі рекуперативного гальмування відносно невелике ($M_{г.макс} \approx 0,2-0,7 \cdot M_n$) і має місце при швидкості $\omega > 2\omega_0$, причому для точок

$$\begin{aligned} \omega = \omega_0 : I &= 0; & M &= 0; \\ \omega = \infty : I &= I_{гр.}; & \Phi &= 0; & M &= 0. \end{aligned}$$

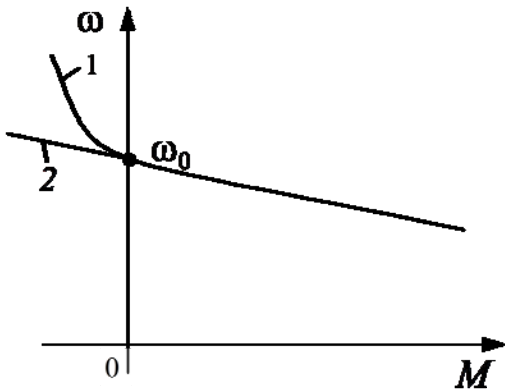


Рисунок Т2.47 – Характеристики ДПС ЗЗ в режимі рекуперативного гальмування при закорочуванні серієсної ОЗ

Таким чином, механічна характеристика в режимі рекуперативного гальмування має нестійку ділянку. Модуль жорсткості механічної характеристики в режимі рекуперативного гальмування невеликий. Усунути нестійку зону роботи двигуна в генераторному режимі (а тим самим підвищити жорсткість характеристик і

значення гальмівного моменту) можливо двома способами:

- реверсуванню (переключенню полярності) серієсної ОЗ при переході в режим РГ (рис. Т2.47, характеристика 1). Проте цей спосіб помітно ускладнює схему включення головних кіл двигуна.

- шунтуванням серієсної ОЗ при переході в режим РГ, коли двигун працює в генераторному режимі як ДПС НЗ із неповним потоком збудження (рис. Т2.47, характеристика 2).

Модуль жорсткості механічних характеристик для другого способу різко зросте за рахунок зменшення R_{Σ} (оскільки $R_{O3} = 0$) і сталості результуючого потоку Φ .

При рекуперативному гальмуванні недоцільно вводити в коло $R_{дод}$, оскільки крім зниження енергетичних показників, швидкість для заданого навантаження стає ще вищою ($\omega > \omega_0 = (1,2 - 1,6)\omega_n$).

Гальмування противмиканням

Гальмування противмиканням для ДПС ЗЗ здійснюється аналогічно, як і для ДПС ПЗ :

- для реактивного характеру моменту навантаження зміною полярності напруги на якорі і введенням у якірне коло додаткового опору $R_{\text{дод}}$ з метою обмеження струму при переході в гальмівний режим;

- для активного характеру моменту навантаження введенням у якірне коло додаткового опору $R_{\text{дод}}$.

На рис.Т2.48. наведена принципова схема ДПС ЗЗ, що реалізує описані способи гальмування.

Механічні характеристики в режимі проти-вмикання що отримані при реверсі напруги на якорі є продовженням характеристик двигунного режиму з III-го квадранту в II-й (рис. Т2.49, відрізок 1-2).

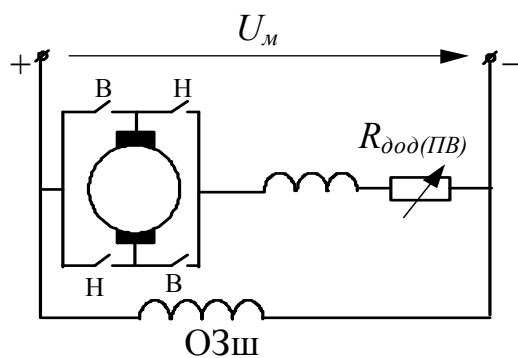


Рисунок Т2.48. Схема включення двигуна постійного струму змішаного збудження в режимі проти-вмикання

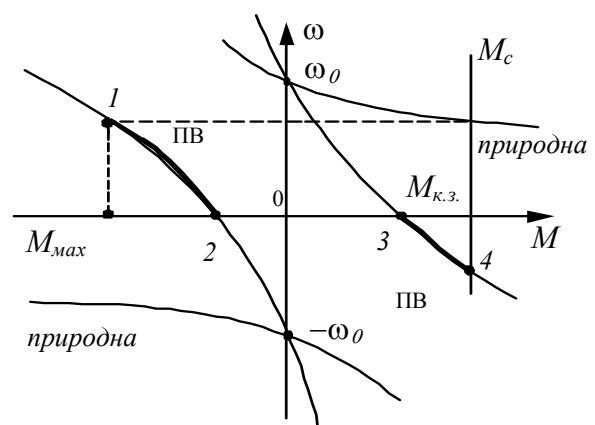


Рисунок Т2.49. Механічні характеристики ДПС ЗЗ в режимі проти-вмикання

Характеристика в режимі проти-вмикання, для активного моменту навантаження, є продовженням характеристики двигунного режиму з I-го квадранту в IV- й (рис. Т2.49, відрізок 3-4).

Електродинамічне гальмування

В режимі динамічного гальмування із збереженням напрямку обертання виникають ті ж проблеми, що й у режимі рекуперативного гальмування, як-от: за рахунок зміни напрямку струму I серієсна обмотка буде розмагнічувати машину і тим самим зменшувати гальмівний ефект (рис. Т2.50, II квадрант). Якщо ж динамічне гальмування здійснюється при зміні напрямку обертання (рис. Т2.50, IV квадрант), то, навпаки, буде мати місце додаткове намагнічування і збільшення гальмівного ефекту.

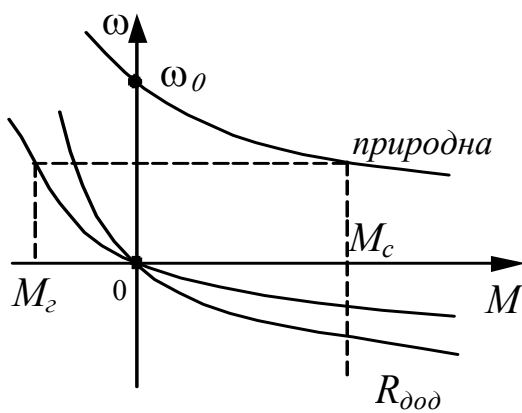


Рисунок Т2.50. Механічні характеристики ДПС 33 в режимі динамічного гальмування

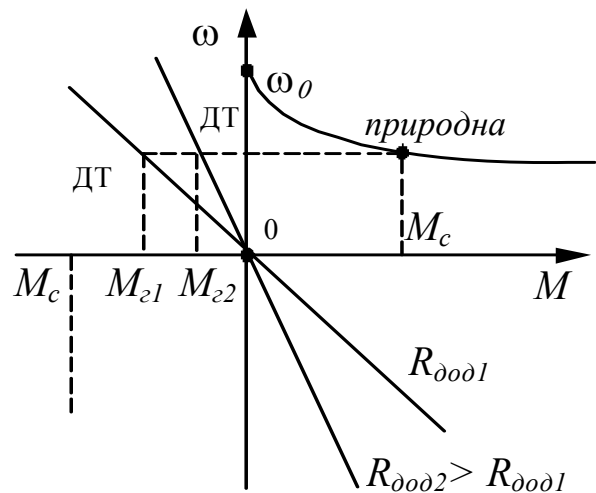


Рисунок Т2.51. Механічні характеристики ДПС 33 в режимі динамічного гальмування при закороченій серієсній обмотці

Тому частіше застосовують більш простий спосіб динамічного гальмування - із незалежним збудженням (серієсна обмотка збудження ОЗ_с при переводі в режим ДГ закорочується). Характеристики при цьому мають таку ж форму, як і характеристики ДПС НЗ у режимі ДГ (рис. Т2.51).

Розрахунок характеристик аналізованих режимів для ДПС 33 може бути виконаний за допомогою будь-якого методу, що застосовується для ДПС ПЗ.

Т2.4.3. Способи регулювання швидкості двигунів постійного струму змішаного збудження

Регулювання швидкості ДПС ЗЗ здійснюється:

- зміною опору в якірному колі;
- зміною струму збудження незалежної обмотки;
- зміною напруги на якорі;
- шунтуванням обмотки якоря при наявності послідовного опору $R_{\text{дод}}$.

Окрім того, для ДПС ЗЗ можна регулювати швидкість шляхом замикання на-коротко серієсної обмотки. Цей прийом застосовується зазвичай, як додатковий, при регулюванні зміною опору якірного кола. В цьому випадку, якщо необхідно отримати малі швидкості, вводять опори; якщо необхідно підвищити швидкість вище основної - замикають на-коротко OZ_c , що викликає зменшення магнітного потоку і двигун по суті працює з паралельним збудженням. Оскільки зменшення магнітного потоку відбувається не миттєво (завдяки наявності короткозамкненого контуру), перехід на механічну характеристику, що відповідає закороченій OZ_c , відбувається поступово. Штучні характеристики для цього способу наведені на рис. Т2.52, де характеристики 1, 2, 2 відповідають роботі з різними $R_{\text{дод}}$; характеристика 4 - роботі з $R_{\text{дод}}=0$, але при замиканні на-коротко OZ_c .

Штучні характеристики ДПС ЗЗ розраховуються за тією ж методикою, що і відповідні характеристики ДПС ПЗ.

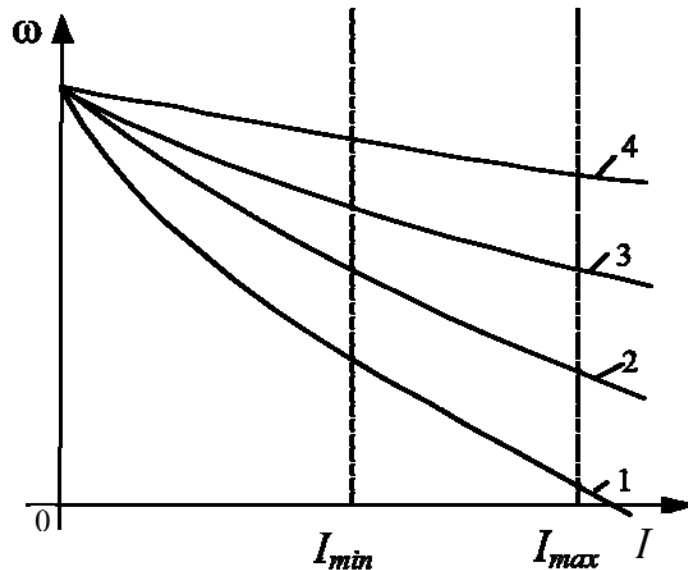


Рисунок Т2.52. Штучні характеристики ДПС зЗ

Контрольні запитання:

1. Рушійний та гальмівні режими як енергетичні режими роботи електричної машини.
2. Охарактеризувати гальмівні режими роботи електричної машини.
3. Якими факторами обмежується електромеханічне перетворення енергії в електричній машині.
4. Конструкція та принцип роботи електричного двигуна постійного струму.
5. Види двигунів постійного струму в залежності від конструктивного виконання системи збудження.
6. Від чого залежить момент ДПС з незалежним збудженням.
7. Рівняння електромеханічної та механічної характеристики ДПС з незалежним збудженням.
8. Чим визначається швидкість ідеального ходу ДПС з незалежним збудженням.

9. Чим визначається жорсткість механічної характеристики ДПС з незалежним збудженням.
10. При яких умовах ДПС з незалежним збудженням має природну механічну характеристику.
11. Чим визначається діапазон керування швидкістю електропривода.
12. Способи керування швидкістю ДПС з незалежним збудженням, їх переваги та недоліки.
13. Які є способи реверсу ДПС з незалежним збудженням, їх переваги та недоліки.
14. Які режими гальмування підтримує ДПС з незалежним збудженням, їх переваги та недоліки.
15. Як реалізується рекуперативне гальмування.
16. Як реалізується гальмування противмиканням.
17. Як реалізується динамічне гальмування.
18. Способи пуску ДПС з незалежним збудженням.
19. Принцип роботи задатчика інтенсивності.
20. Чим визначається електромагнітна стала часу кола якоря.
21. Чим визначається електромагнітна стала часу кола збудження.
22. Чим визначається електромеханічна стала часу двигуна.
23. Якою типовою ланкою описується коло якоря.
24. Якою типовою ланкою описується коло збудження.
25. Який взаємозв'язок між колом збудження та якоря.
26. Що таке внутрішній електромеханічний зв'язок двигуна.
27. Який вигляд мають механічні характеристики двигуна при живленні від джерела струму.
28. Чим відрізняється рівняння динамічної механічної характеристики від статичної.
29. У яких випадках слід користуватися статичною чи динамічною механічною характеристикою.

30. Який вигляд має електромеханічна та механічна характеристика ДПС з послідовним збудженням.
31. Які є способи керування швидкістю ДПС з послідовним збудженням.
32. Які режими гальмування забезпечує ДПС з послідовним збудженням.
33. Як здійснити реверс ДПС з послідовним збудженням.
34. Що таке універсальні характеристики ДПС з послідовним та змішаним збудженням.
35. Як будується природна механічна характеристика ДПС з послідовним збудженням.
36. Переваги та недоліки ДПС з послідовним збудженням.

Розділ Т3. ВЛАСТИВОСТІ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГУНІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

Т3.1. Асинхронні двигуни в електроприводі

Асинхронні двигуни (АД) в даний час є найпоширенішим типом електродвигунів, що застосовуються у промисловості і сільському господарстві. Це визначається цілим рядом переваг АД порівняно з іншими видами електродвигунів:

- простотою конструкції і надійністю в експлуатації;
- меншою матеріалоємністю і трудомісткістю при виготовленні, меншою вартістю;
- у 1,5-2,0 рази меншими, ніж у ДПС масо-габаритними показниками на одиницю потужності;
- можливістю живлення як безпосередньо від промислової мережі змінного струму з частотою 50 Гц (у нерегульованих ЕП), так і від перетворювальних пристроїв (у регульованих ЕП);
- оборотністю, тобто можливістю роботи як у двигунному, так і в гальмівних режимах,
- високими динамічними показниками завдяки меншим, ніж у ДПС моменту інерції.

Промисловістю випускаються АД із короткозамкненим і фазним ротором. Перші більш прості і надійні, проте регульовальні можливості їх обмежені, тому в приводах великої потужності більшого поширення здобули АД з фазним ротором.

В даний час діапазон потужностей АД, що випускаються промисловістю, складає відповідно:

- для АД з фазним ротором - 1÷35 тис.кВт;
- для АД з короткозамкненим ротором - 1 ÷ 3,5 тис.кВт.

Слід зазначити, що діапазон потужності в АД з фазним ротором звужується в залежності від його синхронної швидкості обертання - так у двигунів із синхронною швидкістю 3000 об/хв.. потужність не перевищує 5000 кВт.

ТЗ.2. Властивості і характеристики електроприводів із асинхронними двигунами з фазним ротором

ТЗ.2.1. Схема заміщення асинхронного двигуна

Основним методом аналізу властивостей і характеристик АД з фазним ротором у статичних режимах є використання еквівалентних схем. Причому, за деяких припущень, достатнім є розгляд явищ, що відносяться до однієї фази багатозазного (трифазного) двигуна.

Такими припущеннями є:

- сталість параметрів усіх колів машини і симетрія всіх фаз;
- синусоїдність і по-фазна симетрія напруги живлення;
- відсутність насичення магнітопроводу і впливу струму статора на величину реактивних опорів статорної і роторної обмоток;
- сталість величини повної провідності контуру, що намагнічує; пропорційність струму намагнічування напрузі живлення незалежно від навантаження;
- відсутність додаткових втрат;
- знехтування моментами, що створюються вищими гармоніками.

Еквівалентні схеми, що складені з врахуванням викладених припущень, називають схемами заміщення АД. Розрізняють Т-подібну і Г-подібну схеми заміщення (рис. ТЗ.1).

Вирази для основних робочих параметрів АД, що одержуються в результаті розрахунків на основі Т-подібної схеми заміщення, достатньо складні і незручні для практичного використання, хоча результати розрахунків на основі цієї схеми більш точні. Тому цю схему використовують лише в спеціальних випадках за необхідності врахування впливу намагнічуючого контуру.

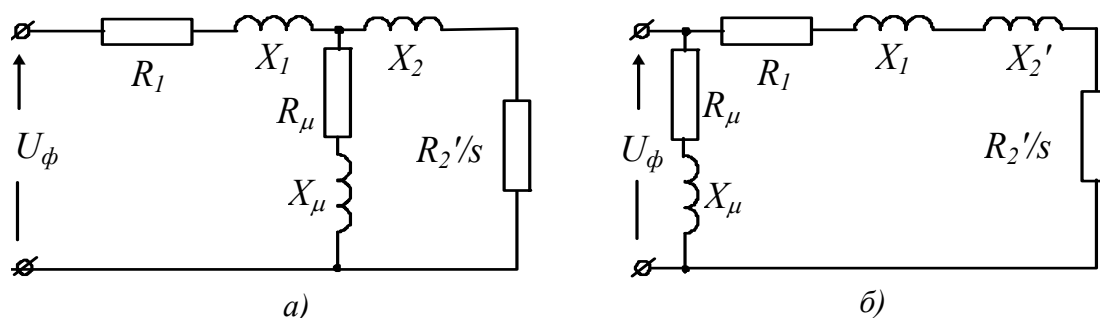


Рисунок Т3.1 - Схеми заміщення асинхронного двигуна: а) Т-подібна схема; б) Г-подібна схема.

На практиці, як правило, використовують Г-подібну схему заміщення, нехтуючи при цьому зміною струму намагнічування, що виникає при зміні навантаження, а також падінням напруги від струму намагнічування в опорах обмотки статора. З врахуванням

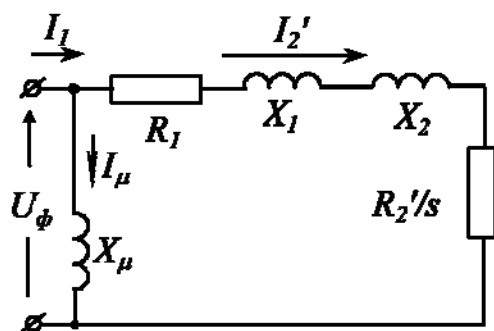


Рисунок Т3.2 - Спрощена Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

того, що індуктивний опір контуру намагнічування значно більший активного опору, останнім нехтують і схема набуває більш простого виду (рис. Т3.2). Позначення, прийняті в схемі заміщення: U_{ϕ} - фазна напруга на статорі, В; I_1 , I_2' , I_{μ} -

відповідно струм фази статора, приведений до статорної обмотки струм ротора, струм намагнічування А; X_{μ} - індуктивний опір контуру намагнічування, Ом; R_1, R_2' - активний опір фази статора і приведений до статорної обмотки опір фази ротора, Ом; X_1, X_2' - індуктивний фазний опір обмотки статора і приведений до статорної обмотки індуктивний опір ротора, Ом; s - ковзання двигуна, що визначається як

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}, \quad (3.1)$$

де ω_0 - кутова швидкість обертання поля статора АД, що називається синхронною швидкістю обертання або швидкістю ідеального холостого ходу.

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_c}{p}, \quad (3.2)$$

f_c - частота напруги живлення мережі, Гц; p - число пар полюсів АД.

Примітка: Для машин загальнопромислового виконання характерні визначені співвідношення між опорамі схеми заміщення. Якщо прийняти індуктивний опір контуру намагнічування рівним 1 Ом, то для опорів двигуна справедливі такі наближені співвідношення:

$$X_{\mu} = 1 \text{ Ом};$$

$$X_1 = 0,1 \div 0,15 \text{ Ом};$$

$$R_1 = (0,1 \div 0,4) X_1 \text{ Ом};$$

$$R_{\mu} = (0,5 \div 0,7) R_1 \text{ Ом}.$$

Представлена схема заміщення дозволяє розглядати електромагнітні процеси АД, у найбільше простому і доступному виді завдяки тому, що в ній усі параметри обмотки ротора приведені до обмотки статора. Іншими словами, реальна обмотка ротора умовно

замінена деякою фіктивною, що має число фаз, витків, а також обмоточний коефіцієнт такі ж, як і в статорній обмотці.

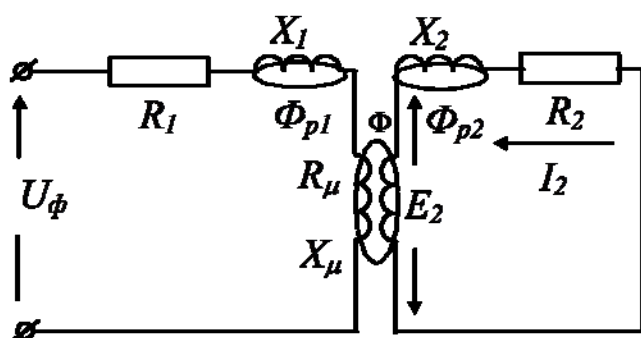


Рисунок ТЗ.3 - Схема заміщення для нерухомого АД з фазним ротором

Сутність приведення впливає з таких міркувань. Асинхронний двигун у нерухомому стані може бути представлений як звичайний трифазний трансформатор (рис. ТЗ.3).

При живленні обмотки статора трифазним струмом створюється обертове магнітне поле, що перетинає витки обмотки статора і ротора. Відповідно виникають потоки розсіювання статора Φ_{p1} , і ротора Φ_{p2} , а також основний потік Φ , що замикається через обмотки статора і ротора. При цьому в нерухомому роторі буде індукуватись ЕРС E_2 .

Відношення ЕРС статора E_1 до ЕРС ротора E_2 (для нерухомого ротора) називається коефіцієнтом трансформації за ЕРС.:

$$k_e = \frac{E_1}{E_{2к}}, \quad (3.3)$$

де $E_1 = 0,95U_n$ - ЕРС статора; E_2 - ЕРС ротора.

Коефіцієнт k_e можна знайти, виходячи з паспортних даних двигуна:

$$k_e = \frac{0,95U_n}{E_{2к}}, \quad (3.4)$$

де U_n - номінальна лінійна напруга на статорі; $E_{2к}$ - ЕРС між каблучками нерухомого ротора.

Відповідно відношення між струмами ротора і статора називається коефіцієнтом трансформації за струмом:

$$k_i = \frac{I_2}{I_1}. \quad (3.5)$$

Коефіцієнти k_e і k_i пов'язані між собою залежністю

$$k_i = k_e \frac{m_1}{m_2}, \quad (3.6)$$

де m_1 , m_2 - відповідно число фаз обмоток статора і ротора.

Використовуючи коефіцієнти трансформації, приведемо параметри обмотки нерухомого ротора до параметрів статора (рис. ТЗ.4):

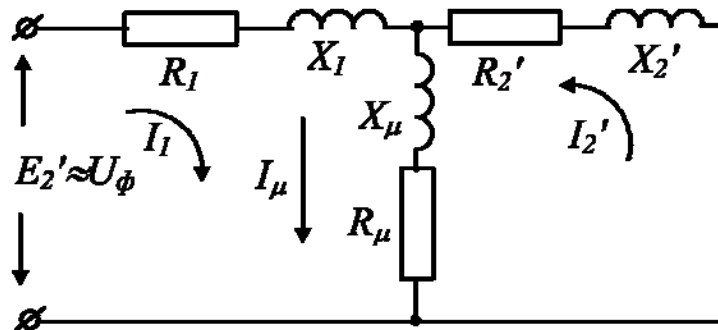


Рисунок ТЗ.4 - Схема приведення нерухомого ротора до обмотки статора АД.

$$E_2' = E_2 \cdot k_e = E_1; \quad (3.7)$$

$$I_2' = \frac{I_2}{k_e} = I_1; \quad (3.8)$$

$$R_2' = \frac{E_2'}{I_2'} = \frac{E_2 k_e}{I_2} \cdot k_e = R_2 \cdot k_e^2; X_2' = X_2 \cdot k_e^2 \quad (3.9)$$

У випадку, коли частота обертання ротора відрізняється від частоти поля статора ($f_2=f_1 \cdot s$), параметри двигуна будуть мати значення відповідно:

$$x_2 = 2\pi f_2 L_2, \text{ тобто } x_2 = f_1(s);$$

$$E_2 = 4,44 f_2 \omega k \Phi, \text{ тобто } E_2 = f_2(s),$$

і схема заміщення набуває виду (рис.3.5,в). Ця схема отримана шляхом послідовних перетворень схем приведених на рис. Т3.5.а) і рис. Т3.5.б).

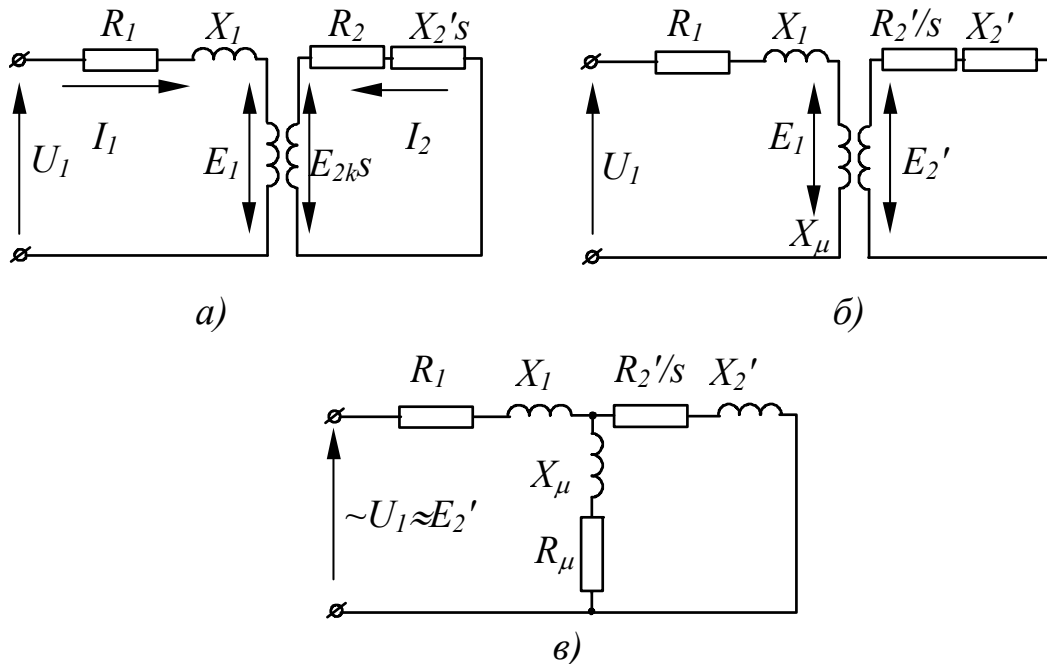


Рисунок Т3.5 - Приведення схеми заміщення АД з фазним ротором

Оскільки падіння напруги в обмотці статора незначне (особливо для великих двигунів, у яких активний опір статорної обмотки малий), то контур намагнічування можна перенести на затискачі статора, вважаючи, що $U_1 \approx E_1 \approx E_2'$.

У звичайній схемі АД підключається безпосередньо по мережі змінної частоти (рис. Т3.6).

Величина струму намагнічування наближено визначається за виразом:

$$I_\mu \approx \frac{U_1}{X_\mu} = I_0 = \frac{U_1}{Z_\mu}, \quad Z_\mu = X_\mu, \quad (3.10)$$

де $X_\mu = \Omega L_\mu$, тобто X_μ залежить від ступеня насичення сталі машини; L_μ - індуктивність контуру намагнічування.

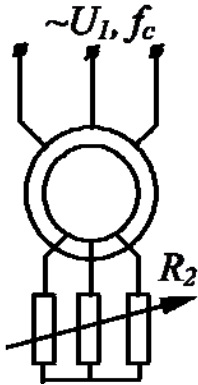


Рисунок Т3.6 - Схема включення асинхронного двигуна з фазним ротором

В свою чергу, L_{μ} залежить від величини струму намагнічування I_{μ} , що показано на графіку (рис. Т3.7):

Струм намагнічування I_{μ} залежить від величини прикладеної напруги (із збільшенням напруги I_{μ} також буде збільшуватися). З іншого боку, зростання I_{μ} призводить до зменшення індуктивності, що знову, за рахунок зменшення $X_{\mu} = \Omega L_{\mu}$ призведе до ще

більшого зростання значення струму I_{μ} , і машина може виявитися насиченою (що пов'язано з ростом втрат у сталі машини), і статор двигуна буде перегріватися. Тому необхідно пам'ятати, що для нормальної роботи АД у відповідності зі стандартом, необхідно щоб: $+\Delta U_{\text{ж}} \leq 5\% U_{\text{н}}$; $-\Delta U_{\text{ж}} \leq 10\% U_{\text{н}}$.

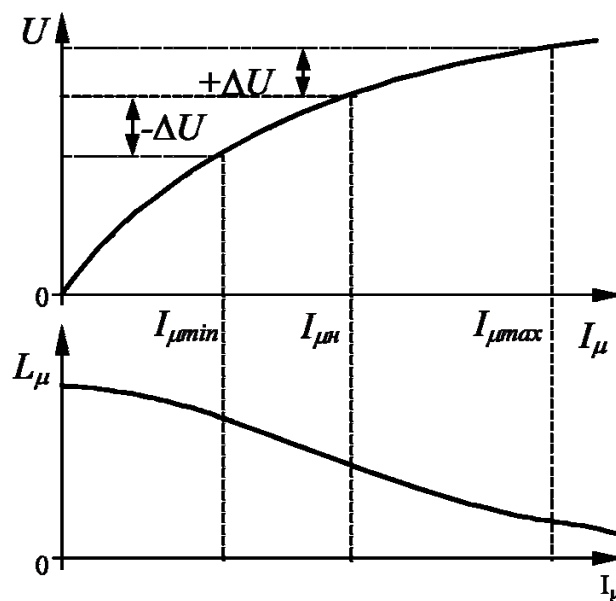


Рисунок Т3.7 - Залежність індуктивності асинхронного двигуна від струму намагнічування статора

Значення струму намагнічування залежить і від частоти напруги живлення:

$$I_{\mu} \approx \frac{U_{ж}}{X_{\mu}} = \frac{U_{ж}}{2\pi f L_{\mu}} \quad (3.11)$$

тобто зменшення частоти напруги живлення f призводить до насичення стали; при цьому T_m зменшується, X_{μ} зменшується викликаючи ще більше зростання I_{μ} . Тому при коливаннях частоти повинні установлюватися визначені межі.

Вказаних вище недоліків можна уникнути в системах регульованого ЕП, що дозволяють регулювати напругу одночасно з частотою відповідно до закону частотного регулювання, наприклад, виду

$$\frac{U}{f} = \text{const}, \quad (3.12)$$

що забезпечує приблизну сталість магнітного потоку АД.

ТЗ.2.2. Електромеханічні характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором

Під електромеханічною і механічною характеристиками АД розуміють залежності струму і моменту від ковзання.

Для виведення виразів електромеханічних (швидкісних) характеристик асинхронного двигуна скористаємося схемою заміщення (рис. ТЗ.2.) З врахуванням векторної діаграми струмів асинхронного двигуна (рис. ТЗ.8) запишемо вираз для струму I_2' :

$$I_2' = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_k^2}}, \quad (3.13)$$

де $X_k = X_1 + X_2$ - приведений, до кола статора, індуктивний опір короткого замикання АД.

Цей вираз визначає рівняння швидкісної характеристики

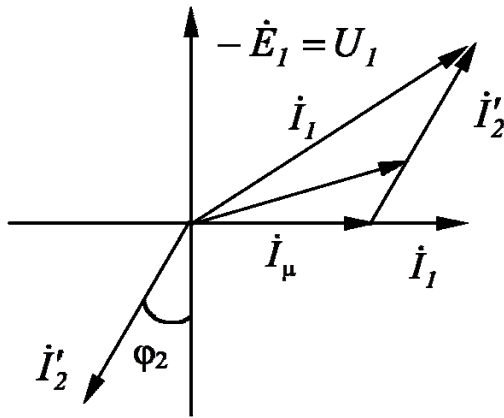


Рисунок Т3.8-Векторна діаграма струмів асинхронного двигуна

$$I_2' = f(s) = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_k^2}} \quad (3.14)$$

Розглянемо електромеханічні (швидкісні) характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором $I_1 = f_1(s)$ і $I_2' = f_2(s)$, що визначають зміну струмів статора і ротора у функції ковзання (або швидкості). Для швидкісної характеристики в функції

приведеного струму ротора I_2' (3.14), при $s > 0$ по мірі збільшення ковзання $I_2'(s)$ монотонно зростає (причому, при $s = 0$ струм у I_2' також дорівнює нулю).

При пуску АД, коли $s = 1$, струм в роторі дорівнює пусковому ($I_2' = I_{2кз.} = I_{2пуск'}$) і визначається відповідно до виразу:

$$I_{2кз.}' = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + X_k^2}} \quad (3.15)$$

Загальний вид швидкісної характеристики для струму в функції ковзання і кутової швидкості обертання наведений на рис. Т3.9.

Із аналізу залежності $I_2' = f(\omega)$ (рис.3.9,б) очевидно, що практично у всьому діапазоні зміни ковзання $0 < s < 1$ струм дещо менший, ніж струм $I_{кз.}$ (пусковий струм). Струм спадає до номінальної величини тільки в області номінального ковзання.

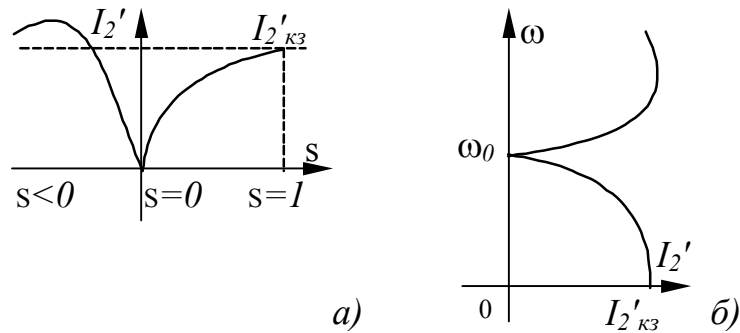


Рисунок Т3.9 - Швидкісні характеристики асинхронного двигуна: для струму ротора а) в функції ковзання; б) в функції кутової швидкості.

Для інтервалу ковзань $s < 0$, що відповідає генераторному режиму, ($\omega > \omega_0$) можна бачити, що залежність $I_2'(s)$ спочатку інтенсивно зростає до деякого максимуму

$$I_{2\max}' = \frac{U_{1\phi}}{X_k} \quad (3.16)$$

при ковзанні $s = -\frac{R_2'}{R_1}$, а потім повільно зростає до свого граничного значення $I_{к.з.}$, але вже зверху. При однакових значеннях ковзання за абсолютною величиною струм у генераторному режимі дещо більший струму I_2' у двигунному режимі.

Для виведення виразу швидкісної характеристики для струму статора $I_1(s)$, скористаємось векторною діаграмою струмів АД (рис. 3.8), із якої видно, що струм \dot{I}_1 є векторною сумою струму намагнічування \dot{I}_μ і струму ротора \dot{I}_2' :

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_\mu + \dot{I}_2'. \quad (3.17)$$

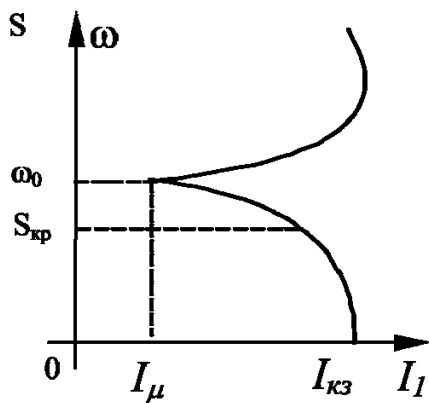
Для Г-подібної схеми заміщення струм намагнічування I_μ залишається незмінним у усіх режимах, а його модуль може бути визначений як:

$$I_{\mu} = \frac{U_{1\phi}}{X_{\mu} + X_1} \approx \frac{U_{1\phi}}{X_{\mu}} \quad (3.18)$$

(складовою $R_1 + R_{\mu}$ через її мале значення відносно X_{μ} можна знехтувати).

Тоді модуль струму I_1 дорівнює:

$$I_1 = \sqrt{(I_{\mu} + I'_{2p})^2 + (I'_{2a})^2}, \quad (3.19)$$



де $I'_{2a} = I'_2 \cdot \cos \varphi_2$; $I'_{2p} = I'_2 \sin \varphi_2$; φ_2 - кут зсуву між струмом ротора і ЕРС ротора (кут навантаження), що може бути визначений за виразом:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{X_k}{R_1 + \frac{R_2}{s}}. \quad (3.20)$$

Графік залежності $I_1 = f(s)$ наведений на рис. ТЗ.10:

Рисунок ТЗ.10 - Швидкісна характеристика асинхронного двигуна в функції струму статора

Аналіз залежності $I_1 = f(s)$ показує, що при $s=0$ (коли $I'_2=0$), струм в обмотці статора дорівнює

струму намагнічування (струм холостого ходу) $I_1 = I_{\mu} = I_{x. x}$.

ТЗ.2.3. Механічні характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором

Рівняння механічної характеристики $M_e = f(s)$ можна отримати, розглянувши баланс потужності двигуна. Електромагнітна потужність P_{12} , передається від статора ротору обертовим магнітним полем, визначається як

$$P_{12} = M \cdot \omega_0. \quad (3.21)$$

Цю потужність можна представити у виді двох складових: механічної потужності $P_{\text{мех}}$ і потужності втрат у роторі $\Delta P_{\text{ел2}}$, причому $P_{\text{мех}} = M \cdot \omega$, а $\Delta P_{\text{ел2}}$ - це втрати в міді ротора і втрати на перемагнічування ротора (втрати в сталі ротора). Через мале значення втрат у сталі ними можна знехтувати і тоді:

$$P_{12} = M\omega_0 = M\omega + \Delta P_{\text{ел2}} \Rightarrow \Delta P_{\text{ел2}} = M(\omega_0 - \omega) = M\omega_0 s. \quad (3.22)$$

З іншого боку,

$$\Delta P_{\text{ел2}} = m(I_2')^2 R_2', \quad (3.23)$$

де m - число фаз обмотки двигуна.

Тоді електромагнітний момент може бути виражений як

$$M_e = \frac{m(I_2')^2 R_2'}{\omega_0 s}. \quad (3.24)$$

Підставивши в цей вираз замість I_2' його значення (3.14), одержимо вираз для механічної характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором $M = f(s)$:

$$M_e = \frac{mU_{1\phi}^2 R_2'}{\omega_0 s \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_k^2 \right]}. \quad (3.25)$$

Залежність $M_e = f(s)$ має максимум, оскільки для $s=0$ і $s \rightarrow \pm\infty$ електромагнітний момент стає дорівнювати нулю. Це очевидно з виразу:

- при $s = 0$

$$M_e = \frac{mU_{1\phi}^2 R_2'}{\omega_0 s \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_k^2 \right]} = \frac{mU_{1\phi}^2 R_2' \cdot s}{\omega_0 \left[(sR_1 + R_2')^2 + s^2 X_k^2 \right]} = \frac{mU_{1\phi}^2 s}{\omega_0 R_2'} = 0; \quad (3.26)$$

- при $s \rightarrow \infty$ електромагнітний момент дорівнює нулю, що очевидно з виразу (3.25).

Максимальне значення електромагнітного моменту називають критичним моментом $M_{кр}$, а відповідне йому ковзання - критичним ковзанням $s_{кр}$.

Визначити значення $s_{кр}$ можна прирівнявши до нуля рівняння для першої похідної моменту за ковзанням:

$$\frac{dM}{ds} = 0$$

Розв'язок цього рівняння дозволяє отримати вираз для критичного ковзання:

$$s_{кр} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}. \quad (3.27)$$

Підставивши вираз для $s_{кр}$ у формулу (3.25) і виконавши відповідні перетворення, одержимо вираз для критичного моменту $M_{кр}$:

$$M_{кр} = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0 \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_k^2} \right)}. \quad (3.28)$$

Знаки « \pm » означають, що максимум моменту має місце, як при $s > 0$ (у двигунному режимі або режимі противмикання), так і при $s < 0$ (у режимі рекуперативного гальмування), причому знак « $+$ » відповідає двигунному режиму або режиму противмикання, а знак « $-$ » - режиму рекуперативного гальмування. Очевидно, що при роботі в генераторному режимі

$$M_{кр} (РТ) > M_{кр} (ДВ \text{ або } ПВ).$$

Графік механічної характеристики $M_e = f(s)$ наведений на рис.

ТЗ.11.

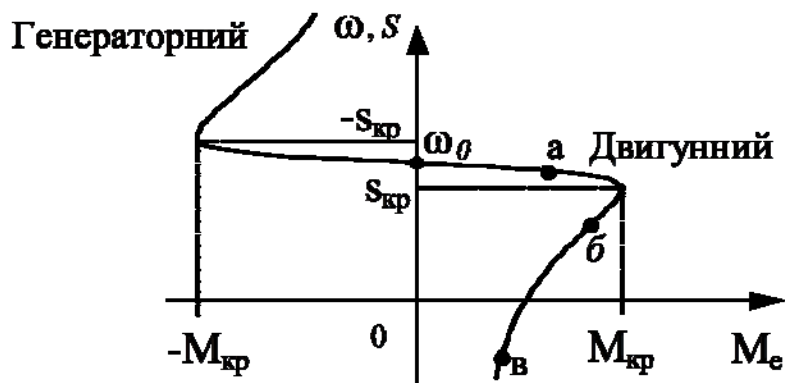


Рисунок ТЗ.11-Механічна характеристика асинхронного двигуна $M_e = f(s)$

Пусковий момент, при $s=1$ (тобто коли $\omega=0$, що відповідає пуску двигуна) дорівнює:

$$M_{\text{пуск}} = \frac{3U_{1\phi}^2 R_2'}{\omega_0 [(R_1 + R_2') + X_k^2]} \quad (3.29)$$

Для наближеного розрахунку механічної характеристики АД використовують залежність, що одержала назва формули Клосса:

$$M = \frac{2M_{кр} (1 + as_{кр})}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} + 2as_{кр}}, \quad (3.30)$$

де $a = \frac{R_1}{R_2'}$.

Оскільки в машинах великої потужності опір R_1 невеликий ($R_1 \ll X_k$) тому,

$$as_{кр} = \frac{R_1}{R_2'} s_{кр} = \frac{R_1}{R_2'} \cdot \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} \ll 1,$$

отже формулу Клосса для потужних АД з фазним ротором можна записати у вигляді:

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}, \quad (3.31)$$

де

$$s_{кр} \approx \pm \frac{R'_2}{X_k}. \quad (3.32)$$

Критичний момент наближено визначається за виразом:

$$M_{кр} = \frac{mU_{1\phi}^2}{2\omega_0 X_k}. \quad (3.33)$$

Основна перевага формули Клосса, порівняно з виразом (3.25) полягає в тому, що розрахунок механічної характеристики за нею можливий на основі паспортних даних двигуна.

Наприклад, для потужних машин

$$s_{кр} = s_n \left(\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1} \right), \quad (3.34)$$

де λ_m - перевантажувальна здатність за моментом.

$$M_{кр} = \lambda_m \cdot M_n. \quad (3.35)$$

При використанні спрощеної формули Клосса досить значна похибка в розрахунках виникає для малих швидкостей двигуна (нижче точки, що відповідає $M_{кр}$), оскільки в цьому випадку струм статора великий і падіння напруги на активного опорі обмотки статора значно вище, ніж при великих швидкостях.

Виконаємо аналіз форми механічної характеристики і вкажемо її характерні точки, скориставшись формулою Клосса:

- для малих значеннях ковзання $s < (0,4 \div 0,35)s_{кр}$, відношенням $s/s_{кр}$ можна знехтувати. У цьому випадку механічна характеристика може бути представлена залежністю:

$$M = \frac{2M_{кр}}{s_{кр}} s, \quad (3.36)$$

тобто є прямою лінією (рис. 3.11 ділянка ω -а). Точка, що відповідає номінальному режиму роботи знаходиться на цій ділянці ($s_n \ll s_{кр}$), яку називають робочою ділянкою механічної характеристики.

- для $s \gg s_{кр}$ можна знехтувати другим доданком у знаменнику формули Клосса ($s_{кр}/s$). На цій ділянці електромагнітний момент M_e змінюється за гіперболічним законом. Цю ділянку називають нестійкою (неробочою) ділянкою механічної характеристики.

- на ділянці, де $s \approx s_{кр}$, відбувається заокруглення характеристики. Для цієї ділянки характеристика суттєво нелінійна, а робота двигуна вкрай нестійка.

Характерними точками залежності $M(\omega)$ є:

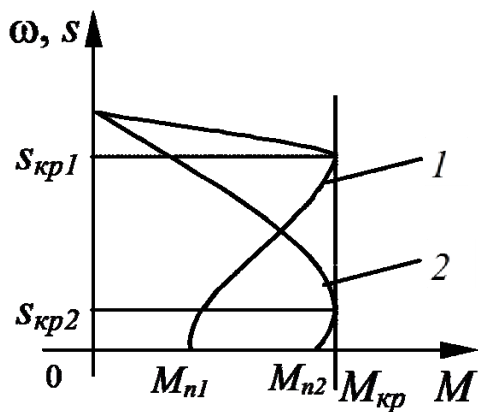


Рисунок Т3.12-Механічні характеристики асинхронного двигуна: 1 - природна; 2 - із додатковим опором (реостатна)

- $s = 0, \omega = \omega_0, M = 0$ -

точка ідеального холостого ходу (значення синхронної швидкості ω_0 залежить тільки від частоти напруги живлення і числа пар полюсів машини (3.2)).

- $s = s_{кр}, M = M_{кр}$ - точка

критичного ковзання. Як впливає з (3.27) критичне ковзання зменшується при зростанні індуктивного опору

обмоток і, навпаки, збільшується з ростом активного опору кола ротора. Це означає, що чим більші значення R_1 і X_k , тим менша робоча ділянка механічної характеристики. У той же час величина $s_{кр}$

не залежить від напруги живлення, тоді як $M_{кр}$ пропорційний квадрату напруги $M \sim U^2$. Така залежність $M_{кр}$ від U несприятлива для перевантажувальної здатності двигуна за моментом (при зниженні напруги на 10-20 % перевантажувальна здатність зменшується на 19-36 %). З іншого боку, критичний момент не залежить від величини активного опору кола ротора. Ця властивість використовується, зокрема, для збільшення пускового моменту АД шляхом введення $R_{2дод}$ у коло ротора (рис. ТЗ.12).

Критичний момент асинхронного двигуна залежить від конструктивних особливостей двигунів. Наприклад, для двигунів серії АК перевантажувальна здатність за моментом складає $\lambda_M = 1.7 \div 2.0$, а для краново-металургійних двигунів $\lambda_M = 2.3 \div 3.0$.

Аналізуючи особливості характеристик АД, слід також відзначити, що пусковий струм - це достатньо великий струм, що дорівнює приблизно $(5-7)I_{ном}$, але при цьому значення пускового моменту $M_{пуск} = (0.8 \div 1.6)M_{ном}$, що значно менше $M_{кр}$. Це зумовлено тим, що електромагнітний момент в асинхронному двигуні створюється не повним струмом ротора, а тільки його активною складовою I_{2a}' , а в момент пуску величина цієї складової мала, а індуктивний опір X_k при пуску значно більший активного, так як частота ЕРС ротора дорівнює частоті мережі. Отже, активна складова струму I_{2a}' при пуску набагато менша реактивної складової I_{2p}' і електромагнітний момент, що пропорційний активній складовій струму, також малий.

ТЗ.2.4. Гальмівні режими асинхронного двигуна з фазним ротором

Асинхронний двигун може працювати у всіх гальмівних режимах: рекуперативного гальмування, гальмування противмиканням,

динамічного гальмування із самозбудженням чи незалежним збудженням.

Режим рекуперативного гальмування

Асинхронний двигун, як і всі електричні машини, має властивість оборотності. Якщо, наприклад, до валу двигуна прикладений момент опору, то АД працює в двигунному режимі і споживає потужність із мережі. За відсутності статичного моменту на валу двигун буде обертатися зі швидкістю, близькою до синхронної, споживаючи при цьому з мережі енергію, необхідну для покриття втрат. Режим рекуперативного гальмування виникає, коли швидкість обертання ротора ω стає більшою, ніж швидкість обертання магнітного поля статора, тобто, якщо $\omega > \omega_0$. Це можливо для активного моменту на валу, дія якого спрямована у бік обертання двигуна, або при переході з більшої швидкості на меншу (наприклад, при переключенні двигуна на більше число пар полюсів або при зменшенні частоти напруги живлення). В кожному з цих випадків двигун працює як генератор і віддає активну енергію в мережу. Цей висновок проілюструємо на прикладі виразу для приведенного струму ротора, представленого в комплексній формі. Для простоти викладень активним опором фази статора R_1 знехтуємо. Вираз для приведенного струму ротора

$$I'_2 = \frac{E'_2 s}{R'_2 + jX'_2 s}. \quad (3.37)$$

Перетворивши його, отримаємо:

$$\dot{I}'_2 = \frac{E'_2 s (R'_2 - jX'_2 s)}{(R'_2 + jX'_2 s)(R'_2 - jX'_2 s)} = \frac{E'_2 R'_2 s}{R'^2_2 + X'^2_2 s^2} - j \frac{E'_2 X'_2 s^2}{R'^2_2 + X'^2_2 s^2}, \quad (3.38)$$

де $\frac{E'_2 R'_2 s}{R'_2 + X'_2 s^2}$ - активна складового струму; $\frac{E'_2 X'_2 s^2}{R'_2 + X'_2 s^2}$ - реактивна складового струму.

З виразу (3.38) випливає, що при переході в генераторний режим, коли ковзання двигуна стає меншим нуля, змінює свій знак тільки активна складового струму i , отже, знак моменту стає негативним, що відповідає гальмівному режиму:

$$P_a = M \cdot \omega < 0, \text{ оскільки } M < 0,$$

Реактивна складова струму зберігає свій знак незалежно від знаку ковзання. Ця обставина вказує на те, що АД як у двигунному, так і в генераторному режимі споживає реактивну енергію з мережі, а це означає, що генераторний режим АД можливий тільки за наявності джерела реактивної потужності, необхідної для створення магнітного поля двигуна.

Механічні характеристики АД в режимі рекуперативного гальмування є продовженням характеристик двигунного режиму і розміщуються в другому квадранті для додатного напрямку обертання, або в четвертому - для від'ємного. Вирази для розрахунку характеристик тотожні виразам для розрахунку характеристик у двигунному режимі:

$$M_r = \frac{m U_\phi^2 R'_2}{\omega_0 s \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_k^2 \right]}, \quad (3.39)$$

або

$$M_r = \frac{2M_{kp} (1 + as_{kp})}{\frac{s}{s_{kp}} + \frac{s_{kp}}{s} + 2as_{kp}}, \quad (3.40)$$

за умови, що $s < 0$.

Критичне ковзання в режимі рекуперативного гальмування:

$$s_{kp} = -\frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}, \quad (3.41)$$

а критичний момент

$$M_{kp} = \frac{mU_{1\phi}^2}{2\omega_0 [R_1 - \sqrt{R_1^2 + X_k^2}]} \quad (3.42)$$

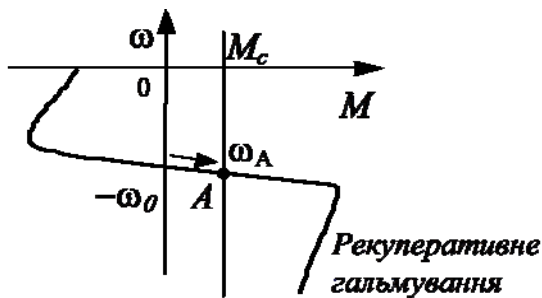
більший критичного моменту в двигунному режимі.

Розглянемо приклади роботи АД в режимі рекуперативного гальмування.

Режим рекуперативного гальмування при спуску вантажів

Нехай до вала двигуна прикладений активний момент навантаження, що діє в напрямку обертання (рис. Т3.13):

За активного моменту на валу M_c ротор двигуна, включений “на спуск”, розганяється до швидкості $\omega_A > \omega_0$. При цьому двигун переходить в генераторний режим, розвиваючи гальмівний момент. Спуск вантажу буде здійснюватися підгальмовуванням, оскільки



$$\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon = \frac{+M - M_c}{J} < 0.$$

Усталеній роботі в режимі рекуперативного гальмування відповідає точка А (вантаж буде опускатися зі швидкістю ω_A). Цей режим знайшов широке застосування в

Рисунок Т3.13 - Режим рекуперативного гальмування АД при спуску вантажу

підйомно-транспортних установках.

Варто мати на увазі, що для забезпечення нормального (стійкого) режиму спуску вантажу необхідно, щоб статичний момент не перевищував критичного моменту M_{kp} АД в генераторному режимі.

В режимі рекуперативного гальмування додатковий опір у коло ротора зазвичай не вводять, оскільки обертання ротора двигуна відбувається з швидкістю, більшою за синхронну.

Рекуперативне гальмування з реактивним моментом на валу

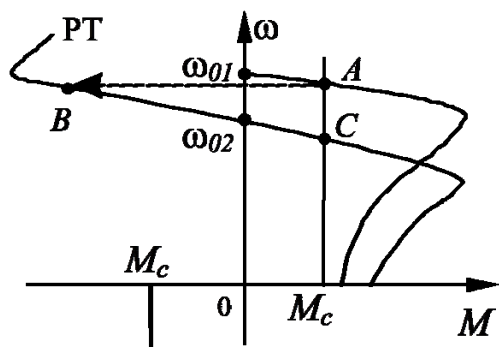


Рисунок ТЗ.14 - Рекуперативне гальмування АД з фазним ротором для реактивного характеру моменту на валу

Нехай на вал двигуна діє реактивний статичний момент. Режим рекуперативного гальмування можливий тільки в системах регульованого ЕП, наприклад, шляхом переключення числа пар полюсів (рис. ТЗ.14).

Як видно з графіка, при роботі АД з реактивним моментом M_c переключення двигуна на більше число пар полюсів призведе до зменшення синхронної швидкості ($\omega_{02} < \omega_{01}$), це означає, що швидкість обертання ротора в момент переключення виявиться вищою за синхронну ($\omega_A > \omega_{02}$), а електромагнітний момент стає гальмівним, а двигун переходить в режим рекуперативного гальмування. Зазначений процес має місце, наприклад, у приводах електротранспорту, металорізальних верстатів та ін. У відношенні енергетичних показників режим рекуперативного гальмування є найбільш ефективним, оскільки супроводжується віддачею активної енергії в мережу.

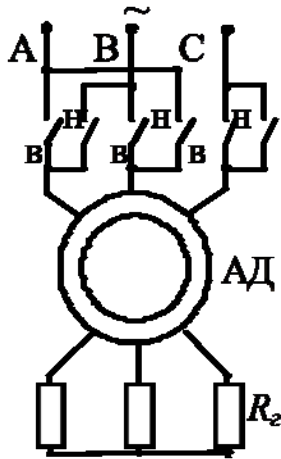


Рисунок Т3.15 – Принципова схема включення АД в режимі гальмування противмиканням зміною чергуванням фаз обмотки статора

Режим гальмування противмиканням

Режим гальмування противмиканням може бути отриманий двома способами: зміною напрямку обертання поля статора (для активного і реактивного моменту на валу); введенням додаткового опору в коло ротора (для активного моменту на валу).

Режим гальмування противмиканням зміною напрямку обертання поля статора реалізується зміною порядку чергування фаз напруги

живлення, як показано на рис. Т3.15.

Ця схема використовується в електроприводах, що працюють як з активним, так і реактивним моментом на валу. Додатково в коло ротора вводять додатковий опір R_r з метою обмеження гальмівного струму й отримання необхідного гальмівного моменту (рис. Т3.16).

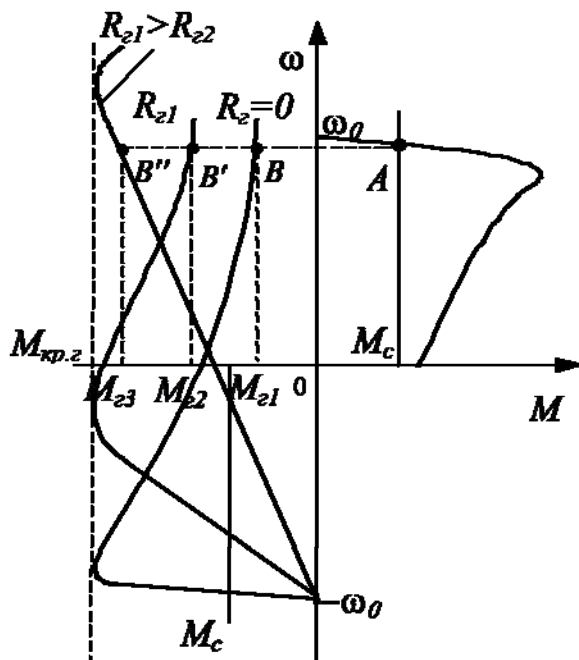


Рисунок Т3.16 - Механічні характеристики АД в режимі гальмування противмиканням для реактивного характеру моменту на валу

Якщо двигун працював у двигунному режимі в точці А, то в залежності від величини гальмівного опору в колі ротора, в режимі проти-вмикання початковий гальмівний момент буде M_{r1} , M_{r2} або M_{r3} . Під дією гальмівного моменту обертання ротора двигуна сповільнюється. Після повної зупинки двигун необхідно відключити від мережі, інакше відбудеться зміна напрямку обертання ротора, і АД буде працювати вже в двигунному режимі (за умови, що пусковий момент більший моменту навантаження).

З точки зору енергетики різні характеристики гальмування противмиканням не рівноцінні. При переході на гальмівну характеристику коли $s > s_{кр}$ (т. В'' на рис.3.16.) гальмівний момент вищий, ніж при переході на характеристику коли $s < s_{кр}$ (т. В и В' на рис. Т3.16.), а гальмівний струм і електричні втрати нижчі.

Режим гальмування противмиканням для активного характеру

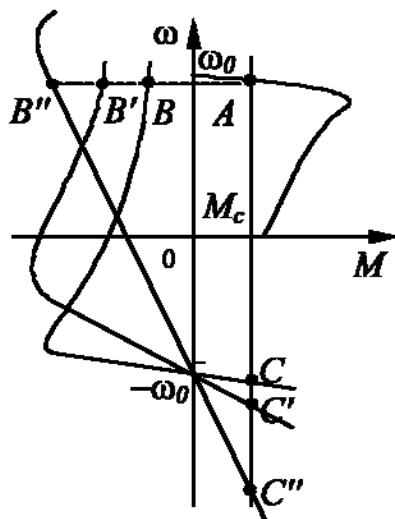


Рисунок Т3.17 - Механічні характеристики в режимі гальмування противмиканням для активного характеру моменту на валу

моменту на валу здійснюється так само як і для реактивного характеру моменту. Проте, якщо в момент зупинки ротора двигун не відключити від мережі, то АД під дією активного моменту перейде в двигунний режим, а потім у режим рекуперативного гальмування (рис. Т3.17., точки С, С', С'').

Розрахунок механічних характеристик здійснюється за виразами, що є справедливим для

двигунного режиму, але за умови, що $s > 1$. При цьому початкове ковзання режиму гальмування визначається таким чином:

$$s_{(пр)} = \frac{\omega_0 + \omega_B}{\omega_0}, \quad (3.43)$$

де $\omega_B = \omega_A$ - швидкість в момент переходу в режим гальмування.

Виразивши швидкість у точці А через ковзання:

$$\omega_A = \frac{\omega_0(1-s_A)}{\omega_0}, \quad (3.44)$$

(де s_A - ковзання в двигунному режимі роботи до переходу в режим гальмування противмиканням), отримуємо вираз для початкового ковзання в режимі гальмування противмиканням:

$$s_{поч(пв)} = \frac{\omega_0 + \omega_A}{\omega_0} = \frac{\omega_0 + \omega_0(1-s_A)}{\omega_0} = 2 - s_A. \quad (3.45)$$

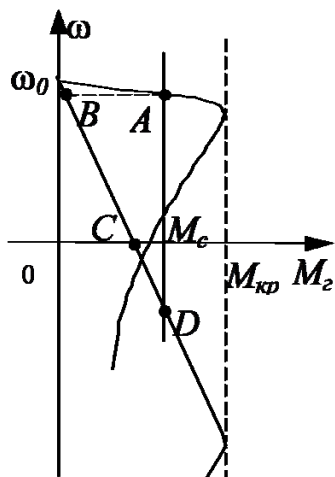


Рисунок Т3.18 -
Механічні характеристики асинхронного двигуна в режимі противмикання для активного навантаження на валу

Режим гальмування противмиканням для активного характеру моменту на валу може бути отриманий, коли момент навантаження обертає ротор двигуна проти напрямку обертання поля статора. Це досягається введенням у коло ротора додаткового опору такої величини, щоб пусковий момент на штучній характеристиці був менший моменту опору (рис. Т3.18). При цьому із точки А на природній характеристиці при введенні додаткового опору відбувається перехід на штучну характеристику в т. В, потім уповільнення до повного зупинки (точка С) і перехід у режим гальмування

протівмиканням під дією активного моменту (точка D).

Розрахунок характеристик у режимі гальмування протівмиканням виконується за приведеними вище виразами. Розглянутий спосіб гальмування протівмиканням знаходить застосування в підйомно-транспортних установках для опускання вантажів за малими швидкостями.

Режим електродинамічного гальмування

Для реалізації режиму динамічного гальмування асинхронний двигун відключають від мережі змінного струму. При цьому за рахунок моменту, що створюється робочою машиною, АД працює як генератор. При відключенні обмотки статора від мережі зберігається лише незначний магнітний потік від залишкового намагнічування сталі статора. ЕРС, що наводиться цим потоком в рухомому роторі, і струм у його обмотках незначні. Взаємодія струму з залишковим потоком статора не дозволяє створити достатній за величиною гальмівний момент. Якщо ж АД перед включенням виявився розмагніченим, то включення його в режимі динамічного гальмування взагалі не дасть ніякого ефекту, оскільки гальмівний момент буде дорівнювати нулю.

Таким чином, для отримання гальмівного моменту при роботі двигуна в режимі динамічного гальмування необхідно забезпечити наявність магнітного потоку в статорі. У залежності від способу збудження асинхронної машини розрізняють два режими динамічного гальмування:

- динамічне гальмування з незалежним збудженням статора постійним струмом (від джерела постійного струму);
- динамічне гальмування із самозбудженням, (як джерело реактивної потужності використовуються конденсаторні батареї).

Розглянемо більш поширений спосіб - динамічне гальмування з незалежним збудженням.

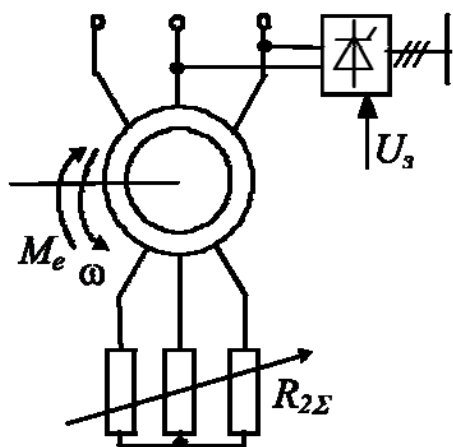


Рис. ТЗ.19. Схема включення АД з фазним ротором у режимі динамічного гальмування з незалежним збудженням

Принципова схема включення АД в режимі електродинамічного гальмування наведена на рис. ТЗ.19.:

При підключенні обмоток статора до джерела постійного струму схеми з'єднання обмоток можуть бути різними (рис. ТЗ.20).

При протіканні постійного струму I_n через обмотки статора виникає нерухоме стале магнітне поле. При обертанні ротора робочою машиною його провідники будуть перетинати силові лінії нерухомого магнітного поля, в результаті чого в обмотці ротора буде індукуватись ЕРС і протікати гальмівний струм (якщо обмотка замкнута на опір).

За законом Ленца, напрямок струму повинен бути таким, щоб його взаємодія з магнітним полем перешкоджала джерелу, що створює ЕРС, у даному випадку - обертанню ротора. При цьому АД є неявно-полюсним синхронним генератором, що працює із змінною частотою.

Оскільки при живленні постійним струмом обмотка статора має лише активний опір, то напруга джерела постійного струму повинна бути значно меншою номінальної напруги живлення асинхронного двигуна, щоб не викликати перегріву обмотки статора. Тому технічна реалізація цього способу гальмування пов'язана із застосуванням

знижувальних трансформаторів для АД невеликої потужності, а для АД великої потужності - окремих генераторів або статичних перетворювачів постійної напруги.

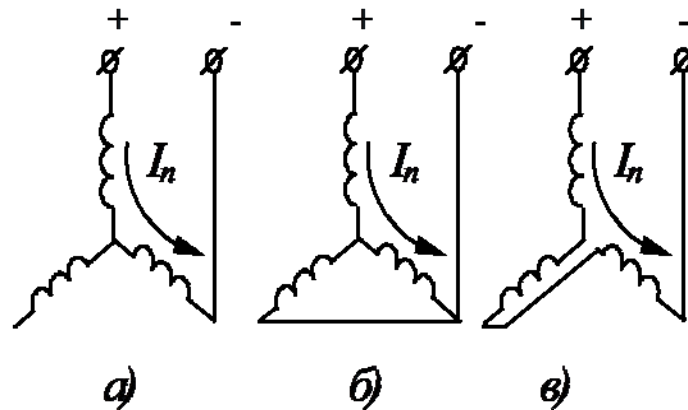


Рисунок ТЗ.20 - Схеми з'єднання обмоток статора в режимі динамічного гальмування

Аналіз роботи АД в режимі динамічного гальмування достатньо простий, якщо припустити, що обмотками статора протікає не постійний струм, а еквівалентний йому змінний. При цьому, в якості умови еквівалентності використовується рівність магніторушійних сил (МРС), що створюється постійним і еквівалентним йому змінним струмом. Амплітуда МРС, що створюється змінним струмом, визначається виразом:

$$F_{\sim} = \frac{3}{\sqrt{2}} I_{\text{екв}} \cdot w_1, \quad (3.46)$$

де w - число витків однієї фази обмотки статора; $I_{\text{екв}}$ - діюче значення еквівалентного постійному струму, що протікає через обмотки статора.

Амплітуда результуючої МРС, що створюється постійним струмом, залежить від схеми вмикання обмоток статора. Наприклад, на рис. ТЗ.21. показана схема з'єднання обмоток і відповідна їй

векторна діаграма.

Модуль МРС, що створюється постійним струмом у цьому випадку

$$F_{-} = \sqrt{3}I_{\pi} \cdot w_1 ,$$

або з врахуванням того, що $F_{\sim} = F_{-}$,

$$F_{-} = \sqrt{3}I_{\pi} w_1 = \frac{3}{\sqrt{2}}I_{\text{екв}} w_1 .$$

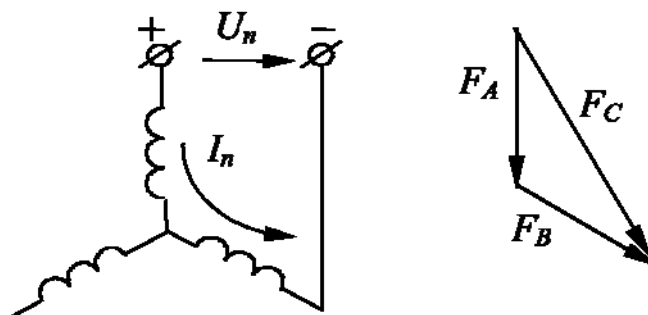


Рисунок Т3.21 - Схема з'єднання обмоток і векторна діаграма МРС АД

Вираз для еквівалентного струму:

$$I_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{2}{3}}I_{\pi} . \quad (3.47)$$

Для схеми включення рис. Т3.20,б) результуюча МРС показана на рис. Т3.22.

Вираз для еквівалентного струму в цьому випадку одержимо з

$$\text{виразу } F_{-} = I_{\pi} \cdot w_1 = \frac{3}{2}I_{\text{екв}} w_1 :$$

$$I_{\text{екв}} = \frac{1}{\sqrt{2}}I_{\pi} . \quad (3.48)$$

Для схеми включення рис. Т3.20, в) векторна діаграма МРС подана на рис. Т3.23.

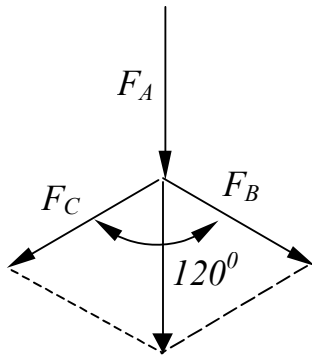


Рисунок Т3.22 - Векторна діаграма МРС АД при живленні обмотки статора за схемою рис. 3.20, б.

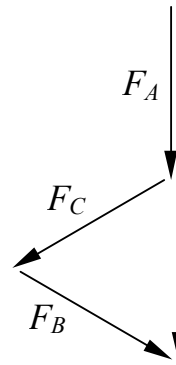


Рисунок Т3.23 - Векторна діаграма МРС АД при живленні обмотки статора за схемою рис. 3.20, в.

Вираз для еквівалентного струму для цього випадку одержимо з врахуванням того, що $F_{-} = 2I_{\pi}w_1$:

$$I_{\text{екв}} = \frac{2\sqrt{2}}{3} I_{\pi}. \quad (3.49)$$

Визначивши величину еквівалентного струму, що протікає в обмотці статора машини, при подальших розрахунках двигун можна вважати таким, що живиться від джерела змінного струму. У відповідності з вищенаведеним, схема заміщення двигуна в режимі динамічного гальмування буде мати вид, приведений на рис. Т3.23.

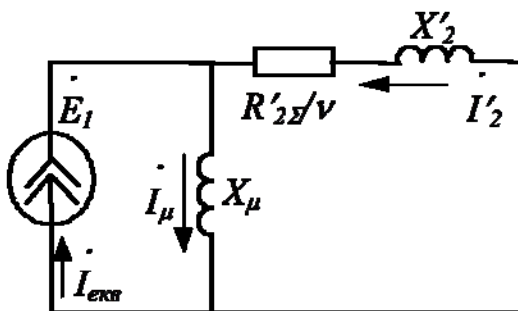


Рисунок Т3.23 - Схема заміщення асинхронного двигуна в режимі динамічного гальмування

В схемі заміщення прийняті такі позначення:
 $R'_{2\Sigma} = R'_2 + R'_{2\text{дод}}$; $v = \omega/\omega_0$
 - ковзання ротора АД в режимі динамічного гальмування.

Для встановлення залежностей, що описують

властивості і характеристики АД, варто врахувати таку особливість режиму динамічного гальмування: в двигунному режимі струм намагнічування і магнітний потік машини залишаються практично незмінними для будь-яких навантажень і швидкостей, це пояснюється тим, що при протіканні струму через обмотку статора виникає змінне магнітне поле, що пронизує також і витки обмотки ротора. За законом Ленца МРС, що наводиться в роторі направлені таким чином, щоб зменшити намагнічуючу дію головного потоку. При цьому зменшення потоку призводить до зменшення ЕРС, що наводиться в статорі та направленої проти прикладеної напруги, завдяки чому зростає струм статора, а потік двигуна практично відновляється. В режимі динамічного гальмування потік двигуна змінюється в широких межах, це пояснюється тим, що зміна за рахунок навантаження або швидкості, МРС ротора розмагнічують машину, у даному випадку не може бути нічим зкомпенсована, оскільки в колі статора протікає постійний струм і відповідно магнітний потік і МРС залишаються незмінними за величиною.

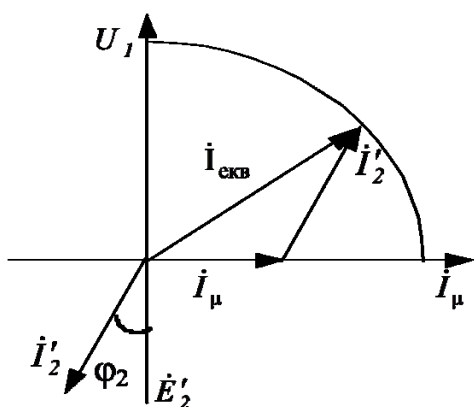


Рисунок Т3.25 - Векторна діаграма струмів для режиму динамічного гальмування

Якщо скористатися векторною діаграмою струмів (рис. Т3.25), то можна показати, що в режимі динамічного гальмування, коли $I_{скв} = const$, а величина ЕРС ротора, реактивний опір і, отже, струм ротора знаходяться в прямій залежності від швидкості обертання, зміна I'_2 призведе до зміни результуючого потоку, а значить і струму $I_μ$.

Так, для нерухомого ротора струм у

його обмотці дорівнює нулю і $I_{\text{екв}} = I_{\text{м}}$ тобто машина буде найбільш намагніченою. З ростом швидкості зростає струм I'_2 і фазовий кут φ_2 , в результаті чого намагнічуючий струм і результуючий потік різко знижуються завдяки розмагнічуванню з боку ротора.

Еквівалентний струм статора і приведений струм ротора пов'язані векторним співвідношенням:

$$\dot{I}_{\text{екв}} = \dot{I}_{\mu} + \dot{I}'_2. \quad (3.50)$$

Виразимо модуль $I_{\text{екв}}$, виходячи з векторної діаграми:

$$I_{\text{екв}}^2 = (I_{\mu} + I'_2 \cdot \sin \varphi_2)^2 + I_2'^2 \cdot \cos^2 \varphi_2. \quad (3.51)$$

В свою чергу, струм I_{μ} можна знайти зі схеми заміщення:

$$I_{\mu} = \frac{E'_2}{X_{\mu}} = \frac{I'_2 \cdot \sqrt{\left(\frac{R'_2}{v}\right)^2 + (X'_2)^2}}{X_{\mu}}. \quad (3.52)$$

Підставивши в (3.51) вираз (3.52) після перетворень отримаємо такий вираз для приведенного струму ротора:

$$I'_2 = \frac{I_{\text{екв}} \cdot X_{\mu}}{\sqrt{\left(\frac{R'_{2\Sigma}}{v}\right)^2 + (X_{\mu} + X'_2)^2}}. \quad (3.53)$$

Вираз (3.53) є швидкісною характеристикою АД в режимі електродинамічного гальмування.

Використовуючи рівняння балансу потужностей, можна записати рівняння механічної характеристики:

$$M_{\text{е(ДГ)}} = \frac{m I_2' \cdot \frac{R'_{2\Sigma}}{v}}{\omega_0} = \frac{m I_{\text{екв}}^2 X_{\mu}^2 \cdot \frac{R'_{2\Sigma}}{v}}{\omega_0 \left[\frac{R'_{2\Sigma}}{v} + (X_{\mu} + X'_2)^2 \right]}. \quad (3.54)$$

Критичне ковзання в режимі електродинамічного гальмування:

$$S_{\text{кр(дг)}} = v_{\text{кр}} = \frac{R'_{2\Sigma}}{X_{\mu} + X'_2} \quad (3.55)$$

Слід відзначити, що критичне ковзання в режимі динамічного гальмування набагато менше, ніж в двигунному режимі, оскільки $X_{\mu} \gg X_1$.

Критичний момент дорівнює

$$M_{\text{кр}} = \frac{mI_{\text{екв}}^2 \cdot X_{\mu}^2}{2\omega_0[X_{\mu} + X'_2]} \quad (3.56)$$

Рівняння механічної характеристики АД в режимі електродинамічного гальмування за формулою Клосса:

$$M = \frac{2M_{\text{кр}}}{\frac{v}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{v}} \quad (3.57)$$

Вид механічних характеристик АД в режимі динамічного гальмування наведений на рис. Т3.26.

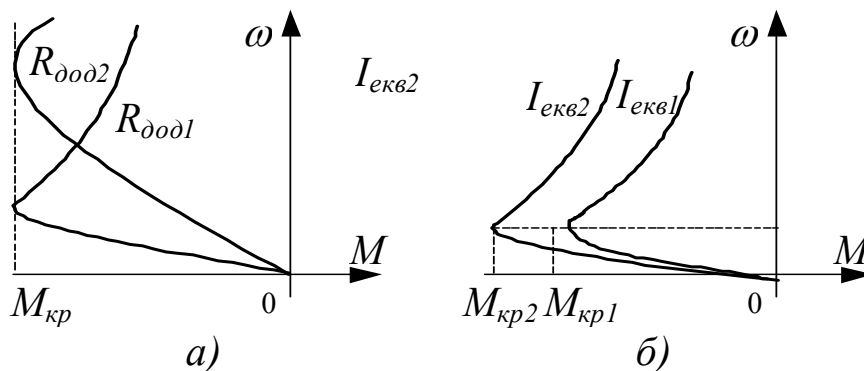


Рисунок Т3.26 - Механічні характеристики асинхронного двигуна в режимі динамічного гальмування: а) для різних значень додаткового опору в колі ротора; б) для різних значень струму збудження

Аналіз механічних характеристик в режимі динамічного гальмування дозволяє зробити такі висновки.

В першому наближенні механічна характеристика асинхронного двигуна в режимі динамічного гальмування описується рівнянням, аналогічним рівнянню в двигунному режимі, але для інших значень критичного моменту і критичного ковзання.

Критичне ковзання на природній характеристиці в режимі динамічного гальмування значно менше, ніж у двигунному режимі.

Із збільшенням струму збудження зростає ступінь насичення машини, в результаті чого індуктивний опір контуру намагнічування зменшується і відповідно збільшується критичне ковзання.

Критичний момент не залежить від опору роторного кола і пропорційний квадрату струму збудження ($I_{\text{ЭКВ}}$).

ТЗ.2.5. Способи регулювання швидкості електроприводів з асинхронними двигунами з фазним ротором

Існують різні способи регулювання швидкості АД. Проте, слід зазначити, що кожний із способів дозволяє одержати штучні характеристики, що мають як значні переваги, так і деякі недоліки, що характеризують електромеханічні властивості двигуна.

Найбільше поширеними з всіх існуючих способів регулювання швидкості є:

- введення в коло ротора додаткового активного опору (реостатний спосіб регулювання швидкості);
- введення в коло статора або ротора додаткового індуктивного опору (реакторний спосіб регулювання швидкості);
- переключення числа пар полюсів;
- зміна напруги живлення на статорі АД (регулювання напруги живлення);

- зміна частоти напруги живлення АД (частотне регулювання);
- введення в коло ротора додаткової ЕРС (регулювання швидкості в каскадних схемах).

Реостатний спосіб регулювання швидкості

Цей спосіб можна застосувати тільки для АД з фазним ротором, конструктивні особливості яких дають можливість вводити в коло ротора додаткові опори.

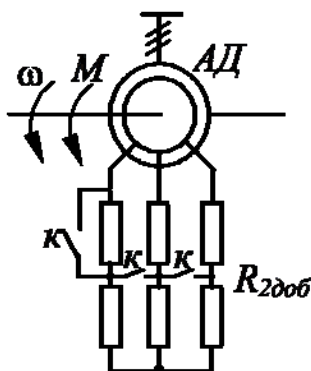


Рисунок Т3.27 - Схема включення додаткових опорів у коло ротора АД при регулюванні швидкості обертання реостатним способом.

Схема включення АД для реостатного способу регулювання швидкості обертання наведена на рис. Т3.27.

Щоб дослідження штучних характеристик і їх властивостей, запишемо рівняння балансу потужності в колі ротора і вирішимо його відносно ковзання:

$$M_e \omega_0 s = m I_2'^2 R'_{2\Sigma}, \quad (3.58)$$

$$\text{де } R'_{2\Sigma} = R'_2 + R'_{2\text{доб}}.$$

Звідки

$$s = \frac{m I_2'^2 R'_{2\Sigma}}{M_e \omega_0}. \quad (3.59)$$

З виразу (3.59) очевидно, що ковзання s пропорційне опору роторного кола. Тому збільшення сумарного опору коло ротора $R'_{2\Sigma}$ при введенні додаткового опору $R_{2\text{доб}}$ для одного і того ж навантаження призведе до зниження швидкості обертання двигуна.

Синхронна швидкість двигуна для штучних характеристиках

$$\omega_{0,ш} = \frac{2\pi f_c}{p} \quad (3.60)$$

залишається незмінною, оскільки не залежить від опору коло ротора $R'_{2\Sigma}$. Отже, графіки усіх штучних (реостатних) характеристик виходять з однієї точки.

Величина критичного ковзання

$$s_{кр.ш.} = \pm \frac{R'_{2\Sigma}}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} \quad (3.61)$$

також зростає із збільшенням $R'_{2\Sigma}$.

Критичний момент залишається незмінним:

$$M_{кр.ш.} = \frac{mU_{1\Phi}^2}{2\omega_0[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_K^2}]}, \quad (3.62)$$

а пусковий момент із збільшенням $R'_{2\Sigma}$ зростає:

$$M_{п.ш.} = \frac{mU_{1\Phi}^2 R'_{2\Sigma}}{\omega_0[(R_1 + R'_{2\Sigma})^2 + X_K^2]} \quad (3.63)$$

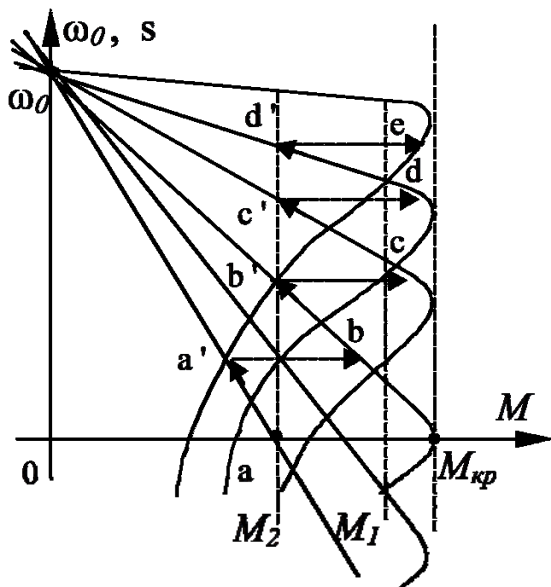


Рисунок Т3.28 - Регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна введенням додаткового активного опору в коло ротора

Ці висновки дозволяють зобразити множину механічних характеристик для реостатного способу регулювання швидкості (рис. Т3.28).

Аналізуючи реостатні механічні характеристики, можна зробити такі висновки:

- при введенні додаткового опору в коло ротора регулювання швидкості АД в двигунному

- режимі можливе тільки вниз від синхронної (в генераторному режимі введення $R_{2\text{дод}}$, навпаки, призведе до зростання швидкості);
- механічні характеристики більш м'які;
 - критичний момент однаковий для всіх характеристик ($M_{\text{кр}} = \text{const}$);
 - із збільшенням додаткового опору пропорційно збільшується робоче і критичне ковзання;
 - метод простий у відношенні його технічної реалізації;
 - межі регулювання швидкості залежать від ступені завантаження двигуна, звужуються із зменшенням навантаження.

Недоліками цього способу є:

- зниження жорсткості характеристики; збільшення електричних втрат у колі ротора;
- можливість здійснення тільки ступінчатого регулювання.

Ці положення зумовлюють застосування цього способу в електроприводах, не призначених для тривалого режиму роботи з усталеними швидкостями.

У основному цей спосіб використовується для реостатного запуску АД середньої і великої потужності для зниження пускових струмів (з одночасним збільшенням пускового моменту). Таким чином виключається “початковий удар” в робочій машині при її пуску.

При запуску двигуна і регулюванні швидкості за допомогою реостатів у роторному колі необхідно передбачити міри, що виключають вихід характеристики двигуна при переключенні резисторів на нестійку частину. Тому необхідно контролювати струм двигуна, а також його швидкість, це реалізується шляхом створення замкнутої системи керування у функції струму з коригуванням за швидкістю або за часом.

Регулювання швидкості обертання зміною індуктивного опору

Введення в коло статора реакторів із підмагнічуванням

(дроселів насичення).

Цей спосіб забезпечує плавне регулювання швидкості АД в широких межах. Як додаткові регульовані індуктивні опори використовують реактори з підмагнічуванням. При зміні струму в обмотці керування (I_k) змінюється індуктивний опір реактора. При цьому найбільше значення індуктивного опору реактора відповідає струму керування $I_k = 0$ і знижується при зростанні I_k .

Схема включення двигуна наведена на рис. Т3.29.

Електромагнітний момент АД:

$$M_{\text{с.ш.}} = \frac{mU_{1\phi}^2 R_2' s}{\omega_0 [R_2'^2 + s^2 (X_{1\Sigma} + X_2')^2]}, \quad (3.64)$$

де $X_1 = X_1, X_{1\text{дод}}$ – сумарний опір кола статора.

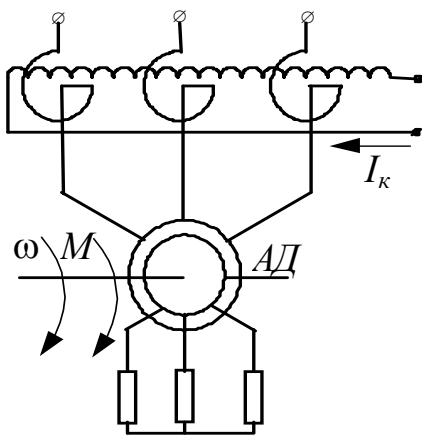


Рисунок Т3.29 - Регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна зміною індуктивного опору в колі статора

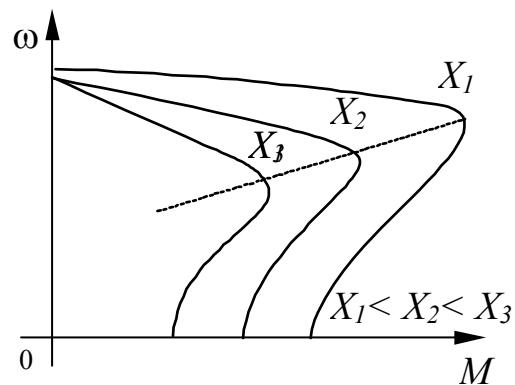


Рисунок 3.30 - Механічні характеристики асинхронного двигуна при введенні додаткового індуктивного опору в коло статора

Для робочої частини характеристики, коли ковзання мале

$$R'_2 \gg s(X_{1\Sigma} + X'_2),$$

електромагнітний момент

$$M_{\text{е.ш.}} \approx \frac{mU_{1\Phi}^2 \cdot s}{\omega_0 R'_2}. \quad (3.65)$$

Очевидно, що при зниженні напруги швидкість обертання двигуна зменшується. Відповідно зменшуються критичний і пусковий моменти, а характеристики мають вид, згідно рис. ТЗ.30.

Введення індуктивного опору в коло ротора

Двигун включають за схемою (рис. ТЗ.31). Регулювання швидкості здійснюють шляхом зміни сумарного індуктивного опору в колі ротора. Окрім того, як впливає з виразу для електромагнітного і критичного моментів двигуна збільшення індуктивного опору в роторному колі призводить до зменшення критичного ковзання, критичного і пускового моментів, що дозволяє підвищити жорсткість механічних характеристик (рис. ТЗ.32, а).

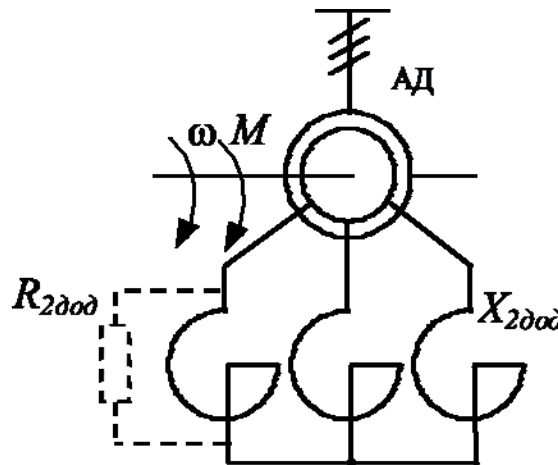


Рисунок ТЗ.31-Регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна введенням додаткового індуктивного опору в коло ротора

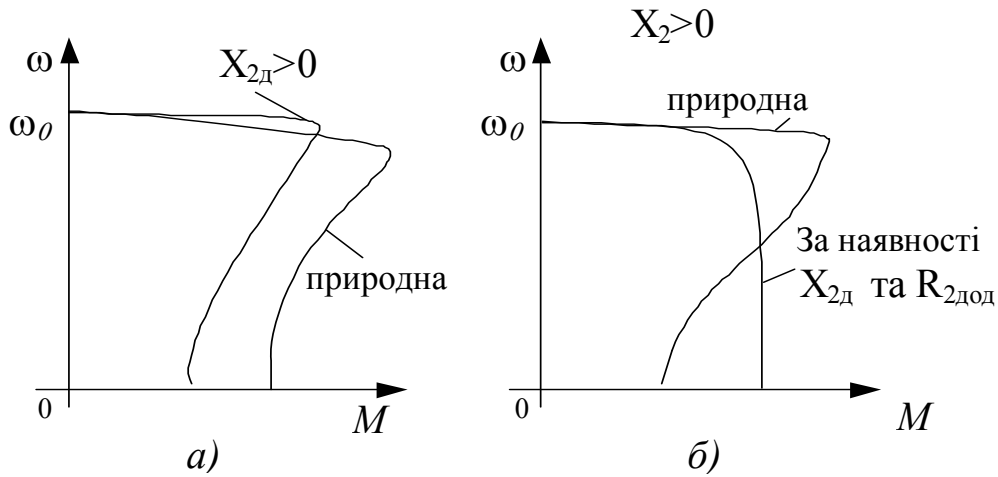


Рисунок Т3.32-Характеристики АД при введенні в коло ротора активно-індуктивного опору: а) в схемі з індуктивним додатковим опором; б) в схемі з індуктивно-активним опором

$$M_e = \frac{mU_{1\Phi}^2 \frac{R'_2}{s}}{\omega_0 \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_k^2 \right]} = \frac{mU_{1\Phi}^2 R'_2}{\omega_0 s \left[(R_1 + R'_2)^2 + X_k^2 s^2 \right]}; \quad (3.65)$$

$$M_{кр} = \frac{mU_{1\Phi}^2}{2\omega_0 X_k}; \quad s_k = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}, \quad (3.66)$$

де $X_k = X_1 + X'_2 + X'_p$,

Якщо паралельно з додатковим індуктивним опором в колі ротора включити активний опір, то при запуску струм ротора буде протікати, в основному, через активний опір $R_{2\text{дод}}$, що шунтує індуктивний опір $X_{2\text{дод}}$, а із збільшенням швидкості (тобто із зменшенням сумарного індуктивного опору), практично весь струм замикається через індуктивний опір, шунтуючи тим самим $R_{2\text{дод}}$. Завдяки такому перерозподілу струму між активним і індуктивним опором характеристика АД має вид екскаваторної (рис. 3.32, б): перша ділянка - характеристика жорстка (до значень $I_2 \approx I_{2H}$), друга ділянка - стопорна (при струмах $I_2 > I_{2H}$):

Введення в коло ротора індуктивно-ємнісних опорів

Схема включення в коло ротора асинхронного двигуна ємності послідовно з додатковим індуктивним опором показаний на рис. Т3.33.

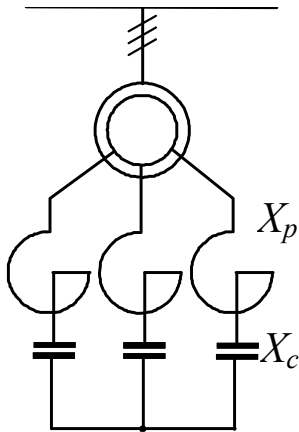


Рисунок Т3.33-Регулювання швидкості АД введенням у коло ротора індуктивно-ємнісного опору

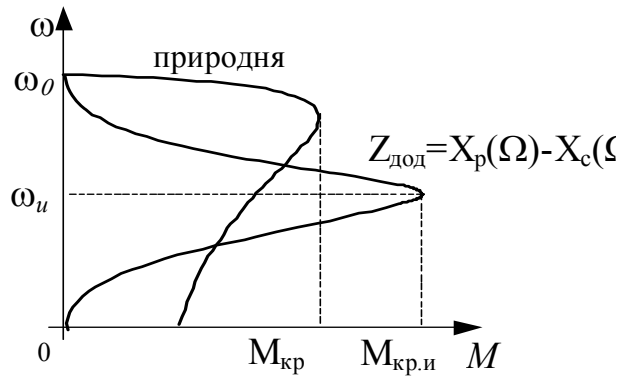


Рисунок Т3.33 - Механічна характеристика АД при введенні в коло ротора індуктивно-ємнісного опору

Індуктивний опір реактора можна представити таким чином:

$$X_p = \Omega \cdot s \cdot L_p, \tag{3.67}$$

де Ω - колова частота в колі ротора, що залежить від ковзання:

$$\Omega = 2\pi s f_2; \quad f_2 = f_1 \cdot s.$$

Відповідно, для ємнісного опору

$$X_c = \frac{1}{\Omega s C}. \tag{3.68}$$

За рівності індуктивного опору ємнісному $X_p = X_c$ в такому колі можливий резонанс напруг, оскільки $\Omega s L = \frac{1}{\Omega s C}$, коли при ковзання дорівнює:

$$s_{кр} = \sqrt{\frac{1}{\Omega^2 LC}}. \quad (3.69)$$

Струм ротора має чисто активний характер, і момент при цьому стає максимальним.

Вид механічної характеристики асинхронного двигуна для розглянутої схеми наведений на рис. ТЗ.33.

В робочій зоні характеристика АД стає подібною характеристиці двигуна постійного струму з послідовним збудженням, а перевантажувальна здатність двигуна при роботі з ковзаннями, близькими до критичного, значно зростає.

Регулювання швидкості переключенням числа пар полюсів

Між синхронною швидкістю і числом пар полюсів АД існує відома залежність

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}.$$

Отже, змінюючи число пар полюсів, можна змінити і синхронну швидкість. Збільшення числа пар полюсів призводить до зниження синхронної швидкості і навпаки. Застосовують цей спосіб, в основному, тільки для короткозамкнених АД, коли достатньо змінити тільки число пар полюсів обмотки на статорі, а ротор же придатний для будь-якого числа пар полюсів. Один із варіантів зміни числа пар полюсів - це укладання на статорі АД декількох обмоток з різним числом пар полюсів. Змінювати швидкість у цьому випадку можна шляхом включення тієї чи іншої обмотки. Проте, цей спосіб значно збільшує габарити двигуна, ускладнює його конструкцію, підвищує вартість. Інший спосіб зміни кількості пар полюсів - це розділення

кожної фазної обмотки на частини і відповідне переключення її. Зараз промисловість випускає спеціальні серії багато-швидкісних асинхронних двигунів, що мають 2, 3 або 4 швидкості обертання.

Щоб встановити вид характеристик, скористаємося до виразом максимального моменту:

$$M_{кр} \approx \frac{mU_{1\Phi}^2}{2\omega_0 X_K},$$

із якого випливає, що $M_{кр}$ обернено пропорційний $X_K = X_1 + X_2'$.

В свою чергу опір X_1 залежить від числа витків обмотки статора, що є різною для різних обмоток або частин однієї обмотки. Опір X_2' також залежить від числа витків обмотки статора, оскільки до формули для його обчислення входить коефіцієнт трансформації. Таким чином, при збільшенні числа пар полюсів механічна характеристика АД буде мати такий же вид, як і для основного числа пар полюсів, але при цьому максимальний момент і синхронна швидкість змінюються в таким чином:

- із збільшенням числа пар полюсів X_K зменшується, критичний момент $M_{кр}$ зростає, ω_0 знижується;
- із зменшенням числа пар полюсів X_K зростає, критичний момент $M_{кр}$ знижується, ω_0 зростає.

Механічні характеристики для аналізованого способу наведені на рис. ТЗ.35.

Щоб підтримувати $M_{кр} = \text{const}$, необхідно використовувати замкнуті системи ЕП, що дозволяють одночасно з числом пар полюсів змінювати рівень напруги на статорі двигуна.

Переваги аналізованого способу регулювання:

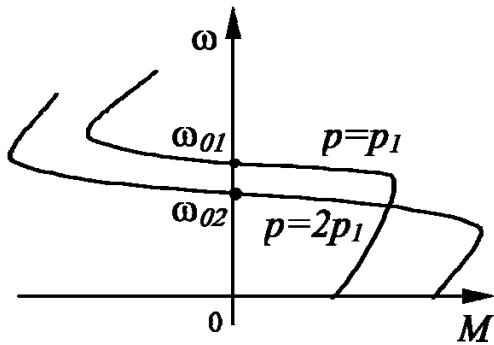


Рисунок Т3.35 - Механічні характеристики АД при зміні числа пар полюсів

- регулювання економічне, не зв'язано з суттєвими втратами енергії (хоча при збільшенні числа пар полюсів дещо збільшуються електричні і магнітні втрати);
- штучні механічні характеристики мають таку ж жорсткість, як і природна;
- спосіб простий у реалізації.

Недоліки:

- можливість тільки ступінчатого регулювання швидкості;
- можливість одержання обмеженого числа характеристик;
- величина критичного моменту залежить від схеми включення;
- із збільшенням числа характеристик число виводів обмотки також збільшується, що призводить до ускладнення комутаційного пристрою.

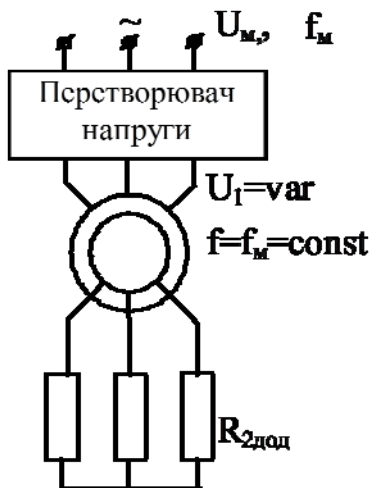


Рисунок Т3.36 - Схема включення АД при регулюванні швидкості обертання зміною напруги на статорі

Регулювання швидкості зміною напруги на статорі

Одним із можливих способів регулювання швидкості АД є зміна напруги на статорі двигуна при незмінній частоті, що дорівнює частоті напруги мережі f_m . Схема реалізації такого способу представлена на рис. Т3.36.

Між виводами мережі живлення і статора асинхронного двигуна включений перетворювач

напруги (ПН), що забезпечує зміну величини підведеної до АД напруги.

Вид механічних характеристик, що отримані цим способом, можна встановити виходячи з таких положень:

- синхронна швидкість $\omega_0 = \frac{2\pi f_m}{p}$ - залишається незмінною;

- критичний момент $M_{кр} \approx \frac{mU_{1\phi}^2}{2\omega_0 X_K}$ - для ненасиченого двигуна

змінюється пропорційно квадрату напруги (U^2);

- критичне ковзання $s_{кр} \approx \frac{R'_2}{X_K}$ - залишається незмінним.

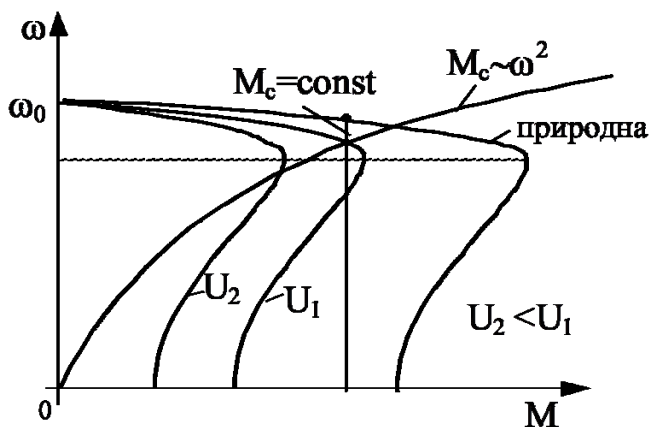


Рисунок Т3.37. Механічні характеристики асинхронного двигуна при зміні напруги на статорі

Механічні

характеристики мають вид наведений на рис. Т3.37.

З графіку видно, що штучні характеристики мало придатні для регулювання швидкості, оскільки із зменшенням напруги, різко

зменшується критичний момент і знижується перевантажувальна здатність АД. Діапазон регулювання швидкості дуже малий, оскільки регулювання здійснюється вниз від основної швидкості в межах $10 \div 20\%$. Він дещо розширюється у випадку вентиляторного навантаження на валу АД. З цих причин в розімкнутих системах аналізований спосіб можна використовувати тільки для регулювання моменту АД і його струму, що також пропорційний напрузі ($I'_2 \sim U_1$).

Для регулювання швидкості, як правило, використовують замкнуті системи зі зворотним зв'язком за швидкістю.

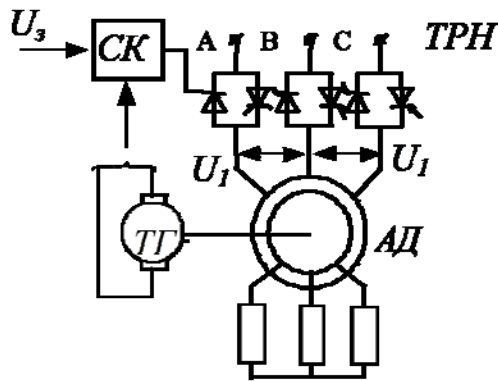


Рисунок Т4.38 - Регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна в замкнутій системі ТРН-АД

найпоширеніші тиристорні чи транзисторні регулятори напруги - ТРН).

Схема приводу в замкнутій системі регулювання швидкості з застосуванням ТРН має вид (рис. Т3.38).

Напруга на статорі асинхронного двигуна регулюється шляхом зміни кута керування тиристорів.

Вид механічних характеристик асинхронного двигуна в системі ТРН - АД показаний на рис. Т3.39.

З характеристик видно, що регулятор забезпечує зміну напруги при коливаннях навантаження.

Припустимо, що двигун працював у точці 1 на характеристиці, що відповідає куту керування α_{\max} . При зростанні навантаження на валу відбудеться деяке зменшення швидкості, при цьому сигнал на систему керування ТРН, що дорівнює $U_k = U_3 - U_{z3}$ збільшиться. Внаслідок цього кут керування α зменшиться, напруга на статорі зросте і зміна швидкості буде компенсовано за рахунок збільшення моменту двигуна.

Для технічної реалізації цього способу регулювання як регулятори напруги, що здатні автоматично підтримувати необхідну напругу при роботі з малими швидкостями використовуються різноманітні пристрої, що включаються в коло статора (автотрансформатори, дроселі насичення або

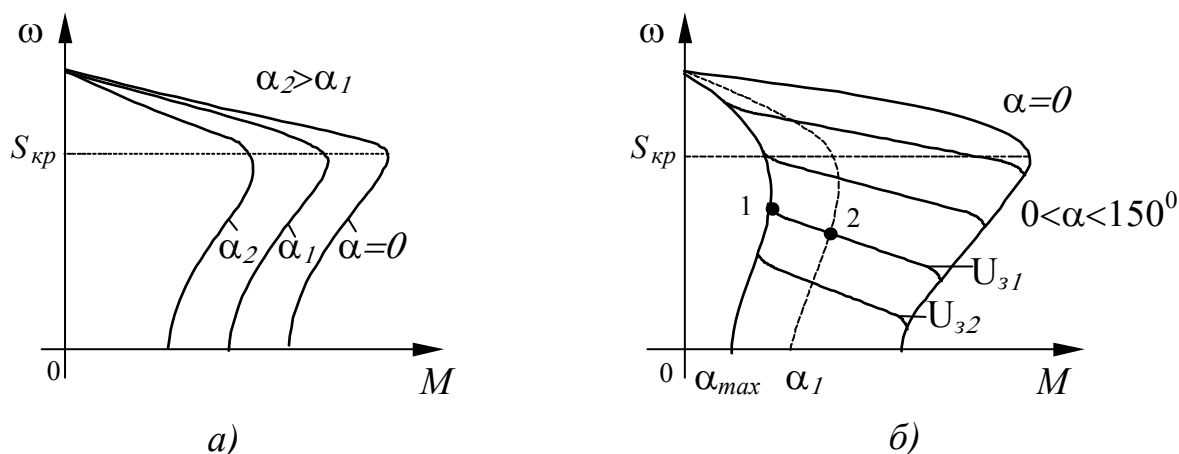


Рисунок Т3.39-Механічні характеристики асинхронного двигуна в системі ТРН-АД: а) у розімкнутій системі; б) у замкнутій системі

Переваги способу:

- простота і надійність;
- можливість плавного регулювання;
- широкий діапазон регулювання швидкості і моменту.

Основним недоліком є невисокий ККД за рахунок значних втрат енергії ковзання ($\Delta P_{ел} \sim s$). Тому доводиться або завищувати потужність АД, або використовувати спеціальні двигуни, розраховані на підвищене ковзання.

Регулювання швидкості зміною частоти напруги живлення

Цей спосіб забезпечує найкращі показники в порівнянні з іншими способами і дозволяє використовувати навіть найбільш простий тип асинхронного двигуна - із короткозамкненим ротором.

Можливість регулювання швидкості АД зміною частоти зумовлена залежністю величини синхронної швидкості від частоти напруги живлення двигуна:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$$

У загальному випадку швидкість двигуна пропорційна частоті f_1 напруги, що прикладена до статора:

$$\omega = \omega_0(1-s) = \frac{2\pi f_1}{p}(1-s). \quad (3.70)$$

Однак зміна тільки частоти напруги живлення негативно впливає на механічні характеристики двигуна. Оскільки індуктивний опір обмоток

$$X_k = 2\pi f_1 L_k, \quad (3.71)$$

залежить від частоти, то нескладно бачити, що максимальний момент двигуна

$$M_{кр} \cong \frac{mU_{1\Phi}^2}{2\omega_0 X_k} \approx \frac{mU_{1\Phi}^2 \cdot p}{2 \cdot 2\pi f_1 2\pi f_1 L_k} = A \frac{U_1^2}{f_1^2}, \quad (3.72)$$

де $A = \frac{mp}{8\pi^2 L_k}$,

обернено пропорційний квадрату частоти, тому при зменшенні частоти він зростає і, навпаки, із збільшенням частоти - зменшується, що призводить до зниження перевантажувальної здатності двигуна. Окрім того, зменшення частоти f_1 призводить до зменшення індуктивного опору намагнічуючого контуру:

$$X_\mu = 2\pi f_1 L_\mu,$$

отже струм намагнічування

$$I_\mu \approx \frac{U_c}{X_\mu} = \frac{U_c}{2\pi f_1 L_\mu}, \quad (3.73)$$

із зменшенням частоти зростає, і відповідно збільшується магнітний потік машини Φ . Це призведе, по-перше, до насичення сталі, що

негативно позначається на її магнітних властивостях, а по-друге, у зв'язку з ростом I_{\square} індуктивність контуру намагнічування (рис. 3.7) зменшується, що веде до зменшення індуктивного опору $X_{\mu} = 2\pi f_1 L_{\mu}$, а отже до зростання струму намагнічування I_M . Таким чином, при зниженні частоти виникає загроза підвищеного нагрівання статорної обмотки.

При $f_1 > f_{ном}$ магнітний потік двигуна буде зменшуватися, а це означає, що для номінального навантаженні на валу

$$M_c = M_H = k\Phi \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2, \quad (3.74)$$

струм у роторі і статорі перевищить номінальне значення, що викличе перегрів обмоток.

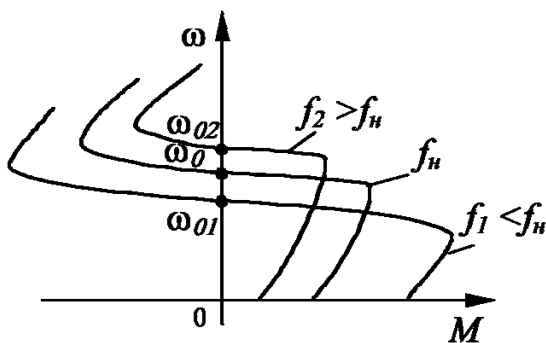


Рисунок Т3.40 - Механічні характеристики асинхронного двигуна при зміні частоти напруги живлення

Характеристики АД при зміні частоти напруги живлення наведені на рис. Т3.40.

Жорсткість механічних характеристик для робочої ділянки залишається незмінною. Зміна критичного моменту спостерігається тільки в області частот порядку 5-7 Гц .

Розглянуті особливості регулювання швидкості асинхронного двигуна зміною частоти напруги живлення дозволяють зробити такий висновок: для одержання нормальних режимів роботи двигуна, що забезпечують його повне використання, необхідно одночасно зі зміною частоти змінювати й амплітуду напруги живлення.

Найкраще використання АД досягається при регулюванні напруги у функції частоти і навантаження. В загальному виді

залежність між цими параметрами, що називається законом частотного регулювання, встановлюється, виходячи з технологічних вимог (наприклад, з метою підтримки сталості магнітного потоку машини, або постійності перевантажувальної здатності і т.п.):

$$\frac{U^2}{f^{2+\alpha}} = \text{const}. \quad (3.75)$$

Зокрема, для виконання умови $\Phi = \text{const}$, необхідно щоб $I_\mu = \text{const}$, тобто

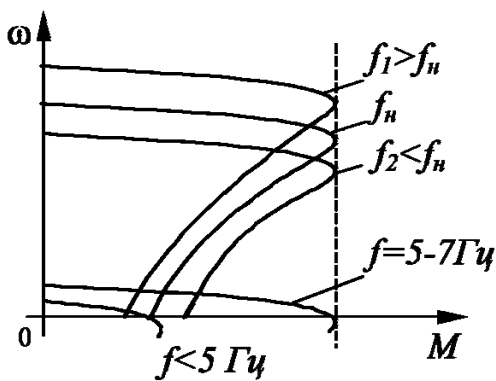


Рисунок Т3.41 - Механічні характеристики асинхронного двигуна для закону частотного регулювання

$$\frac{U}{f} = \text{const}$$

$$M_{\text{кр}} = \frac{U_{1\Phi}^2}{2\omega_0 X_k} \approx A \frac{U_1^2}{f_1^2} = \text{const}.$$

Оскільки тут не враховується активний опір статора, то при $f < 5-7$ Гц формула дає суттєву похибку в сторону завищення значення критичного моменту.

На основі вищесказаного можна зробити такі висновки.

$$\frac{U_{1\Phi}}{X_\mu} = \frac{U_{1\Phi}}{2\pi f L_\mu} = \text{const},$$

або

$$\frac{U}{f} = \text{const}. \quad (3.76)$$

Механічні характеристики АД для закону частотного регулювання (3.76) будуть мати вид, наведений на рис. Т3.41.

Максимальний момент двигуна для будь-якої характеристики в цьому випадку залишається незмінним:

Зміна частоти джерела живлення дозволяє регулювати швидкість АД як вище, так і нижче синхронної. Верхня межа регулювання пов'язана із конструктивними особливостями АД і дорівнює 1,5-2,0 $\omega_{\text{ном}}$. З збільшенням частоти зростають втрати в сталі.

Регулювання швидкості вниз від основної можливе в діапазоні 1:15-20 (нижня межа визначається складністю реалізації джерела живлення з низькою частотою).

У області частот, близьких до $f_{\text{ном}}$, характеристики практично паралельні, однак на малих частотах ($f \leq 5-7$ Гц) ця залежність порушується.

Технічна реалізація частотного регулювання швидкості АД можлива при використанні електромашинних перетворювачів частоти (наприклад, СГ, що працюють із змінною частотою обертання) або статичних вентильних перетворювачів частоти. Останні зараз набули найбільш широкого розвитку і застосування в промисловості.

Регулювання швидкості введенням у коло ротора додаткової ЕРС

Один із способів регулювання швидкості обертання АД ґрунтується на введенні в ротор додаткової ЕРС тієї ж частоти, що і ЕРС ротора асинхронної машини. Тому цей спосіб можна застосувати тільки для АД з фазним ротором.

Щоб зрозуміти суть цього способу, розглянемо процес перетворення енергії в асинхронному двигуні з фазним ротором (рис. ТЗ.42).

Як очевидно з рисунка, енергія ковзання в звичайній схемі включення асинхронного двигуна витрачається на втрати в обмотці ротора:

$$\Delta P_{\text{ел}} = P_s = P_m - P_b = M\omega_0 - M\omega = M\omega_0 s. \quad (3.77)$$

Струм в колі ротора може бути визначений відповідно до виразу

$$I_2 = \frac{E_2 s}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_K^2}}. \quad (3.78)$$

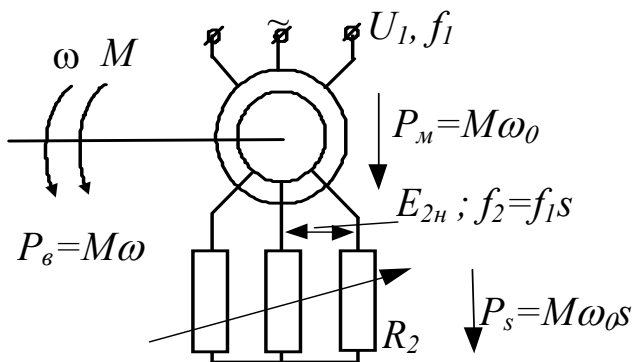


Рисунок Т3.42-Перетворення енергії в асинхронному двигуні

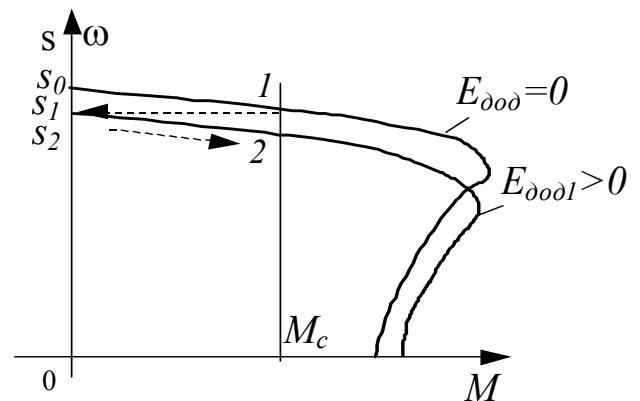


Рисунок Т3.43 - Механічні характеристики асинхронного двигуна при введенні додаткової ЕРС у коло ротора

Якщо, не змінюючи моменту навантаження на валу двигуна (тобто $I_2 = \text{const}$), ввести в ротор зустрічну ЕРС тієї ж частоти, то рівняння струму відповідно набуде виду:

$$I_2 = \frac{E_2 s - E_{\text{дод}}}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_K^2}}, \quad (3.79)$$

Це означає, що для заданого навантаження при введенні $E_{\text{дод}}$ двигун буде працювати вже з іншим ковзанням.

Припустимо, що АД працює в двигунному режимі при $E_{\text{дод}} = 0$. Якщо до валу двигуна прикладений деякий момент $M_c = \text{const}$, то робоча точка - точка 1 (рис. Т3.43) і струм у роторі двигуна визначиться як:

$$I_2 = \frac{E_{2H} \cdot S}{Z} \quad (3.80)$$

При введенні в коло ротора $E_{\text{дод}}=E_{\text{дод1}}$ частина енергії вже буде споживатися джерелом додаткової ЕРС, а кількість енергії, що виділяється безпосередньо в роторі зменшиться. Це призведе до того, що струм у колі ротора

$$I_2 = \frac{E_{2H} \cdot s - E_{\text{дод}}}{Z},$$

також зменшиться і, відповідно зменшиться електромагнітний момент двигуна. Отже, двигун почне сповільнюватися. Але при зменшенні частоти обертання АД в процесі уповільнення ковзання буде зростати, і відповідно буде збільшуватися ЕРС ротора ($E_{2H}s$). Збільшення ЕРС ротора знову призведе до збільшення струму ротора і його моменту, але вже для меншої частоти обертання. Коли електромагнітний момент знову стане зрівняється з статичним моментом, настане новий усталений режим роботи (точка 2). Таким чином, змінюючи величину $E_{\text{дод}}$, можна регулювати швидкість обертання АД.

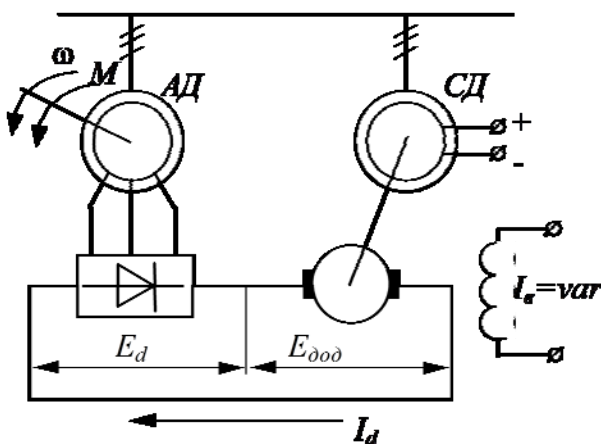


Рисунок Т3.44 - Схема для регулювання швидкості АД введенням додаткової ЕРС у коло ротора

Цей принцип закладений в основу всіх типів каскадних схем регулювання швидкості АД. Джерелом додаткової ЕРС можуть виступати машини змінного чи постійного струму, або статичні вентильні перетворювачі, що працюють у інверторному режимі.

Одна із схем (машино-

вентильного каскаду), що застосовується для регулювання швидкості асинхронного двигуна введенням додаткової ЕРС у коло ротора наведена на рис. Т3.44.

Для наведеної вище схеми струм може бути визначений за виразом

$$I_d = \frac{E_d - E_{\text{дод}}}{R_{\text{екв}}} = \frac{k_{\text{сх}} E_{2н} \cdot s - E_{\text{дод}}}{R_{\text{екв}}}, \quad (3.81)$$

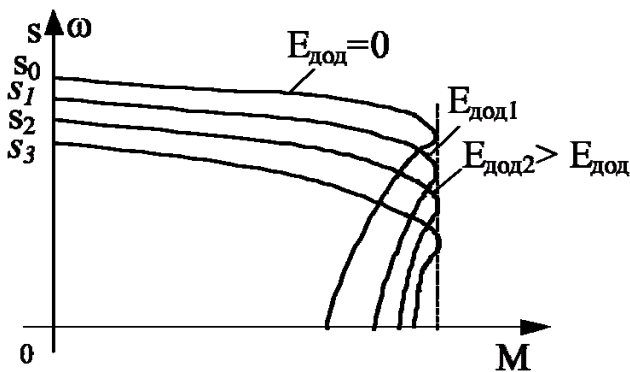


Рисунок Т3.45-Механічні характеристики АД в схемі машино-вентильного каскаду

де $R_{\text{екв}}$ - приведений до кола постійного струму сумарний опір асинхронного двигуна і двигуна постійного струму.

Вид характеристик для такої схеми наведений на рис. Т3.45.

Механічні характеристики, що одержуються цим

способом регулювання, мають майже незмінну жорсткість, котра дещо менша, ніж у звичайної схеми включення і постійний за величиною критичний момент. Регулювання швидкості здійснюється вниз від основної, а енергія ковзання (P_s) повертається в мережу.

Т3.2.6. Несиметричні режими роботи асинхронного двигуна з фазним ротором

Незважаючи на те, що асинхронний двигун простий, надійний, відносно дешевий порівняно з іншими типами двигунів, у звичайній схемі включення він не може конкурувати з ДПС у відношенні регульовальних, гальмівних і пускових якостей. Тому з моменту появи АД інженерна думка була спрямована на створення спеціальних схем

включення, які б дозволили поліпшити ці якості АД. Серед таких схем особливо варто виділити такі:

- схеми включення статора АД на несиметричну напругу (несиметрія напруги живлення);
- схеми несиметричного включення опорів кола ротора (несиметрія роторних опорів).

Несиметричні режими роботи асинхронного двигуна також виникають при аваріях, наприклад, при обриві однієї з фаз, коротких замиканнях і т.п. Розглянемо особливості роботи і характеристики двигуна в різних несиметричних режимах.

Несиметрія напруги на статорі

Не-симетрія напруги, прикладеної до статора АД, може бути амплітудною і фазною. У першому випадку це досягається шляхом включення в коло статора однофазного автотрансформатора, як показано на рис. ТЗ.46.

Переміщуючи повзунок автотрансформатора, можна зменшити або збільшити асиметрію напруг. Діаграма напруг на статорі двигуна, наведена на рис. ТЗ.46 (жирною лінією зображена діаграма при несиметричній напрузі).

Як відомо з курсу ТОЕ, несиметричну трифазну систему без нульового проводу можна представити у вигляді суми двох симетричних трифазних систем - прямого й зворотного чергування фаз (рис. ТЗ.47):

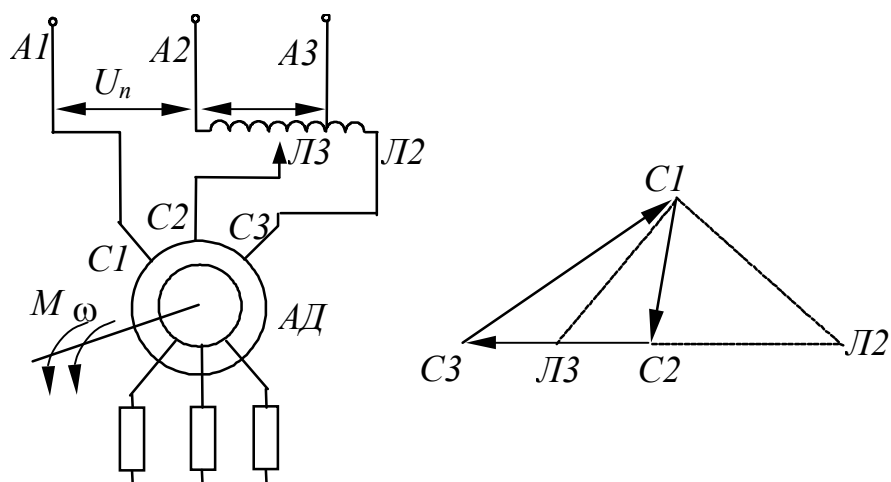


Рисунок Т3.46 - Схема включення асинхронного двигуна з автотрансформатором і діаграма фазних напруг

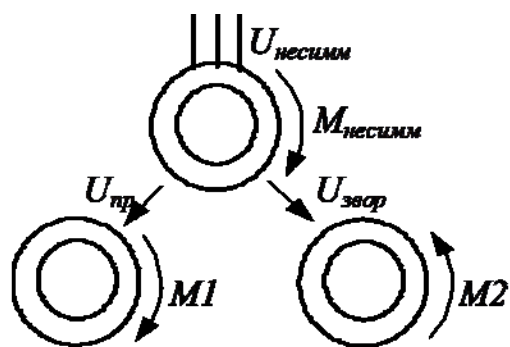


Рисунок Т3.47-Розкладання на складові несиметричної трифазної системи без нульового проводу на пряму й зворотну симетричні складові моменти двигуна

Можна вважати, що для несиметричного живлення в двигуні будуть створюватися дві магніторушійні сили, що обертаються в протилежних напрямках. Вони наводять свої магнітні потоки., що в свою чергу індукують у роторі свої ЕРС, котрі створюють відповідні системи струмів. Взаємодія магнітного потоку прямого

напрямку обертання з струмами ротора прямого чергування фаз створює рушійний момент у позитивному напрямку. Аналогічно магнітний потік зворотного напрямку і відповідна система струмів створюють момент зворотного напрямку. Таким чином, результуючий момент на валу буде дорівнювати алгебраїчній сумі обох моментів. Взаємодія магнітних потоків і струмів протилежних систем чергування

фаз будуть створювати пульсуючі моменти, середня величина яких буде дорівнювати нулю .

Фазні напруги прямої ($U_{пр}$) і зворотної ($U_{звор}$) послідовності можна знайти, визначивши симетричні лінійні напруги простою геометричною побудовою (рис. ТЗ.48).

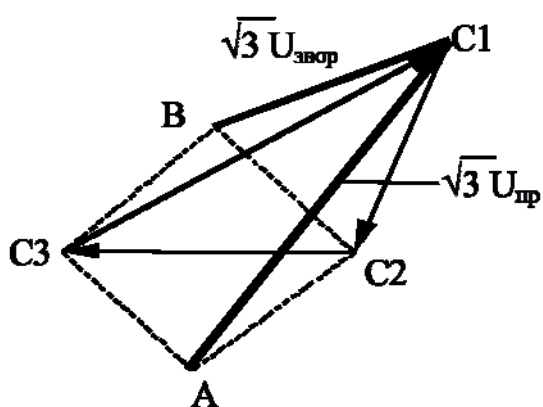


Рисунок ТЗ.48-Графічне визначення симетричних складових напруги прямої й зворотної послідовності

Спочатку будують трикутник несиметричних лінійних напруг ($\Delta C_1 C_2 C_3$), а потім на однім із його катетів (наприклад, $C_2 C_3$) будують допоміжні рівносторонні трикутники ($\Delta C_2 C_3 B$ і $\Delta C_2 C_3 A$). З'єднавши вершину C_1 із точками B і A одержують у відповідному масштабі значення лінійних напруг $U_{пр}$ (відрізок C_1A) і $U_{звор}$ (відрізок C_1B),

відповідно, для симетричних систем прямої й зворотної послідовності.

Виходячи з того, що критичний момент пропорційний квадрату напруги на статорі ($M_{кр} \sim U_2$), за знайденими симетричними складовими фазних напруг можуть бути визначені значення відповідних критичних моментів, як

$$M_{кр.пр} = M_{кр.е} \left(\frac{U_{пр}}{U_n} \right)^2, \quad (3.82)$$

$$M_{кр.звор} = -M_{кр.е} \left(\frac{U_{звор}}{U_n} \right)^2. \quad (3.83)$$

Використовуючи формулу Клосса, можна записати виразу для моментів прямої й зворотної послідовності для будь-якого ковзання $s < 1$:

$$M_{1(s)} = M_{\text{кр.е}} \left(\frac{U_{\text{нр}}}{U_{\text{н}}} \right)^2 \frac{2}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}; \quad (3.84)$$

$$M_{2(s)} = -M_{\text{кр.е}} \left(\frac{U_{\text{звор}}}{U_{\text{н}}} \right)^2 \frac{2}{\frac{2-s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{2-s}}, \quad (3.85)$$

де $(2-s)$ - це ковзання ротора відносно магнітного потоку зворотної послідовності (рис. ТЗ.49).

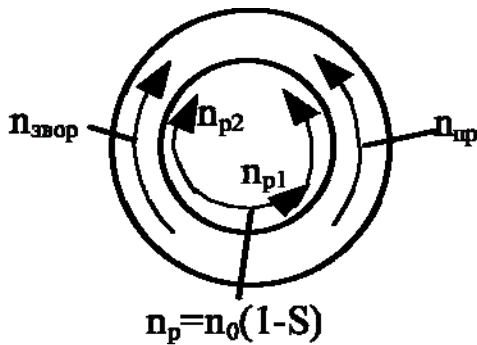


Рисунок ТЗ.49 - МРС прямої й зворотної послідовності при живленні статора несиметричною напругою

Позначення прийняті на рис. 3.49: $n_{\text{пр}}$; $n_{\text{звор}}$ - швидкості обертання прямого й зворотного магнітного потоку; $n_{\text{пр}} = n_0$; $n_{\text{звор}} = -n_0$.

Швидкість обертання ротора відносно прямого поля:

$$n_{p1} = n_{\text{пр}} - n_p = n_0 - n_0(1-s) = n_0 s.$$

Швидкість обертання ротора відносно зворотного поля:

$$n_{p2} = n_{\text{звор}} - n_p = -n_0 - n_0(1-s) = -n_0(2-s),$$

відкіля очевидно, що ковзання ротора відносно поля зворотної послідовності дорівнює $(2-s)$.

Результуючий момент на валу двигуна :

$$M_{\Sigma} = M_{1(s)} + M_{2(s)} = M_{\text{кр.е}} \left(\frac{U_{\text{нр}}}{U_{\text{н}}} \right)^2 \frac{2}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}} - M_{\text{кр.е}} \left(\frac{U_{\text{звор}}}{U_{\text{н}}} \right)^2 \frac{2}{\frac{2-s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{2-s}}. \quad (3.86)$$

Механічна характеристика за відсутності додаткового опору в колі ротора буде мати вид, показаний на рис. ТЗ.50:

З графіка очевидно, що включення двигуна на несиметричну напругу призводить до значного зниження максимального моменту. За

відсутності додаткового опору в колі ротора швидкість обертання двигуна змінюється незначно (т.1 на природній і т.2 - на штучній характеристиці), а робота в гальмівному режимі практично неможлива. Цей режим використовують для зниження пускового моменту двигуна в електроприводах, що мають кінематичні передачі з люфтом (наприклад, редуктор) щоб уникнути великого удару на зубах редуктора при пуску.

Введення в коло ротора достатньо великого додаткового опору дозволяє одержати характеристики, що забезпечують надійний гальмівний режим, придатний для роботи з малими швидкостями, наприклад при спуску вантажу (рис. Т3.51).

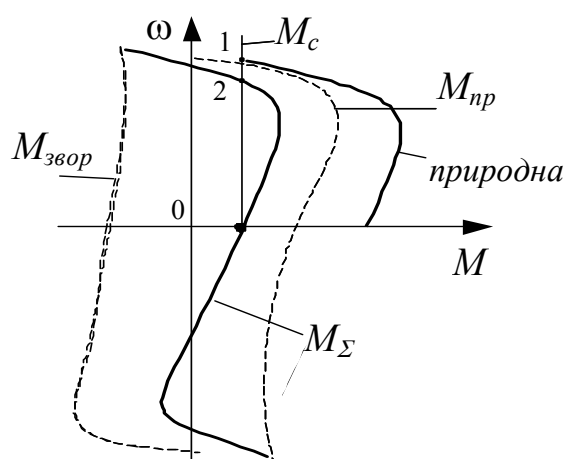


Рисунок Т3.50 - Механічні характеристики асинхронного двигуна при не-симетрії напруги

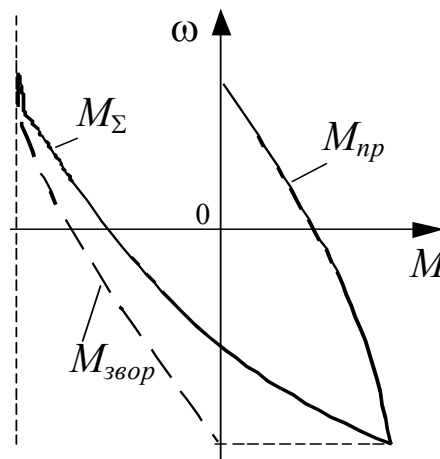


Рисунок Т3.51 - Механічна характеристика асинхронного двигуна при не-симетрії напруги живлення, за наявності додаткового опору в колі ротора

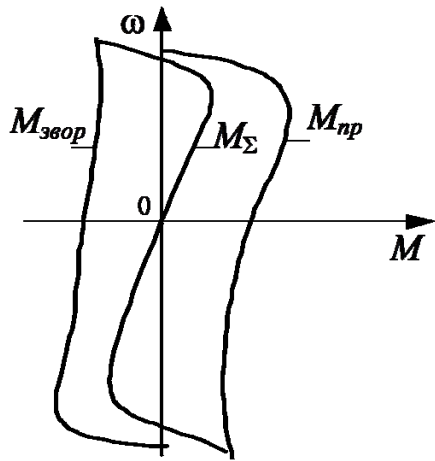


Рисунок Т3.52 - Механічна характеристика асинхронного двигуна в режимі крайньої несиметрії

однієї фази). У цьому випадку обмотка статора створює однофазне пульсуюче магнітне поле, що також може бути розкладене на дві симетричні складові, що обертаються в протилежному напрямку із синхронною швидкістю. Кожне з цих полів буде створювати свій

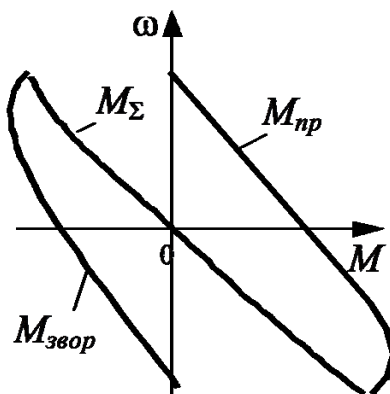


Рисунок Т3.53-Механічна характеристика асинхронного двигуна в режимі крайньої несиметрії за наявності в колі ротора додаткового опору

Істотними недоліками схем із несиметричним живленням при роботі як у двигунному, так і гальмівному режимах є великі втрати в міді і сталі, що призводять до сильного нагрівання.

Більш якісні характеристики АД при несиметричному живленні можна одержати в режимі крайньої не-симетрії, що виникає при живленні двигуна однофазним змінним струмом (відключення

момент, а результируючий момент буде дорівнює їх алгебраїчній сумі. Амплітуди симетричних складових для напруг прямої й зворотної послідовності однакові і дорівнюють $U_n / \sqrt{3}$.

Характеристика результируючого моменту в цьому випадку проходить через початок координат (рис. Т3.52).

У цьому випадку двигун

розвиває тільки рушійний момент для будь-якого напрямку обертання. При введенні достатньо великого опору $R_{2\text{дод}}$ у коло ротора, результуюча характеристика розташовується в другому і четвертому квадрантах (рис. ТЗ.53), і двигун у даному випадку забезпечує роботу в надійному гальмівному режимі.

Величина максимального гальмівного моменту в цьому випадку досягає відповідного критичного моменту прямої або зворотної послідовності і дорівнює $\frac{1}{3}M_{\text{кр.е}}$ для трифазного живлення:

$$M_{\text{кр.пр}} = M_{\text{кр.е}} \left(\frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3}U_{\text{н}}} \right)^2 = \frac{1}{3}M_{\text{кр.е}}. \quad (3.86)$$

Втрати в двигуні в режимі крайньої не-симетрії також значно більше, ніж при трифазному живленні через наявність зворотного синхронного поля і додаткового опору в колі ротора. Регулювання швидкості можливо як у двигунному, так і в гальмівному режимі тільки вниз від синхронної, а характеристики мають меншу жорсткість, ніж при регулюванні зміною частоти напруги живлення або числа пар полюсів, але більшу, ніж при реостатному регулюванні. У зв'язку з цим даний спосіб використовують тільки в ЕП, що працюють короткочасно із зниженою швидкістю.

Несиметрія опорів у колі ротора

Несиметричне включення додаткових опорів у коло ротора асинхронного двигуна застосовують для збільшення числа пускових характеристик, що одержуються за обмеженого числа опорів.

Реалізують цей режим за допомогою несиметричного контролера, що забезпечує в кожному положенні виведення опору тільки в одній фазі. Завдяки цьому для заданого числа ступеней опорів вдасться одержати майже в три рази більшу кількість механічних

характеристик, ніж у випадку симетричних опорів.

Наприклад, якщо схема включення АД із симетричним опором при симетричному виведенні опорів дозволяє одержати тільки три робочі характеристики (рис. ТЗ.54, а,б,в) то при несиметричному виведенні ступеней реостата можна одержати вже шість механічних характеристик (рис. ТЗ.55). :

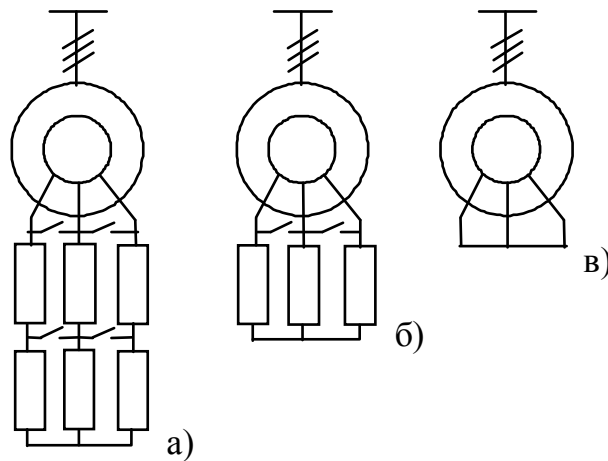


Рисунок ТЗ.54 - Етапи виведення опорів в колі ротора за допомогою симетричного контролера

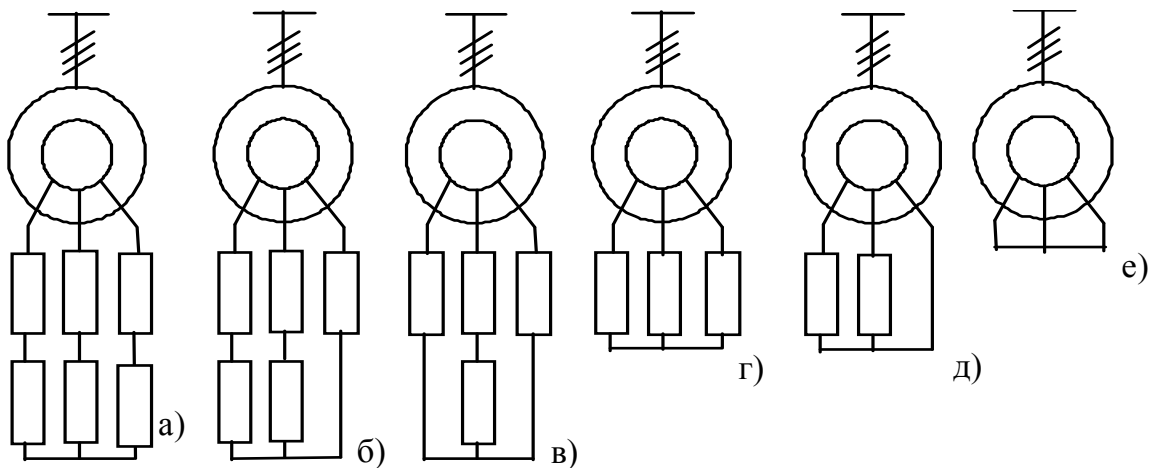


Рисунок ТЗ.55 - Етапи виведення опорів в колі ротора за допомогою несиметричного контролера

Проте, у деяких випадках несиметричне включення опорів може вкрай несприятливо впливати на вид механічних характеристик.

Розглянемо вплив не-симетрії кола ротора на роботу двигуна при включенні ротора АД за схемою “зірки”.

За симетричної напруги мережі в статорі протікають струми, що мають частоту мережі. Оскільки опори фаз ротора неоднакові, фазні струми в колі ротора також будуть неоднаковими, тобто знову маємо випадок із несиметричною системою, але вже струмів ротора. Цю систему можна розкласти на симетричні складові прямої й зворотної послідовності (струмів нульової послідовності не буде, оскільки немає нульового проводу).

Частота струмів ротора прямої й зворотної послідовності однакова і може бути визначена як

$$f_{2a} = f_{2b} = f_{2c} = f_1 \cdot s.$$

Струми прямої послідовності (рис. Т3.56) створюють МРС і відповідне поле, що обертається відносно ротора зі швидкістю

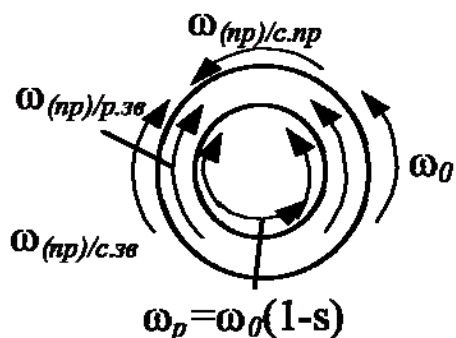


Рисунок Т3.56 - Картина МРС в асинхронному двигуні при несиметричних опорах обмоток ротора

$$\omega_{(np)/p.np} = \omega_0 s,$$

а щодо статора

$$\omega_{(np)/c.np} = \omega_p + \omega_{(np)/p.np} = \omega_0(1-s) + \omega_0 s = \omega_0$$

Таким чином, поле ротора, що створюється струмами ротора прямої послідовності, обертається з тією ж швидкістю, що і поле статора. Іншими словами воно нерухоме відносно поля статора. А це означає, що взаємодія потоку з боку статора з струмами ротора прямої послідовності призводить до створення прямого обертаючого моменту M_{np} , що відповідає моменту двигуна в

звичайній схемі включення при симетричних опорах у колі ротора. Цей момент, незалежно від ковзання, завжди позитивний і є функцією ковзання.

Струми зворотної послідовності створюють зворотну МРС і відповідне обернене поле, швидкість обертання котрого відносно ротора

$$\omega_{(пр)/р.звор} = -\omega_0 s$$

а відносно статора

$$\omega_{(пр)/с.звор} = \omega_0(1 - s) - \omega_{0s} = \omega_0(1 - 2s). \quad (3.86)$$

Таким чином, величину і напрямок обертання поля ротора, що створюється струмами ротора зворотної послідовності, залежить від ковзання.

Так, при $0 < s < 0.5$, як очевидно з формули (3.86), це поле обертається в тому ж напрямку, що і поле статора, але з частотою $\omega_0(1-2s)$. Завдяки цьому в обмотці статора індукуються ЕРС, частота якої $f_{звор} = f_c(1-2s)$ та виникають струми статора цієї ж частоти.

Взаємодія результуючого потоку від МРС статора й зворотної МРС ротора з струмом статора відповідної частоти приводить до виникнення зворотного обертаючого моменту $M_{звор}$. Щоб зрозуміти характер $M_{звор}$, достатньо представити, що струми ротора зворотної послідовності створюються, ніби то за рахунок живлення двигуна з боку кілець ротора від фіктивного джерела енергії частотою з f_{1s} . В цьому випадку при $0 < s < 0.5$, якщо вважати ротор нерухомим, момент, що створюється потоком зворотного напрямку і струмом статора, буде негативним.

При $s = 0.5$ швидкість обертання зворотного поля ротора відносно статора дорівнює

$$\omega_{(пр)/с.звор} = \omega_0(1 - 2s) = 0.$$

Таким чином, в статорі не створюється ЕРС зворотної частоти, струми цієї частоти в статорі відсутні, а отже, момент $M_{звор}$ при $s = 0.5$ буде дорівнювати нулю.

При $0.5 < s < 1$ знак моменту зміниться на протилежний, оскільки тепер напрямок обертання поля відносно статора, що утворюється струмами зворотної послідовності, буде протилежним відносно напрямку обертання основного поля, тобто поля струму статора зворотної послідовності і поле ротора збігається за знаком ($M_{звор} > 0$).

Результуючий момент на валу двигуна, дорівнює $M_{пр} + M_{звор}$, у функції ковзання є більш складною кривою, що має при ковзанні, близькому до 0.5 «провал», та за достатньо значного моменту навантаження на валу може викликати припинення розгону двигуна і «застрягання» на швидкості близькій до $0.5\omega_0$.

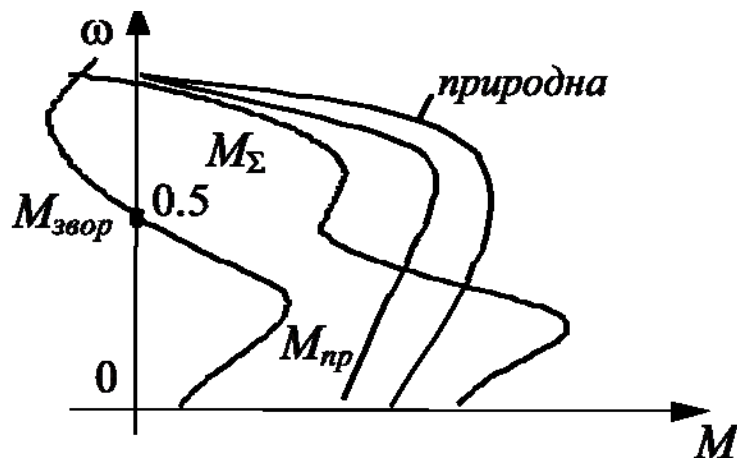


Рисунок Т3.57 - Механічні характеристики асинхронного двигуна для несиметрії опорів у колі ротора

Механічна характеристика асинхронного двигуна в режимі роторної не-симетрії наведена на рис. Т3.57.

Із збільшенням опору кола ротора «провал» зменшується. Тому для зменшення не-симетрії струмів у роторі, як правило, на останній

ступені регулювання, відключають не одну секцію, а дві (у двох фазах). У цілому, чим більше ступеней регулювання (тобто чим менша різниця опорів фаз при виведенні однієї з ступеней), тим менші за величиною ці “провали”. Окрім “провалу”, крива моменту, має ще ряд особливостей, що обмежують роботу АД з несиметричними опорами в колі ротора. До них варто віднести взаємодію між струмом і потоком прямої й зворотної послідовності, що призводить до виникнення пульсуючих моментів. Оскільки їх середнє значення дорівнює нулю, то вони не впливають на вид механічних характеристик, проте внаслідок великих пульсацій моменту, обмежують допустиму не-симетрію. Окрім того, наявність потоків і струмів зворотної послідовності збільшує втрати в міді і в сталі, що призводить до надмірного нагрівання двигуна. Особливо великі втрати в міді і сталі характерні для малих ковзань, оскільки двигун долає як момент навантаження, так і зворотній момент двигуна, а це призводить до збільшення струму ротора і відповідно втрат.

Режим роботи АД при не-симетрії опорів у роторному колі використовують для одержання більшого числа регульовальних характеристик для меншого числа ступеней реостату. Цей режим може виникнути як аварійний, наприклад, при перегорянні опору в роторній обмотці.

Аналогічний режим може виникнути в синхронному двигуні при пуску (оскільки обмотка ротора в даному випадку може розглядатися як трифазна з обірваною фазою). Щоб уникнути «застрягання» синхронного двигуна при пуску в обмотку збудження вводять додатковий опір.

Т3.3. Властивості і характеристики електроприводів із асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором

Т3.3.1. Особливості роботи асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором

Серед електричних двигунів асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором (АД з к. з. ротором) є найбільш популярними та переважають в багатьох галузях промисловості і в побуті:, у підйомних пристроях (тельфери, кран-балки, тихохідні мостові крани), верстатних ЕП, побутових електроустановках і пристроях. Окрім того, вони просто незамінні в малопотужних ЕП транспортерів, вентиляторів і насосів.

В даний час АД з к. з. ротором різноманітного конструктивного виконання випускаються в широкому діапазоні потужностей від 0,01 кВт - в асинхронних мікродвигунах до 3,5 тис. кВт і вище.

Основні промислові серії АД з к. з. ротором:

- краново-металургійні (МТК) - до 30 кВт;
- з підвищеним ковзанням (АС) - до 100 кВт;
- з підвищеним пусковим моментом (АП) - до 100 кВт;
- з ротором номінального виконання (А, 4А, АИ) - до 100 кВт;
- з подвійною кліткою ротора (ДАМСО)- 140..1250 кВт;
- з глибоким пазом (ГАМ).

Їх пускові показники наведені в таблиці:

Показники	тип електродвигуна					
	А, 4А	ГАМ	ДАМСО	АС	АП	МТК
$M_{п} / M_{н}$	0,5-1,2	1,0-1,5	1,0-2,0	2,0-2,1	1,8	до 3,0
$I_{п} / I_{н}$	5,5-6,0	4,2-5,0	3,0-5,5	4,0	6,0	4,4

Двигуни серії А - загальнопромислового застосування. Обмотка ротора з глибоким пазом, виконана литтям з алюмінієвого сплаву. Мають найнижчий критичний пусковий момент, великий пусковий струм і застосовуються для ЕП тривалого режиму, що не потребують значних пускових моментів (верстати, вентилятори, насоси і т.д.).

Двигуни серії АП - із підвищеним пусковим моментом (до 100 кВт, 500 В). Ротори двигунів малої потужності мають глибокі пази, а великої - подвійну клітку. Мають великий пусковий і критичний моменти, найбільший пусковий струм, і найменше ковзання. Застосовують у ЕП тривалого режиму роботи для механізмів, що мають великий статичний момент зрушення (дробарки, млини і т.д.).

Двигуни серії АС - із підвищеним ковзанням(100 кВт, 500 В). Ротор має менш глибокий паз, ніж у двигунах серії А. Обмотка виготовляється з алюмінієвого сплаву підвищеного опору, що заливається в пази під тиском. Мають ще більший пусковий момент та менший пусковий струм і велике номінальне ковзання (від 0,1 - 0,16). Застосовують у ЕП короткочасного режиму, з ударним навантаженням (молоти, преси і т.д.).

Двигуни серії МТК - краново-металургійні. Розраховані для роботи в повторно-короткочасному режимі з частими пусками. Мають підвищений пусковий момент і порівняно невеликий пусковий струм (за рахунок збільшеного опору стержнів ротора). Підвищене ковзання для цих двигунів (0,03-0,11) не є істотним недоліком, оскільки вони не призначені для тривалого режиму роботи. Роторна обмотка - із латунних стержнів.

Двигуни серії ДАМСО - із подвійною кліткою ротора (до 1250 кВт і вище на 3000 і 6000 В). Ці двигуни мають майже такі ж кратності пускового і критичного моментів, пускового струму,

номінального ковзання, як і двигуни серії А. Ці двигуни продовжують серію А и призначені для тривалого режиму роботи.

Механічні і швидкісні характеристики асинхронних двигунів із к.з. ротором наведені на рис. Т3.58.

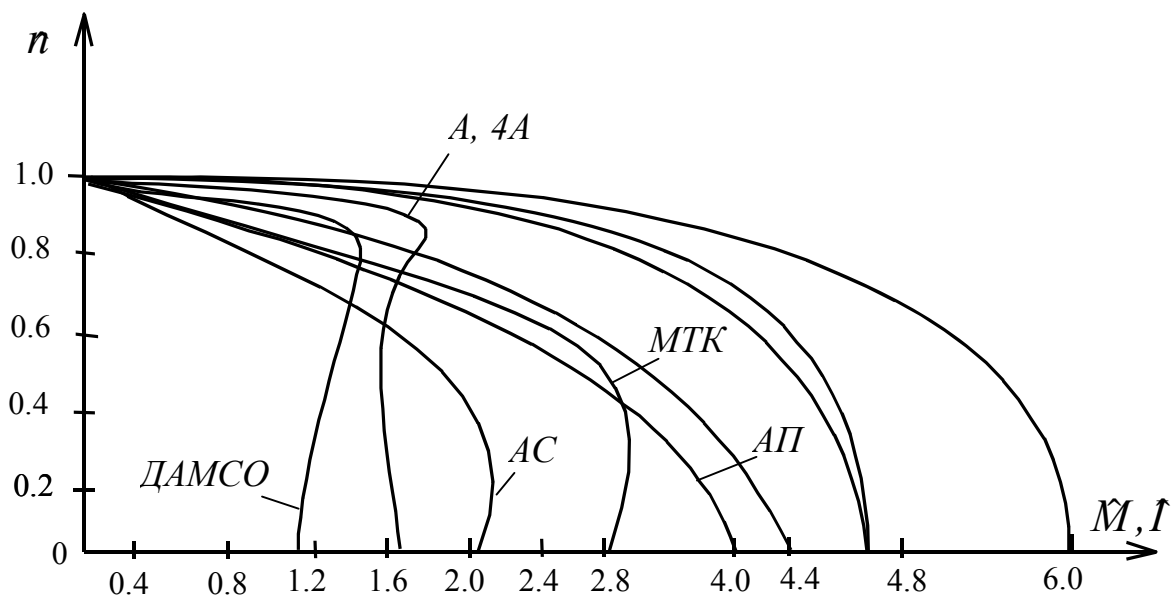


Рисунок Т3.58 - Механічні характеристики АД з короткозамкненим ротором різноманітних серій

Перш ніж перейти до розгляду механічних властивостей і особливостей АД з короткозамкненим ротором, варто нагадати особливості їх конструкції, що, в основному, і визначають ці властивості. Якщо обмотка статора в АД з короткозамкненим ротором нічим не відрізняється від обмотки статора АД з фазним ротором, то обмотка ротора виконується у формі жорстких стержнів з алюмінію або міді, кінці яких припаяні до короткозамкнених кінців (т.зв. “біляча клітка”). Окрім того, у АД з короткозамкненим ротором відсутні контактні кільця, що дозволяють змінювати опір кола ротора.

Завдяки своїй конструкції, АД з короткозамкненим ротором мають порівняно невеликий опір R_2 , а, отже, при однаковій потужності і числі полюсів вони зазвичай мають менше номінальне і

критичне ковзання (із ростом потужності ці параметри зменшуються). Але головною особливістю АД з короткозамкненим ротором є те, що величина R_2 значно змінюється в залежності від величини ковзання (тобто для різних швидкостей) внаслідок явища витіснення струму на поверхню провідника. Тому отримані раніше залежності, що описують механічні й електромеханічні властивості АД з фазним ротором непридатні для розрахунків характеристик АД з к. з. ротором.

Оскільки ефект витіснення струму виявляється найбільш сильно для великих ковзань, то використовувати залежності, що описують механічні характеристики АД з фазним ротором, для АД з короткозамкненим ротором можна без великої похибки тільки для малих ковзань (менше $\pm S_{кр}$). Для розрахунку характеристик у повному діапазоні варто користуватися експериментальними кривими, які наводяться в технічній документації на двигун.

Особливо детально необхідно зупинитися на пускових властивостях АД з короткозамкненим ротором. Пусковий момент для АД з короткозамкненим ротором є характерним і важливим експлуатаційним параметром. Відносне значення пускового моменту до номінального є характерним параметром ($M_n / M_n = 0.8 - 2.0$), причому, для тихохідних двигунів, цей показник менший. В асинхронних двигунах із короткозамкненим ротором цей показник не завжди є найменшим значенням в області двигунного режиму, оскільки дійсна характеристика в області ковзань, близьких до одиниці, відрізняється від теоретичної. Причиною цього явища є додаткові моменти, зумовлені вищими гармоніками, ефектом витіснення струму в пазах, що не враховані в теоретичних залежностях для механічної характеристики. Тому в реальній

характеристиці (рис. Т3.59) іноді має місце «провал» (крива 1 - дійсна характеристика; крива 2 - теоретична).

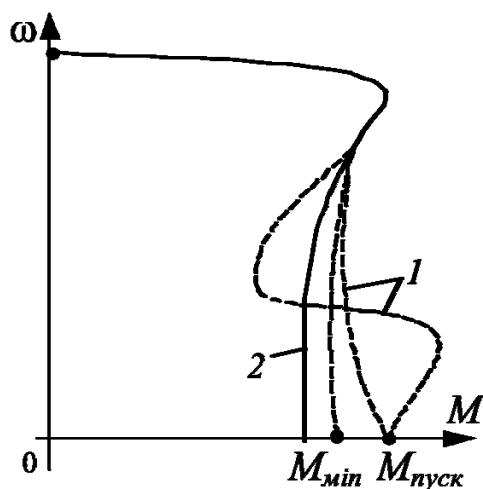


Рисунок Т3.59 - Пускова механічна характеристика АД з короткозамкненим ротором

пускового струму ($I_{п}/I_{н} = \lambda_i = 4-7$) збільшується із збільшенням номінальної потужності двигуна і пропорційна номінальній швидкості.

Таким чином, АД з короткозамкненим ротором нормального виконання має незадовільні пускові параметри. І якщо поліпшити пускові властивості (тобто збільшити $M_{п}$ і знизити $I_{2п}$) АД з фазним ротором можна за рахунок збільшення активного опору кола ротора (введенням $R_{2дод}$), то для АД з короткозамкненим ротором цей спосіб неприпустимий, оскільки зовнішній опір ввести в даному випадку неможливо, а зростання внутрішнього опору викликає збільшення ковзання в робочій області і зниження ККД. Поліпшення пускових властивостей АД з короткозамкненим ротором досягається застосуванням спеціальних конструкцій обмоток ротора, наприклад, із глибокими і вузькими пазами і вузькими високими стержнями, або у вигляді подвійної «білячої клітки». При цьому внаслідок явища

Для випадку, коли момент опору при пуску великий, а «провал» достатньо глибокий, це може викликати «застрягання» двигуна на малій швидкості. Окрім того, при роботі на зниженій швидкості може виникнути неприпустимий перегрів обмоток, що призводить до виходу двигуна з ладу.

Другою важливою величиною для АД з короткозамкненим ротором є пусковий струм. Кратність

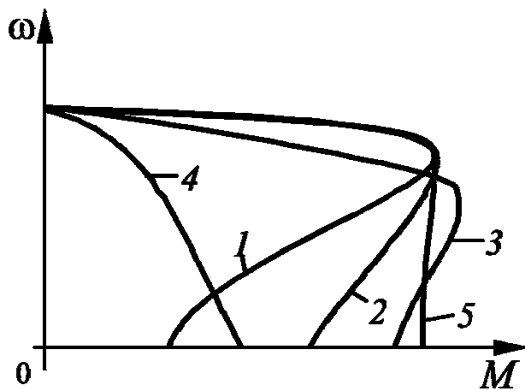


Рисунок ТЗ.60 - Пускові характеристики АД з короткозамкненим ротором спеціальних конструкцій: 1 - ротор із звичайними круглими пазами; 2 - ротор із глибокими пазами; 3 - ротор із подвійною кліткою; 4 - масивний сталевий ротор

мережі, ЕРС самоіндукції, що наводиться магнітним потоком розсіювання, а, отже, і індуктивний опір провідників в нижній частині паза, виявляється значно більшим, ніж в верхній. Тому більша частина пускового струму буде проходити верхньою частиною провідника. Загальне зміщення останнього буде використовуватися не повністю і це призведе до збільшення активного опору, а, отже, і пускового

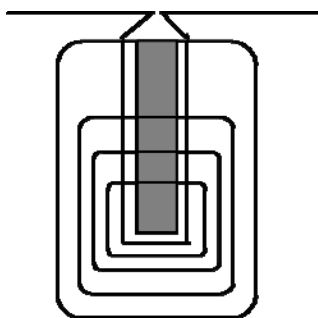


Рисунок ТЗ.61 - Картина потоку в глибокому пазу

поверхневого ефекту активний опір ротора цих двигунів зростає зі збільшенням ковзання, що призводить до збільшення значення моменту і підйому вітки механічної характеристики (рис. ТЗ.60).

Так, наприклад, підвищення пускового моменту АД з короткозамкненим ротором із глибокими пазами, як показано на рис. ТЗ.61, відбувається тому, що при пуску, коли частота струму ротора близька до частоти

моменту двигуна.

Після розгону двигуна частота струму ротора знижується і струм протікає через весь переріз обмотки.

Ще більш поширеною конструкцією, що дозволяє поліпшити пускові властивості АД з короткозамкненим ротором, є

двигуни з подвійною кліткою (рис. ТЗ.62, а), у яких одна обмотка (пускова) має менший переріз і, отже, більший опір і меншу індуктивність у порівнянні з нижньою (робочою) обмоткою. При пуску індуктивний опір робочої обмотки набагато вищий і струм проходить через пускову обмотку, а в процесі розгону зі зменшенням частоти струму ротора, індуктивний опір її знижується, і струм розподіляється між двома обмотками рівномірно. Оскільки переріз робочої обмотки більший, тобто її опір менший, то практично весь струм за малих ковзень проходить через неї.

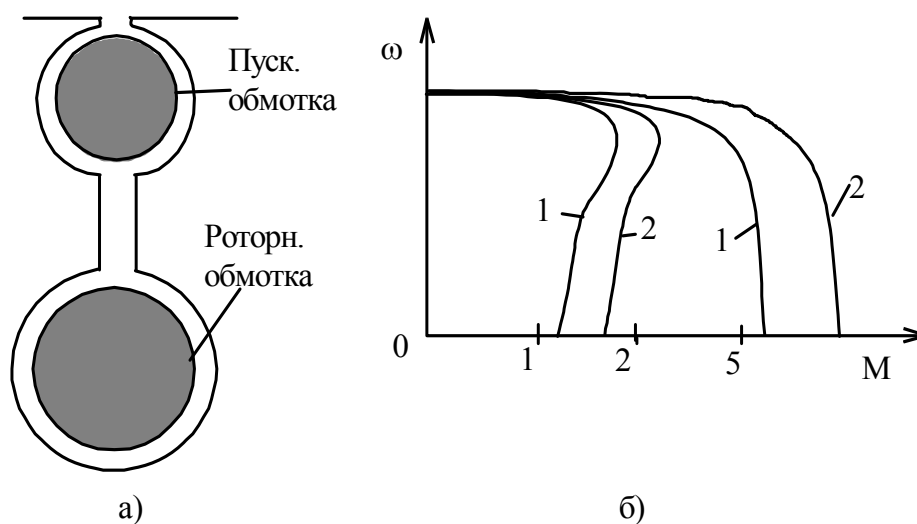


Рисунок ТЗ.62-Конструкція ротора з подвійною кліткою (а) і вид пускових механічних характеристик для різних конструкцій ротора (б)

У цілому, властивості та характеристики АД з короткозамкненим ротором, на порядок кращі, ніж АД з фазним ротором, тому сучасні способи регулювання швидкості і можливості пуску дозволяють повністю витіснити АД з фазним ротором як менш надійні і економічні в експлуатації.

ТЗ.3.2. Розрахунок механічних характеристик асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором

У зв'язку з тим, що опір кола АД з короткозамкненим ротором змінюється в достатньо широких межах, розрахунок механічної характеристики цього двигуна при використанні загальної формули для електромагнітного моменту (3.25) не дає достатньо точних результатів. До того ж, параметри $(R_1; R'_2; X_k)$, що входять до цієї формули, у каталогах, як правило, не наводяться. Зазвичай для АД з короткозамкненим ротором у паспортних даних вказуються: $P_{ном}$, $n_{ном}$,

$$\hat{M}_{кр} = \frac{M_{кр}}{M_{ном}}, \quad \hat{I}_п = \frac{I_п}{I_{ном}}, \quad \hat{M}_п = \frac{M_п}{M_{ном}} \quad (\text{іноді також вказуються } \cos \varphi_п, \cos \varphi_{ном}) .$$

У цьому випадку для розрахунку механічної характеристики двигуна для повного діапазону зміни ковзання користуються уточненою формулою Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_{кр} \cdot (1 + a \cdot S_{кр})}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S} + 2 \cdot a \cdot S_{кр}} = \frac{M_{кр} \cdot (2 + q)}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S} + q}, \quad (3.87)$$

де

$$a = \frac{R_1}{R'_2}, \quad (3.88)$$

$$q = 2 \cdot \frac{R_1}{R'_2} \cdot S_{кр}. \quad (3.89)$$

Послідовність розрахунку

Визначають номінальне ковзання:

$$S_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0},$$

де ω_0 - синхронна частота обертання (рад/с); $\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30}$ - номінальна частота обертання (рад/с);

Визначають $S_{кр}$ і q . Ці величини можуть бути орієнтовно розраховані при підстановці в рівняння (3.87) координат двох відомих точок характеристики, що відповідають номінальному режиму і пуску

$$\left. \begin{aligned} \frac{M_{нч}}{M_{кр}} &= \frac{2+q}{\frac{S_H}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S_H} + q} \\ \frac{M_{п}}{M_{кр}} &= \frac{2+q}{\frac{1}{S_{кр}} + S_{кр} + q} \end{aligned} \right\}$$

Рішення системи цих двох рівнянь щодо $S_{кр}$ і q дає такий результат:

$$S_{кр} = \frac{S_H + \sqrt{S_H \cdot A}}{1 + \sqrt{S_H \cdot A}}; \quad (3.90)$$

$$q = \frac{\frac{1}{S_{кр}} + S_{кр} - 2 \cdot \frac{M_{к}}{M_{п}}}{\frac{M_{к}}{M_{п}} - 1}, \quad (3.91)$$

де $A = \frac{M_{кр}/M_H - 1}{M_{кр}/M_{п} - 1}$.

Якщо R_1, R'_2, X_K відомі, то значення $S_{кр}$ і q можуть бути розраховані за відомими формулами:

$$S_{кр} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}}; \quad (3.92)$$

$$q = 2 \cdot \frac{R_1}{R'_2} \cdot S_{кр}. \quad (3.93)$$

За відсутності заводських даних параметри R_1, R'_2, X_K можна визначити таким чином. Для випадку, коли обмотки двигуна з'єднані в “зірку” пусковий момент на природній характеристиці може бути визначений за формулою (3.29). З іншого боку, повний опір двигуна при пуску

$$Z_K^2 = (R_1 + R'_2)^2 + X_K^2, \quad (3.94)$$

де

$$Z_K = \frac{U_{1\Phi}}{I_n}. \quad (3.95)$$

З (3.93), (3.94), (3.95) виразимо R'_2 :

$$R'_2 = \frac{\omega_0}{m \cdot U_{1\Phi}} \cdot M_{пуск} \cdot Z_K^2, \quad (3.96)$$

де M_n і I_n - беруться з каталогів.

Із виразу (3.93) випливає, що

$$(R_1 + R'_2) = Z_K \cdot \cos \varphi_{пуск}, \quad (3.97)$$

де $\cos \varphi_n$ - коефіцієнт потужності при пуску двигуна (тобто при $S = 1$).

Цей коефіцієнт може бути підрахований за формулою:

$$\cos \varphi_n = \cos \varphi_n \left[\frac{\widehat{M}_n}{\widehat{I}_n} \cdot \frac{\eta_n}{1 - S_n} + \widehat{I}_n \cdot \gamma \cdot (1 - \eta_n) \right], \quad (3.98)$$

де $\gamma = \frac{\Delta P_{мсм}}{\Delta P_n}$ - відношення втрат у міді статора для номінального навантаження до повних втрат для номінального навантаження (за відсутності цих даних можна з достатньою точністю приймати $\gamma = 0,35$).

Тоді активний опір фази статора:

$$R_1 = Z_K \cdot \cos \varphi_n - R'_2, \quad (3.99)$$

а реактивний опір при пуску

$$X_K = Z_K \cdot \sin \varphi_n. \quad (3.100)$$

Таким чином, визначивши R_1, R'_2, X_K , визначають $S_{кр}$ і q , а потім за уточненою формулою Клосса розраховується характеристика двигуна, причому, це рівняння справедливе не тільки для двигунного режиму, але і для режиму проти-вмикання ($S > 1$) і рекуперативного гальмування ($S < 0$). При цьому значення $|q|$ і $|S_{кр}|$ сталі для всіх режимів, а $M_{кр}$ для генераторного режиму нескладно розрахувати, підставивши у формулу Клосса $S = S_{кр.г} = -S_{кр}$:

$$\frac{M_{кр.г}}{M_{кр.г.}} = \frac{2 + q}{\frac{-S_{кр}}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{-S_{кр}} + q} = -\frac{2 + q}{2 - q};$$

$$M_{кр.г} = M_{кр.г.} \cdot \left(-\frac{2 + q}{2 - q}\right). \quad (3.101)$$

ТЗ.4. Властивості і характеристики електроприводів із синхронними двигунами

Синхронні двигуни (СД) застосовують, головним чином, для електроприводів середніх і великих потужностей (біля сотень і тисяч кВт). Перевагою СД є можливість роботи в режимі компенсації реактивної потужності (із випереджаючим $\cos(\varphi)$), що споживається іншими електроприймачами цеху або підприємства з мережі. Ця

властивість часто виправдує застосування більш дорогих, у порівнянні з АД, СД.

У промисловості СД широко застосовується як в нерегульованому (насоси, компресори й ін.), так і в регульованому (повітродувки, потужні турбомеханізми) ЕП, в системі вентильного двигуна.

Схема включення СД наведена на рис. ТЗ.63.

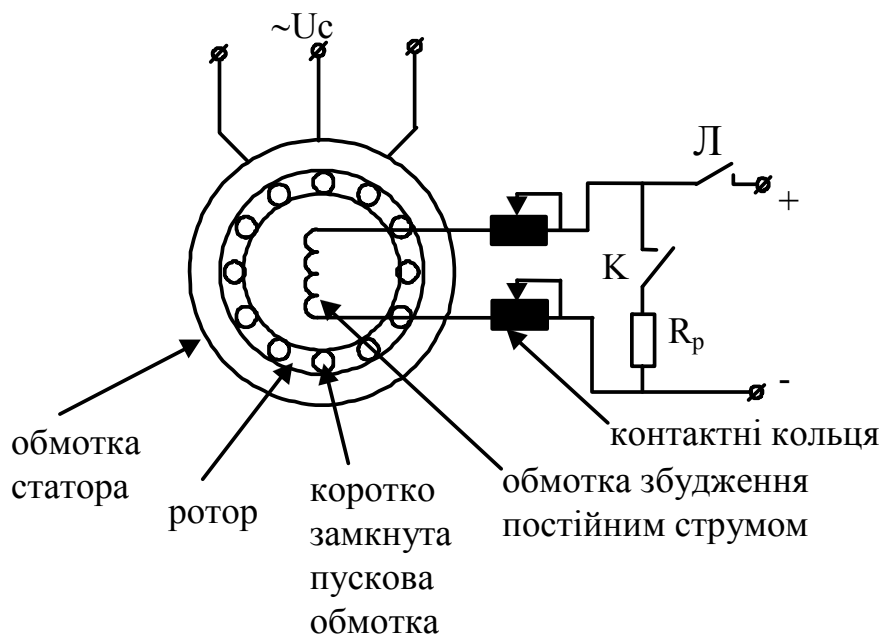
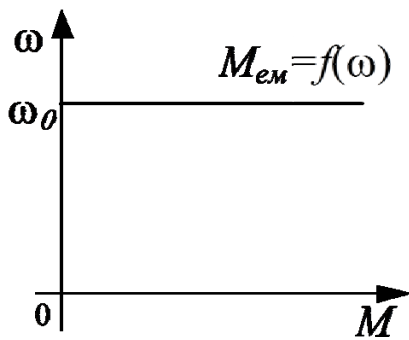


Рисунок ТЗ.63 - Схема включення синхронного двигуна
(R_p - розрядний опір)

ТЗ.4.1. Механічні характеристики синхронного двигуна в двигунному режимі

З курсу "Електричні машини" відомо, що процесам пуску і робочому режиму відповідають різні механічні характеристики. У відповідності з принципом роботи СД його механічна характеристика є абсолютно жорсткою (рис. ТЗ.64).

Тобто швидкість обертання дорівнює:



$$\omega = \omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_c}{p} \quad (3.102)$$

Жорсткість характеристики

$$\text{СД } \beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \infty.$$

Проте СД працює стійко

Рисунок ТЗ.64 - Механічна характеристика синхронного двигуна

лише у визначеному інтервалу зміни значень моменту на валу, оскільки із зміною навантаження

змінюється положення осей магнітних полів статора і ротора, що характеризується кутом θ зсуву фаз між векторами напруги мережі і ЕРС, що наводиться полем ротора в обмотці статора.

Залежність між моментом на валу двигуна і кутом θ є характеристикою, що встановлює область його стійкої роботи і перевантажувальну здатність і називається кутовою характеристикою.

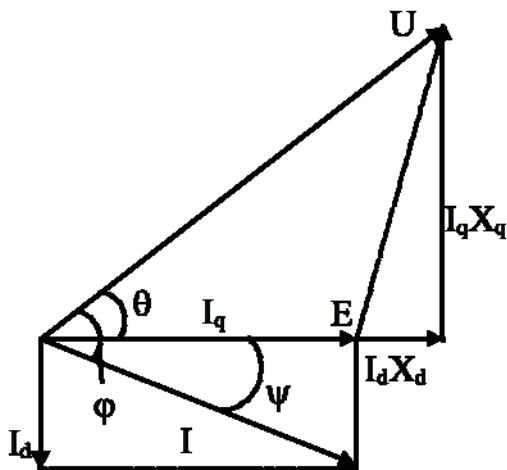


Рисунок ТЗ.65 - Векторна діаграма синхронного двигуна

Для встановлення цієї залежності доцільно скористатися спрощеною векторною діаграмою СД, наведеною на рис. ТЗ.65.

Позначення на діаграмі: x_d, x_q - індуктивний опір за подовжньою і поперечною осями; I_d, I_q - складового струму за подовжньою і поперечною осями; I - струм двигуна; U - напруга мережі; E - ЕРС, що індукується в обмотці статора.

Знехтувавши падінням напруги на активному опорі в статорі можна вважати, що активна електромагнітна потужність дорівнює активній потужності мережі:

$$P_e \cong P_c = 3U_c I_1 \cos \varphi,$$

а електромагнітний момент дорівнює

$$M_e = \frac{P_e}{\omega_0}.$$

З векторної діаграми видно, що :

$$U \cos \theta = E + I_d x_d ;$$

$$U \sin \theta = I_q x_q ;$$

$$\varphi = \theta + \psi$$

Тоді

$$P_e = 3UI \cos(\psi + \theta), \quad (3.103)$$

а за умови, що

$$\cos(\psi + \theta) = \cos \psi \cos \theta - \sin \psi \sin \theta;$$

$$I \cos \psi = I_q ;$$

$$I \sin \psi = I_d ,$$

після перетворень, остаточно отримаємо:

$$P_e = M_e \omega_0 = 3 \left[\frac{UE \sin \theta}{x_d} + \frac{U^2 \sin 2\theta}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \right]. \quad (3.104)$$

Звідки електромагнітний момент СД :

$$M_e = \frac{3}{\omega_0} \left[\frac{UE \sin \theta}{x_d} + \frac{U^2 \sin 2\theta}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \right], \quad (3.105)$$

де $\frac{3EU \sin \theta}{\omega_0 x_d} = M_{\text{синхр}}$ - синхронний момент;

$$\frac{3U^2 \sin 2\theta}{2\omega_0} \left[\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right] = M_{\text{реакт}} - \text{реактивний момент.}$$

Для неявно-полюсних синхронних машин із малим насиченням $x_d = x_q$ і, отже, $M_{\text{реакт}} = 0$. У явно-полюсних СД, в результаті різної магнітної провідності за подовжньою і поперечною осями, $x_d \neq x_q$, унаслідок чого і виникає $M_{\text{реакт}}$.

З рівняння (3.105) очевидно, що синхронний момент є гармонійною функцією кута θ , а реактивний момент при зміні кута θ змінюється з подвійною частотою, причому реактивна складова моменту дорівнює (25 ÷ 30)% від $M_{\text{синхр}}$.

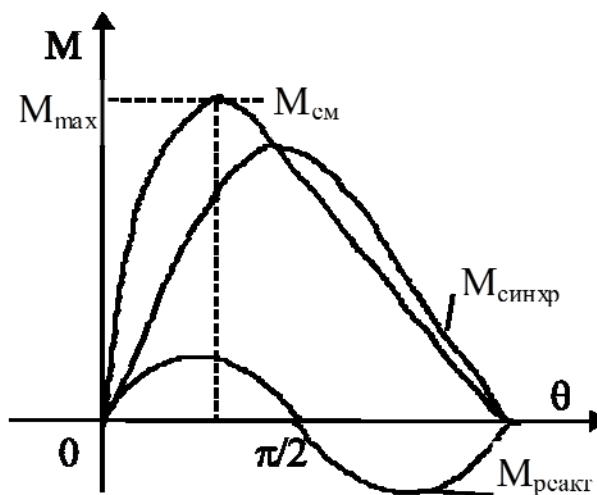


Рисунок Т3.66 - Кутова характеристика синхронного двигуна

Таким чином, якщо представити кутову характеристику синхронного двигуна у формі графіка (рис. Т3.66), то нескладно бачити, що максимум моменту $M_{\text{ем}}$ явно-полюсної машини має місце для кута $\theta < 90^\circ$, а неявно-полюсної - для кута $\theta = 90^\circ$ ($\sin \theta = 1$):

Перевантажувальна здатність

явно-полюсних машин дещо нижча, ніж неявно-полюсних :

$$\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}} = \lambda_{\text{м}} = \frac{\sin \theta_{\max}}{\sin \theta_{(\text{при } M_c = M_H)}}, \quad (3.106)$$

а з врахуванням поштовхів навантаження звичайно кут θ , що відповідає номінальному режиму роботи, приймають меншим $\theta_{\text{н.реж}} \approx 20 \div 30^\circ$.

Тоді

$$\lambda_{\text{м}} = \frac{\sin 90}{\sin(20 \div 30)} \approx 2 \div 3.$$

Пропорційність між $M_{\text{синхр}}$ і U робить двигун більш стійким до коливань напруги живлення, (у порівнянні з АД, де $M \sim U^2$).

Оскільки в синхронному двигуні $M_c \sim E$, то перевантажувальна здатність двигуна може бути збільшена за рахунок форсування струму збудження при поштовхах навантаження, що реалізують у замкнутих системах електропривода. У результаті навіть за достатньо великих коливань навантаження зберігається стійка робота СД. Цей метод також використовується при провалах напруги в мережі. Інакше, як відомо, збільшення навантаження на валу СД призведе до збільшення струму I і відповідно до збільшення кута θ , і якщо кут θ перевершить значення, що відповідає максимальному моменту двигуна, то останній почне зменшуватися, стане меншим M_c , у результаті чого відбудеться випадання двигуна із синхронізму.

ТЗ.4.2. Гальмівні режими роботи синхронного двигуна

Робота синхронних двигунів можлива в двох гальмівних режимах:

- режимі рекуперативного гальмування;
- режимі динамічного гальмування.

Режим рекуперативного гальмування можливий, коли до валу двигуна прикладений двигунний момент з боку робочої машини, що спів-направлений з рухом поля статора. При цьому ротор обертається і швидкістю $\omega = \omega_0$, але відбувається зміна кута θ ($\cos\theta < 0$), і електромагнітний момент стає гальмівним. Усталений режим для рекуперативного гальмування настає коли $M_{e,гальм} = M_c$. Механічна характеристика має вид, представлений на рис. ТЗ.67.



Рисунок ТЗ.67 - Механічна характеристика СД в режимі рекуперативного гальмування

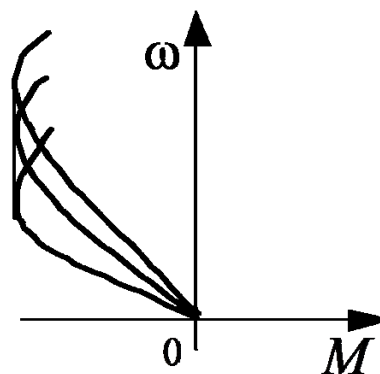


Рисунок ТЗ.68 - Механічні характеристики СД в режимі динамічного гальмування

При динамічному гальмуванні обмотка статора відключається від мережі і замикається на $R_{дод}$. СД залишається в збудженому стані. У цьому випадку режим роботи СД аналогічний відповідному режиму для АД при незалежному збудженні обмотки статора АД. Їх відмінність полягає в тому, що постійне магнітне поле наводиться з

боку ротора (від обмотки збудження, або, у явно-полюсній машині - від полюсів ротора). При обертанні цього поля останнє перетинає витки статорної обмотки і наводить у ній ЕРС змінного струму з частотою, що залежить від швидкості обертання ротора, у результаті чого виникає гальмівний момент $M_{ем}$. Характеристики в даному випадку мають такий же вид, як і в АД в режимі динамічного гальмування (рис. Т3.68).

Режим проти-вмикання може бути реалізований тільки при переведенні СД в асинхронний режим. При цьому ОЗ відключається і двигун працює як звичайний короткозамкнений АД, однак струми в роторі значно зростають, викликаючи перегріву двигуна, а також погіршення магнітних властивостей роторної обмотки. З цих причин такий режим на практиці не використовують.

Т3.4.3. Способи регулювання швидкості електроприводів з синхронними двигунами

Як видно з виразу для синхронної швидкості, регулювання швидкості теоретично можливе або за рахунок зміни частоти напруги живлення, або за рахунок зміни числа пар полюсів. Другий метод, як правило, на практиці не використовують через складність конструкції і високу вартість. Окрім того, це можливо тільки для СД із неявно-полюсним ротором, оскільки необхідно переключати полюси одночасно в статорі і роторі.

Регулювання швидкості зміною частоти напруги живлення є основним способом і в даний час реалізоване в системах частотно-регульованого синхронного ЕП із застосуванням перетворювачів частоти. Ці системи одержали назву “Вентильний двигун” (рис. 3.69).

На рис. Т3.69. позначені: В - випрямляч; І - інвертор; СКІ, СКВ - системи керування інвертором і випрямлячем; СПР - сенсор положення ротора.

За допомогою випрямляча змінюється напруга на інверторі. Сенсор положення ротора створює зворотній зв'язок за кутом, що забезпечує включення вентилів інвертора в суворій відповідності з кутом повороту ротора. Цим забезпечується регулювання швидкості з

дотриманням співвідношення $\frac{U}{f} = \text{const}$.

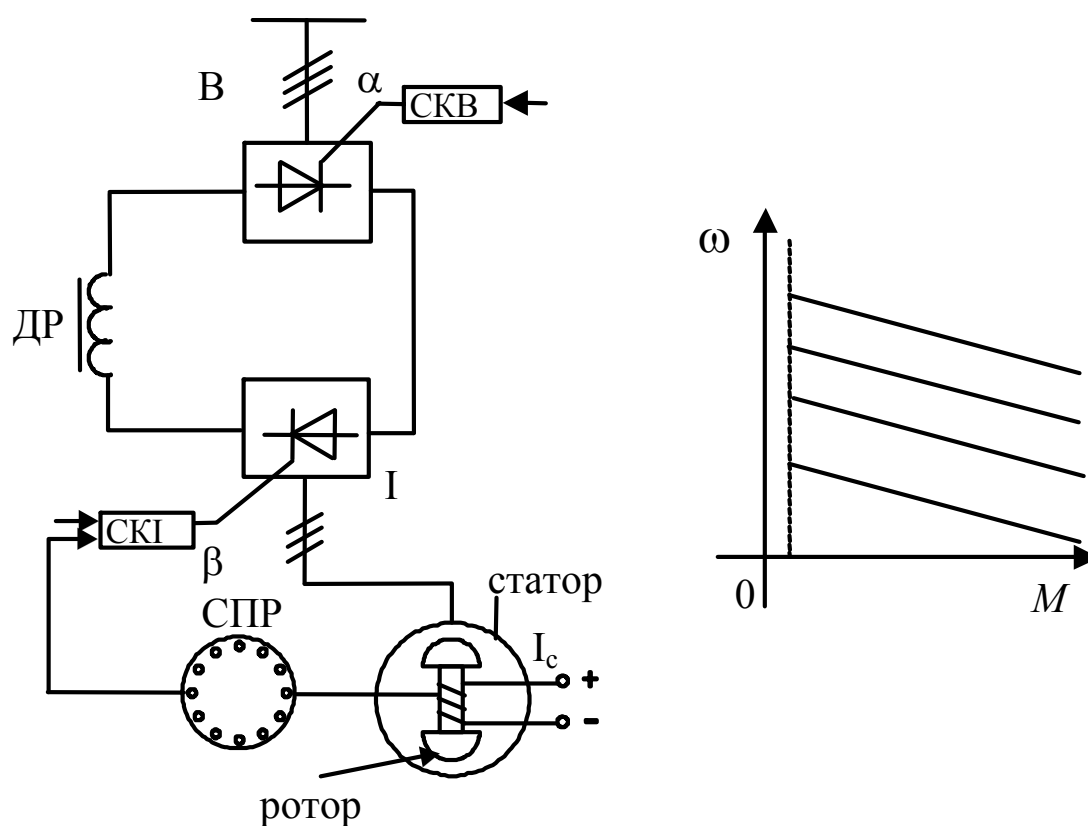


Рисунок Т3.69 - Регулювання швидкості обертання СД у системі Вентильний двигун і вид його характеристик

ТЗ.4.4. Способи пуску синхронного двигуна

Асинхронний пуск синхронного двигуна

Особливої уваги заслуговує режим пуску СД в асинхронному режимі, тобто здійснюється, як і пуск звичайних короткозамкнених АД. З цією метою на роторі є пускова (демпферна) обмотка у виді білячої клітки (рис 3.63). Але на відміну від АД пускова обмотка СД не розрахована на тривалу роботу в асинхронному режимі.

На період пуску обмотка збудження СД відключається від джерела постійного струму і замикається на додатковий опір $R_{\text{дод}}$ ($8 \div 10 R_{\text{оз}} = R_{\text{дод}}$). При цьому обмоткою збудження буде протікати однофазний змінний струм, що обумовлений появою ЕРС самоіндукції в ОЗ, яка наведена полем статора СД. Частота цього струму залежить від швидкості обертання ротора і відрізняється від частоти поля статора. Внаслідок цього струм в обмотці збудження створює своє магнітне поле і відповідну ЕРС в обмотці статора (відповідно і додаткові струми цієї частоти). Таким чином, режим асинхронного пуску СД можна розглядати як режим із не-симетрією у роторному колі АД. Реальна характеристика (4) для розглянутого способу пуску СД формується з декількох складових і наведена на рис. ТЗ.70.

Зменшення “провалу” на результуючій характеристиці, що може призвести до «застрягання» двигуна при пуску, досягається введенням додаткового опору $R_{\text{дод}}$.

Пускові характеристики при асинхронному пуску мають такий же вид, як і характеристики асинхронного двигуна і наведені на рис. ТЗ.71.

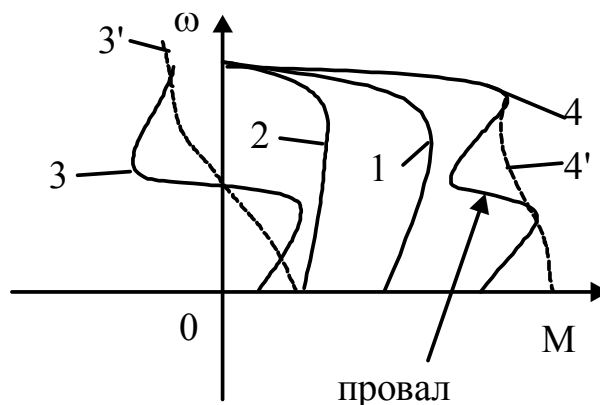


Рисунок Т3.70 - Формування пускової характеристики СД при асинхронному пуску: 1 - від пускової обмотки; 2,3 - від поля обмотки збудження (2 - від прямого поля ОВ, 3 - від зворотного поля ОВ); 4 - результуюча пускова характеристика

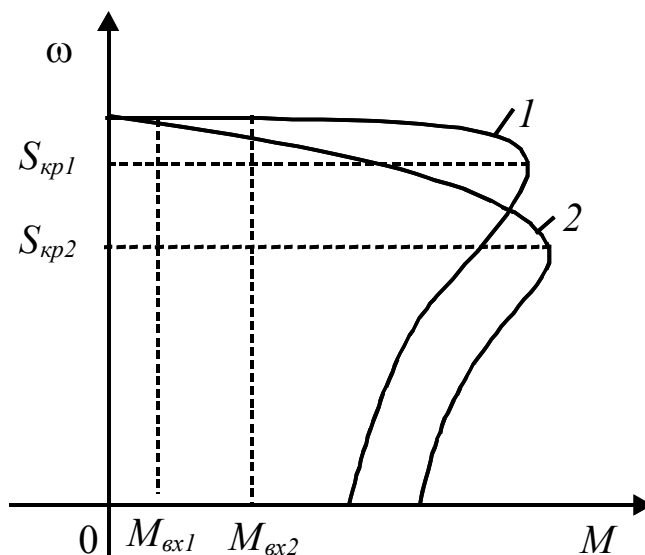


Рисунок Т3.71-Пускові характеристики СД при асинхронному пуску

При виході на під-синхронну швидкість $(95 \div 98\%) \omega_0$, двигун переводять у звичайний режим збудження: контакт **К** - розмикають, контакт **Л** - замикають. Момент $M_{вх}$ називають моментом входження в синхронізм.

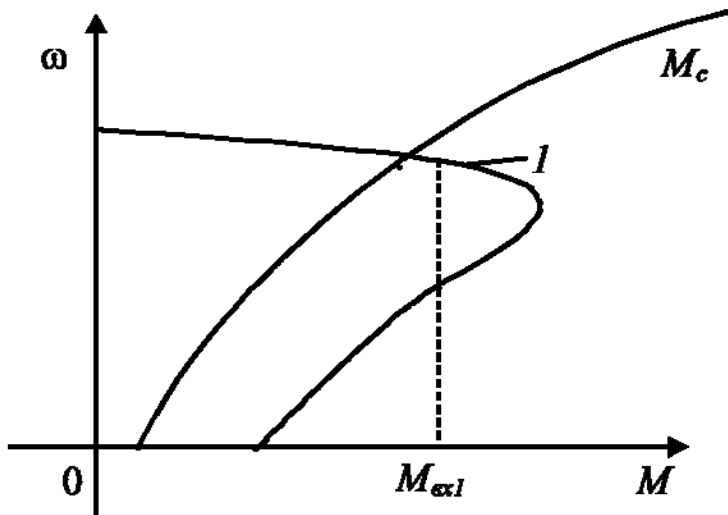


Рисунок Т3.72 - Асинхронний пуск СД із вентиляторним навантаженням на валу

Як видно з характеристик, при меншому пусковому моменті характеристика 1, якої відповідає $S_{кр1} < S_{кр2}$ (тобто $R_{рот}$ у першому випадку менше ніж $R_{рот}$ у другому), момент входження в синхронізм надається більшим, ніж для характеристики 2, що має більший пусковий момент. Ця властивість використовують стосовно до різноманітного характеру зміни $M_{нагр}$. Так, наприклад, для вентиляторного навантаження, що має нелінійно-зростаючий характер M_c , доцільно використовувати характеристику 1, як показано на рис. Т3.72.

Запуск СД із використанням тиристорних регуляторів у колі статора

Схема для запуску СД цим способом приведена на рис. Т3.73: На початок пуску контакт **К** замкнутий (контакт **Л** розімкнутий) на зовнішній опір, а напруга на статорі $U_{ж} = U_{min}$.

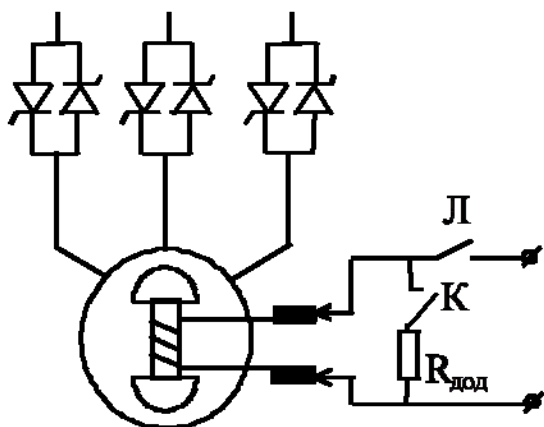


Рисунок Т3.73 - Запуск СД із використанням тиристорного регулятора

У результаті зміни кута керування α напруга $U_{ж}$, прикладена до статора зростає, і СД плавно розганяється в асинхронному режимі при регулюванні напруги.

До переваги цього способу можна віднести: менші пускові струми; відсутність ударних моментів;

можливість керованого, за часом пуску для тих робочих машин, де це необхідно (наприклад, турбокомпресорів).

Недоліком цього способу є те, що енергія ковзання виділяється в роторних колах і може призвести до перегріву вузлів машини. Тому пуск від регуляторів напруги повинен здійснюватися в системах, що мають систему контролю тепловиділення в роторі.

Запуск від спеціального пускового пристрою

На рис. Т3.74 наведений один із способів запуску СД у системі Г-Д за допомогою спеціального пускового пристрою.

Запуск СД здійснюється в такий спосіб. При відключеному від мережі СД із замкнутою на розрядний опір обмоткою збудження, він розкручується за допомогою МПС, що одержує живлення від окремого джерела (наприклад, тиристорного перетворювача). При досягненні під-синхронної швидкості $\omega_{сд} = \omega_{підсинхр}$ машину постійного струму відключають від джерела живлення, а обмотку статора СД підключають до мережі. При підключенні відбуваються процеси

самосинхронізації і втягування СД у синхронізм, після чого обмотка збудження СД підключається до джерела. При пуску СД ОЗ замикається на опір.

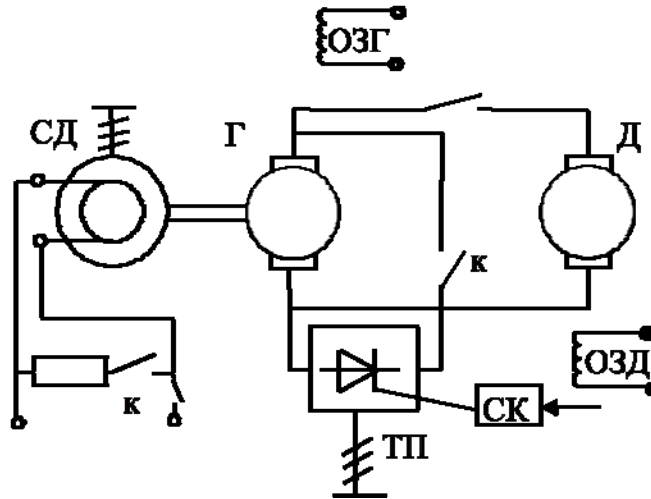


Рисунок ТЗ.74 - Запуск СД від спеціального пускового пристрою

Розглянутий режим пуску СД можливий тільки в системі Г-Д за наявності ДПС на одному валу з СД. Потужність джерела для живлення ДПС складає $5 \div 7 \% P_{сд}$. Пристрій запуску дозволяє здійснювати багатократні пуски після технологічних пауз і аварій, чим досягається ефект економії електроенергії (в окремих випадках до 20 %).

Контрольні запитання

1. Переваги та недоліки асинхронного двигуна.
2. Конструкція асинхронного двигуна.
3. Види асинхронних двигунів залежно від конструкції обмотки ротора.
4. Схеми з'єднання обмотки статора асинхронного двигуна та їх основні характеристики.
5. Від яких параметрів залежить синхронна швидкість асинхронного двигуна.

6. Ряд синхронних частот обертання в залежності від числа пар асинхронного двигуна.
7. Що таке ковзання асинхронного двигуна.
8. Як залежить ЕРС ротора та її частота від ковзання.
9. Як приводяться параметри ротора схеми заміщення асинхронного двигуна до статора.
10. Чому момент асинхронного двигуна чутливий до зниження напруги живлення.
11. Від чого залежить критичне ковзання та критичний момент асинхронного двигуна.
12. Вираз та застосування формули Клосса.
13. Вигляд механічної характеристики асинхронного двигуна та її характерні точки.
14. Вигляд електромеханічної характеристики асинхронного двигуна та її характерні точки.
15. При яких умовах асинхронний двигун має природну механічну характеристику.
16. Як обчислюється номінальне ковзання асинхронного двигуна.
17. Які є способи керування швидкістю асинхронного двигуна.
18. Чому напругу живлення асинхронного двигуна можна тільки зменшувати відносно номінальної в ході керування швидкістю.
19. Які основні закони скалярного частотного керування швидкістю асинхронного двигуна.
20. В чому переваги й недоліки скалярних частотних законів керування швидкістю асинхронного двигуна
21. В чому полягає принцип векторного керування асинхронним двигуном, його переваги та недоліки.
22. Які дві основні задачі необхідно вирішити в ході векторного

- керування асинхронним двигуном з опорним вектором поточкозчеплення ротора.
23. В чому переваги й недоліки каскадних схем керування швидкістю асинхронного двигуна.
 24. Як реалізується двозонне керування швидкістю асинхронного двигуна в системі подвійного живлення.
 25. В чому переваги й недоліки способу керування швидкістю асинхронного двигуна шляхом зміни числа пар полюсів.
 26. В чому переваги й недоліки способу керування швидкістю асинхронного двигуна шляхом зміни активного електричного опору кола ротора та статора.
 27. Як здійснюється реверс асинхронного двигуна.
 28. Які режими гальмування підтримує асинхронний двигун.
 29. Переваги та недоліки кожного режиму гальмування асинхронного двигуна.
 30. Як реалізуються режими гальмування в частотно-керованих асинхронних електроприводах.
 31. Динамічна модель асинхронного двигуна на основі лінеаризації робочої ділянки механічної характеристики прямою.
 32. Переваги та недоліки синхронного двигуна.
 33. Що таке кутова характеристика синхронного двигуна.
 34. Який вигляд має механічна характеристика синхронного двигуна.
 35. Чим визначається синхронний та реактивний момент синхронного двигуна.
 36. Які способи керування швидкістю застосовуються для синхронного двигуна.
 37. Які режими гальмування застосовуються в електроприводах з синхронним двигуном.

38. Динамічна модель синхронного двигуна на основі лінеаризації кутової характеристики прямою.
39. Що таке ковзання асинхронного двигуна і від чого воно залежить?
40. За якими характерними точками можна побудувати природну механічну характеристику асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором?
41. Назвіть способи електричного гальмування асинхронного двигуна.
42. Як здійснити рекуперативне гальмування, гальмування противмиканням і динамічне гальмування асинхронних двигунів?
43. Назвіть способи пуску асинхронних електродвигунів. До яких асинхронних двигунів застосовують пуск за допомогою автотрансформаторів?
44. Як змінюються пусковий струм і пусковий момент асинхронного двигуна при пуску з перемиканням обмоток статора із „зірки” на „трикутник”?
45. Назвіть можливі способи регулювання швидкості асинхронних двигунів.
46. Охарактеризуйте показники частотного регулювання швидкості асинхронних двигунів. Чому при частотному регулюванні разом із зміною частоти необхідно змінювати напругу і за яким законом?
47. Охарактеризуйте показники регулювання швидкості асинхронних двигунів зміною кількості пар полюсів?
48. Охарактеризуйте показники регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна зміною опору кола ротора.

Розділ П1. МЕХАНІКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА

П1.1. Основні розрахункові формули та співвідношення

Співвідношення між кутовою швидкістю і швидкістю обертання

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{60}$$

Потужність для обертального руху

$$P = M \cdot \omega$$

Потужність для поступального руху

$$P = F \cdot v$$

Кінетична енергія для обертального руху

$$W = \frac{J \cdot \omega^2}{2}$$

Кінетична енергія для поступального руху

$$W = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Приведення моменту M_1 на валу, що обертається зі швидкістю ω_1 , до валу, який обертається зі швидкістю ω через передавальний пристрій з ККД $= \eta_n$

$$M' = \frac{M_1 \cdot \omega_1}{\omega \cdot \eta_n}$$

Приведення зусилля F_1 , яке діє на тіло, що рухається

поступально зі швидкістю v_1 , до валу, який обертається з кутовою швидкістю ω через передавальний пристрій з ККД $=\eta_n$

$$F' = \frac{F_1 \cdot v_1}{\omega \cdot \eta_n}.$$

Приведення моменту інерції J_1 тіла, що обертається зі швидкістю ω_1 до валу, який рухається зі швидкістю ω

$$J' = J_1 \cdot \left(\frac{\omega_1}{\omega} \right)^2.$$

Приведення маси m_1 , що рухається з лінійною швидкістю v_1 , до валу, який рухається з кутовою швидкістю ω

$$J' = m_1 \cdot \left(\frac{v_1}{\omega} \right)^2.$$

Рівняння руху тіл, що рухаються поступально

$$\pm F \pm F' = m' \cdot \left(\pm \frac{\partial v}{\partial t} \right).$$

Рівняння руху електропривода

$$\pm M \pm M' = J' \cdot \left(\pm \frac{\partial \omega}{\partial t} \right).$$

Приблизне значення часу перехідного процесу в електроприводі

$$t_{\text{пн}} = J' \cdot \frac{\omega_{\text{кін}} - \omega_{\text{п.о.}}}{\pm M_{\text{сеп}} \pm M_{\text{с.сеп}}}.$$

Момент на осі колеса транспортного механізму '

$$M_M = m_B \cdot g \cdot \beta \cdot (\mu \cdot D_{\text{ц}} + f),$$

де m_B - маса транспортного механізму з вантажем, що припадає на привідне колесо, кг; β - коефіцієнт, що враховує тертя реборди колеса до рейки ($\beta = 1.3 \div 1.5$); $D_{\text{ц}}$ - діаметр цапфи колеса, м; f - коефіцієнт тертя ковзання.

Таблиця П.1. - Коефіцієнти тертя деяких змащених матеріалів

Матеріали, що труться		μ_0 при зупиненні	μ під час руху
Вальниці ковзання:	бронза по бронзі	0.11	0.06
	залізо по залізі	0.11	0.08 ÷ 0.1
	сталь по бронзі	0.105	0.09
	чавун по бронзі	0.15 ÷ 0.2	0.07 ÷ 0.08
Вальниці кочення:	ходових коліс	-	0.008
	роликів рольгангів	-	0.01 ÷ 0.015
	кранових редакторів	-	0.005

Таблиця П.2. - Коефіцієнти тертя кочення

Тип транспортних елементів	f, m
Ходові колеса кранових мостів і візків: добре оброблених і обкатаних	$(0.5 \div 0.8) \cdot 10^{-3}$
погано оброблених і не обкатаних	$(0.9 \div 1.0) \cdot 10^{-3}$
Залізничні колісні пари	$(0.15 \div 0.25) \cdot 10^{-3}$
Валики й кульки вальниць	$(0.01 \div 0.03) \cdot 10^{-3}$
Валики рольгангів	$(1.3 \div 1.5) \cdot 10^{-3}$
Автомобільні шини по асфальту	$(1.0 \div 2.5) \cdot 10^{-3}$

Таблиця П.3 - Моменти інерції тіл, які найчастіше зустрічаються у техніці

	Назва тіла	Момент інерції, кг-м
	Суцільний циліндр	$J = m \cdot D^2 / 8$ $J = \gamma \cdot \pi \cdot l \cdot D^4 / 32$
	Порожнистий циліндр	$J = m \cdot (D_в^2 + D_г^2) / 8$ $J = \gamma \cdot \pi \cdot l \cdot (D_в^4 - D_г^4) / 32$
	Стержень, що обертається навколо осі 0 – 0'	$J = m \cdot l^2 / 3$ $J = \gamma \cdot \pi \cdot l^3 \cdot D^2 / 12$
	Стержень, що обертається навколо осі 0 – 0' при $D < r$	$J = m \cdot r^2$ $J = \gamma \cdot \pi \cdot l \cdot D^2 \cdot r^2 / 4$
	Кільце	$J = m \cdot (D^2 + 0.75 \cdot d^2) / 4$ $J = \frac{\gamma \cdot \pi^2 \cdot (D^3 \cdot d^2 + D \cdot d^4)}{16}$
	Паралелепіпед	$J_{01} = m \cdot (a^2 + b^2) / 12$ $J_{01} = \gamma \cdot a \cdot b \cdot l \cdot \frac{(a^2 + b^2)}{12}$
	Паралелепіпед відносно зміщеної осі 02 – 02'	$J_{02} = J_{01} + m \cdot r^2$ $J_{02} = J_{01} + \gamma \cdot a \cdot b \cdot l \cdot r^2$

Таблиця П.4 - Коефіцієнти корисної дії механічних передач

Тип механічних передач	ККД
Циліндричні зубчасті	0.80 ÷ 0.99
Конічні зубчасті	0.97 ÷ 0.98
Черв'ячні	0.61 ÷ 0.82
Пасові	0.94 ÷ 0.98
Клинопасові	0.81 ÷ 0.98
Ланцюгові	0.97 ÷ 0.98
Фрикційні	0.71 ÷ 0.78
Цапфи опор	0.94 ÷ 0.98
Блоки	0.96 ÷ 0.97
Поліспасти	0.92 ÷ 0.98

П1.2. Приклади розв'язування задач

1.2.1. Визначити момент інерції J_1 чавунного шківa (рис.П1.1) з такими розмірами: $D_1 = 0.1$ м, $D_2 = 0.2$ м, $D_3 = 0.8$ м, $D_4 = 1.0$, $l_1 = 0.4$ м, $l_2 = 0.06$ м, $l_3 = 0.5$ м. Розрахувати момент інерції J_2 такого ж шківa, якщо його обід зробити з алюмінію, а всі інші частини - з чавуну. Порівняти, на скільки процентів зменшиться момент інерції шківa з алюмінієвим ободом. Питома маса чавуну $\gamma_b = 7800$ кг/м³, а алюмінію - $\gamma_a = 2500$ кг/м³.

Розв'язок:

Момент інерції чавунного шківa з алюмінієвим ободом

$$J_1 = \frac{\pi \cdot \gamma_b}{32} (l_1(D_4^4 - D_3^4) + l_2(D_3^4 - D_2^4) + l_3(D_2^4 - D_1^4));$$

$$J_1 = \frac{3,14 \cdot 7800}{32} (0,4(1^4 - 0,8^4) + 0,06(0,8^4 - 0,2^4) + 0,5(0,2^4 - 0,1^4)) = 200 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

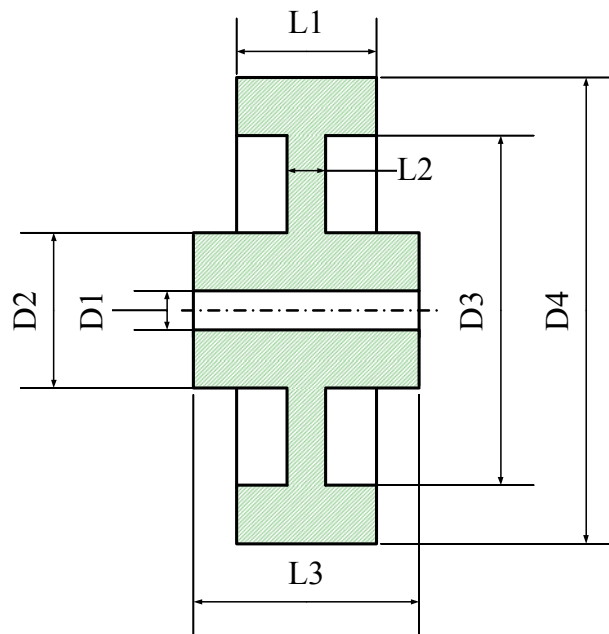


Рисунок ПІ.1 – Конструкція чавунного шківa

Момент інерції чавунного шківa з алюмінієвим ободом

$$J_2 = \frac{\pi}{32} (Y_a \cdot l_1 (D_4^4 - D_3^4) + Y_b \cdot l_2 (D_3^4 - D_2^4) + Y_b \cdot l_3 (D_2^4 - D_1^4))$$

$$J_1 = \frac{3,14 \cdot}{32} (2500 \cdot 0,4(1^4 - 0,8^4) + 7800 \cdot 0,06(0,8^4 - 0,2^4) + 7800 \cdot 0,5(0,2^4 - 0,1^4)) = 77,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

У процентному відношенні

$$(J_1 - J_2) \frac{100\%}{J_1} = (200 - 77,2) \frac{100\%}{200} = 61,4\%$$

Момент інерції шківa з алюмінієвим ободом буде на 61,4 % менший від повністю чавунного.

1.2.2 Визначити приведені до валу двигуна статичний момент і момент інерції механізму підіймача (рис. ПІ.2) при підйманні вантажу масою 1300 кг з швидкістю $V = 1,7$ м/с. Двигун обертається з кутовою швидкістю $\omega = 97$ рад/с. Діаметр барабана $D_6 = 0,65$ м,

момент інерції $J_6 = 8.1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Коефіцієнт корисної дії (ККД) передач $\eta = 0.82$. Момент інерції редуктора, приведений до валу двигуна, $J_p = 0.12 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Масою троса можна знехтувати.

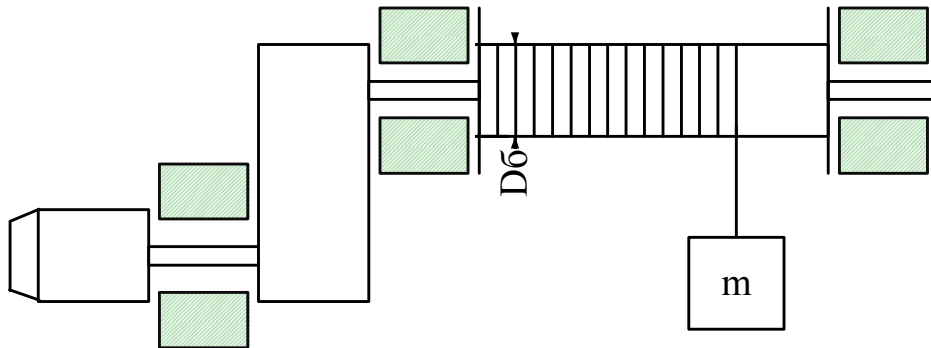


Рисунок П1.2 – Конструктивна схема механізму підіймача

Розв'язок:

Статичний момент, приведений до валу двигуна, при підйманні вантажу

$$M_c = \frac{m \cdot g \cdot v}{\omega_d \cdot \eta}$$

$$M_c = \frac{1300 \cdot 9.81 \cdot 1.7}{97 \cdot 0.82} = 5.23 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Кутова швидкість барабана

$$\omega_d = \frac{2v}{D_6}$$

$$\omega_d = \frac{2 \cdot 1.7}{0.65} = 5.23 \text{ рад/с}$$

Передавальне число передач

$$i_p = \frac{\omega_d}{\omega_6}$$

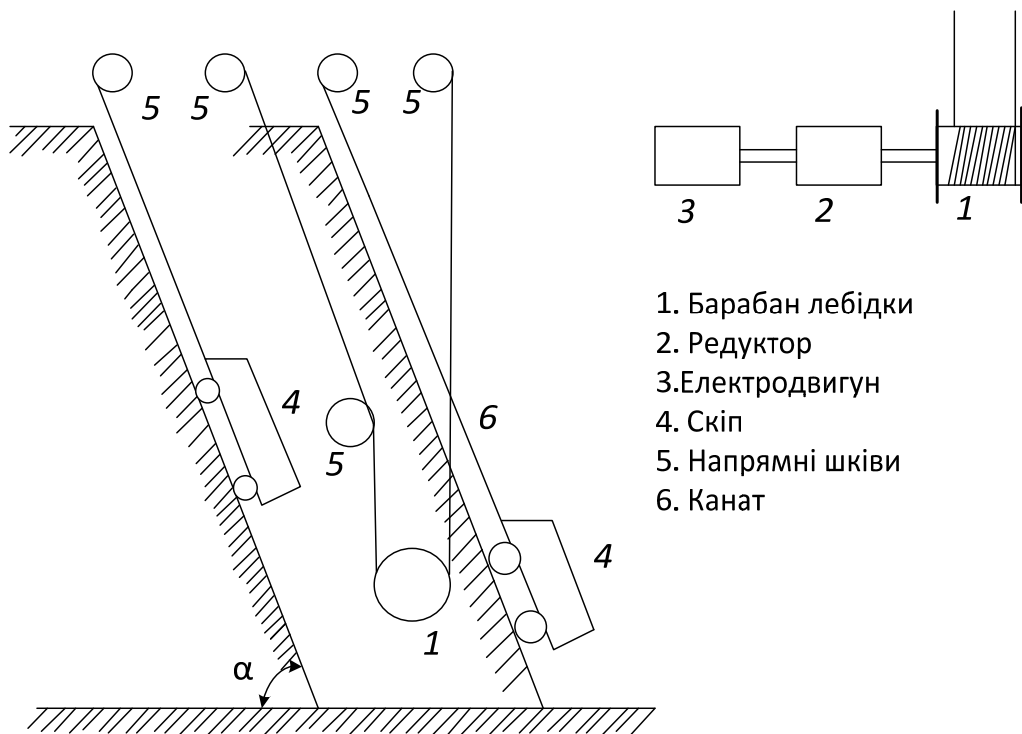
$$i_p = \frac{97}{5.23} = 18.54$$

Момент інерції механізму, приведений до валу двигуна

$$J_{\text{пр}} = J_p + \frac{J_0}{i_p^2} + m \frac{v^2}{\omega_d^2}$$

$$J_{\text{пр}} = 0.12 + \frac{8.1}{18.54^2} + 1300 \frac{1.7^2}{97} = 0.534 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

1.2.3. Для електроприводу двоскіпового підйомника (рис. ПІ.3) розрахувати момент двигуна, необхідний для забезпечення рівноприскореного руху скіпа з прискоренням $\alpha = 0.6 \text{ м/с}^2$, якщо відомі такі величини: маса вантажу $m_v = 9000 \text{ кг}$; маса порожнього скіпа $m_c = 7000 \text{ кг}$; момент інерції привідного двигуна $J_d = 4.5 \text{ кг} \times \text{м}^2$; момент інерції барабана $J_b = 1200 \text{ кг} \times \text{м}^2$; момент інерції одного напрямного шківа $J_{\text{ш}} = 1000 \text{ кг} \times \text{м}^2$; кількість шківів $n_{\text{ш}} = 6$; момент інерції редуктора, приведений до валу двигуна, $J_p = 4.0 \text{ кг} \times \text{м}^2$; маса канатів $= 2300 \text{ кг}$; діаметр барабану лебідки $D_b = 2.0 \text{ м}$; діаметр шківа $D_{\text{ш}} = 1.8 \text{ м}$; передавальне число редуктора $i = 25$; ККД підйомника $\eta = 0.7$; кут нахилу руху скіпа $\alpha = 45^\circ$.



1. Барабан лебідки
2. Редуктор
3. Електродвигун
4. Скіп
5. Направні шківи
6. Канат

Рисунок ПІ.3 - Конструктивна схема двоскіпового підйомника

Коефіцієнт, що враховує всі сили тертя на поверхні переміщення скіпів, прийняти рівним $k_T = 0.05$.

Розв'язок:

Сила натягу канату від ваги завантаженого скіпа

$$F_{зв} = (m_{ск} + m_в) \times g \times \sin \alpha; F_{зв} = (9 + 7) \times 10^3 \times 9.81 \times \sin 45^\circ = 111 \times 10^3 \text{ Н.}$$

Сила тиску на поверхню руху

$$N_{зв} = (m_{ск} + m_в) \times g \times \sin \alpha; N_{зв} = (9 + 7) \times 10^3 \times 9.81 \times \sin 45^\circ = 111 \times 10^3 \text{ Н.}$$

Сила тертя від тиску завантаженого скіпа

$$F_{T1} = k_T \times N_{зв}; F_{T1} = 0.05 \times 111 \times 10^3 \text{ Н.}$$

Сумарне статичне зусилля на підйомному кінці канату

$$F_1 = F_{зв} + F_{T1}; F_1 = (111 + 5.6) \times 10^3 = 116.6 \times 10^3 \text{ Н.}$$

Сила натягу канату від ваги порожнього скіпа

$$F_{п} = m_{ск} \times g \times \sin \alpha; F_{п} = 7 \times 10^3 \times 9.81 \times \sin 45^\circ = 48.5 \times 10^3 \text{ Н.}$$

Сила тертя від тиску порожнього скіпа

$$F_{T2} = k \times F_{п}; F_{T2} = 0.05 \times 48.5 \times 10^3 = 2.4 \times 10^3 \text{ Н.}$$

Сумарне статичне зусилля на збігаючому кінці канату

$$F_2 = F_{п} - F_{T2}; F_2 = (48.5 - 2.4) \times 10^3 = 46.1 \times 10^3 \text{ Н.}$$

Результуюче зусилля на ободі барабана

$$F_{рез} = F_1 - F_2; F_{рез} = (116.6 - 46.1) \times 10^3 = 71.5 \times 10^3 \text{ Н.}$$

Статичний момент опору, приведений до валу двигуна

$$M = \frac{71.5 \cdot 10 \cdot 2}{2 \cdot 25 \cdot 0.7} = 4085.7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Приведений до валу двигуна момент інерції привода

$$J_{пр} = J_{д} + J_{р} + J_{б} / i^2 + n_{шк} \times J_{шк} \times (D_{б} / D_{шк})^2 / i^2 + (2 \times m_{ск} + m_в + m_{к}) \times 10^3 / i^2$$

$$J_{\text{пр}} = 4.5 + 4 + 1200 / 25^2 + 6 \times 1000 \times (2 / 1.8)^2 / 25^2 + \\ + (2 \times 7 + 9 + 2.3) \times 10^3 / 25^2 = 62.77 \text{ кг} \times \text{м}^2;$$

Кутове прискорення двигуна

$$\varepsilon = a \times i; \varepsilon = 0.6 \times 25 = 15 \text{ рад/с}^2.$$

Момент двигуна, який забезпечить рівноприскорений рух скіпа

$$M = M_c + J_{\text{пр}} \times \varepsilon; M = 4085.7 + 62.77 \times 15 = 5027 \text{ Н} \times \text{м}.$$

1.2.4. Визначити, як буде змінюватись швидкість і амплітуда коливань підвішеного вантажу при розгоні візка крана (рис. ПІ.4), та величина моменту, який повинен розвивати двигун, щоб зменшити амплітуду коливань вантажу в два рази.

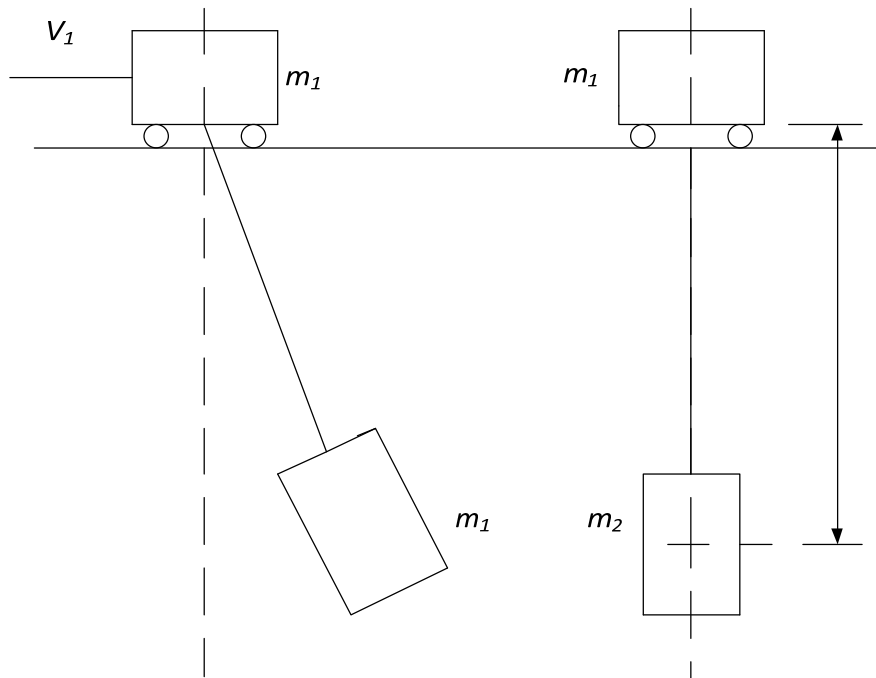


Рисунок. ПІ.4 - Конструктивна схема візка крана

Вихідні дані для розрахунків: маса візка $m = 7000 \text{ кг}$; маса вантажу $m^2 = 14000 \text{ кг}$; довжина підвіски $l_1 = 4.0 \text{ м}$; жорсткість 1 м канату $c = 5 \times 10^5 \text{ Н}$; момент інерції двигуна і зв'язаних з ним обертальних частин $J_{\text{пр}} = 0.3 \text{ кг} \times \text{м}^2$; передавальне число редуктора $i = 20$; діаметр ходового колеса візка $D_k = 0.5 \text{ м}$; середній момент

двигуна $M_{дс} = 100 \text{ Н} \times \text{м}$; момент статичного опору $M_c = 30 \text{ Н} \times \text{м}$.
Втратами в передачах знехтувати.

Розв'язок:

Розрахункова модель, виконана відносно лінійної швидкості V , наведена на рис. П1.5.

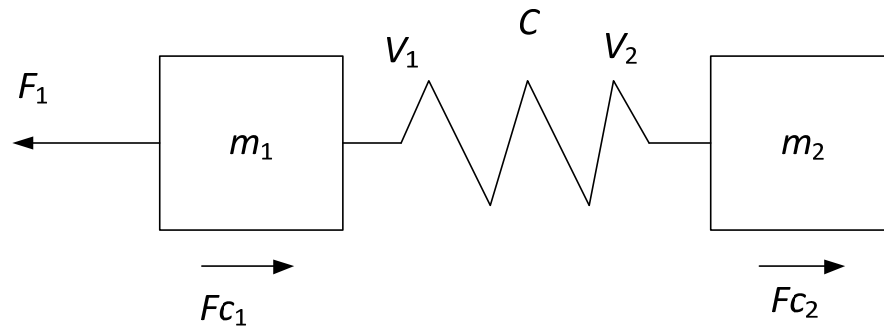


Рисунок П1.5 - Розрахункова модель візка крана

Радіус приведення параметрів

$$\rho = \frac{D_k}{2 \times i}; \quad \rho = \frac{0.5}{2 \times 20} = 0.0125 .$$

Приведене зусилля від моменту двигуна

$$F = \frac{M_{дс}}{\rho}; \quad F = \frac{100}{0.0125} = 8000 \cdot \text{Н}$$

Приведене зусилля від статичного моменту

$$F_c = \frac{M_c}{\rho}; \quad F_c = \frac{30}{0.0125} = 2400 \cdot \text{Н}$$

Приведена маса двигуна

$$m_{дзв} = \frac{J_{пр}}{\rho^2}; \quad m_{дз} = \frac{0.3}{0.0125^2} = 2 \times 10^3 \text{ кг}$$

Сумарні приведені маси

$$\sum m = m_{дзв} + m_B + m_2; \quad \sum m = 2000 + 7000 + 14000 = 23 \times 10^3;$$

$$m_1 = m_{д.зв} + m_B;$$

$$m_1 = 2000 + 7000 = 9 \times 10^3 \text{ кг.}$$

$$a = \frac{F - F_c}{\sum m};$$

$$a = \frac{8000 - 2400}{23000} = 0.24 \text{ м/с}^2$$

Середнє значення прискорення

$$\Omega = \sqrt{\frac{c_K \times \sum m_i}{m_1 \times m_2}};$$

$$\Omega = \sqrt{\frac{25 \times 10^3 \times 23 \times 10^3}{9 \times 10^3 \times 14 \times 10^3}} = 2.1 \cdot 1/\text{с}$$

$$c_K = \frac{c}{l_1};$$

$$c_K = \frac{10^5}{4} = 25 \times 10^3 \text{ Н/м}$$

Частота коливань

Швидкість переміщення

$$v_2 = a \times t - (a/\Omega) \times \sin \Omega t;$$

$$v_2 = 0.24 \times t - 0.114 \times \sin 2.1t.$$

Величина відхилення вантажу

$$\Delta s = \int v_1 dt - \int v_2 dt = -\frac{a \times m_2}{c_K} \cos \Omega t$$

Амплітуда відхилень

$$|A| = \frac{a \times m^2}{c_K}$$

$$|A| = \frac{0.25 \times 14 \times 10^3}{25 \times 10^3} = 0.14 \cdot \text{м}$$

1.2.5. Розрахувати момент інерції колінчатого валу з маховиком (рис. ПІ.6), якщо питома вага їх матеріалу $7,8 \text{ т/м}^3$, а число монтажних отворів у маховику 4.

Розв'язок:

Всі розрахунки виконують відносно осі обертання колінчатого валу. За вихідні величини приймають: L – довжина даного елемента і R_i – його радіуси.

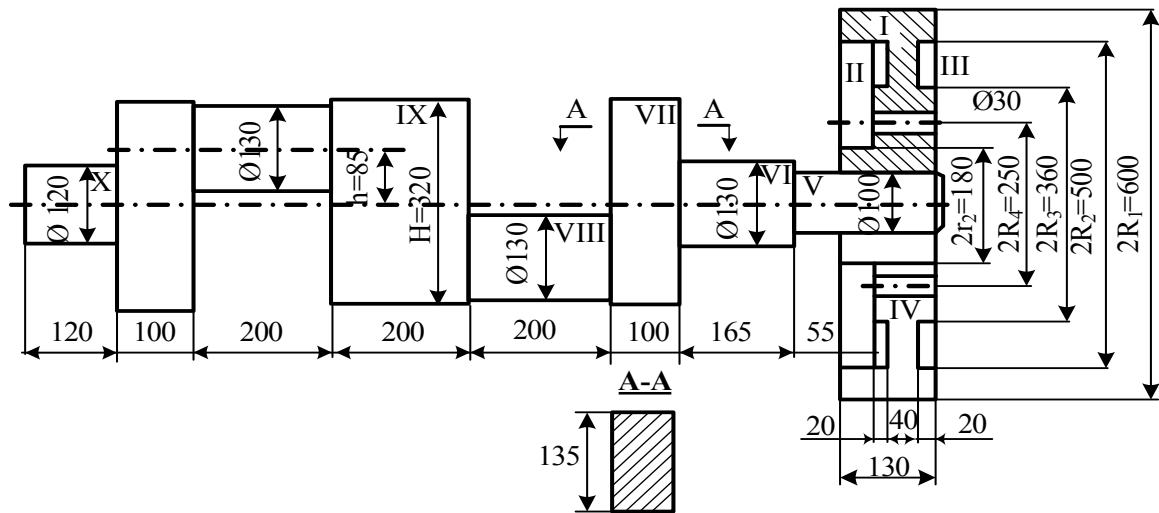


Рисунок П1.6 – Конструкція колінчатого валу з маховиком

Розрахунок моменту інерції маховика:

Спільний момент інерції маховика складається з: моменту інерції маховика як полого циліндра

$$J_1 = \frac{\pi \gamma L}{2} (R_1^4 - r_1^4) \cdot 10^3,$$

$$J_1 = \frac{3,14 \cdot 7,8 \cdot 0,13}{2} (0,3^4 - 0,05^4) \cdot 10^3 = 12,75 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент інерції великої виїмки II

$$J_{II} = \frac{\pi \gamma L}{2} (R_1^4 - r_1^4) \cdot 10^3,$$

$$J_{II} = \frac{3,14 \cdot 7,8 \cdot 0,05}{2} (0,25^4 - 0,09^4) \cdot 10^3 = 2,28 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент інерції малих виїмок III

$$J_{III} = \frac{2\pi \gamma L}{2} (R_2^4 - R_3^4) \cdot 10^3,$$

$$J_{III} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 7,8 \cdot 0,02}{2} (0,25^4 - 0,18^4) \cdot 10^3 = 1,33 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Моменти інерції чотирьох монтажних отворів IV

$$J_{IV} = \frac{4\pi\gamma L \left(\frac{d_4}{2}\right)^2}{2} \left(R_4^2 + \frac{d_4^2}{8}\right) \cdot 10^3$$

$$J_{IV} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 7,8 \cdot 0,08 \cdot \left(\frac{0,03}{2}\right)^2}{2} \left(0,125^2 + \frac{0,03^2}{8}\right) \cdot 10^3 = 0,0138 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Спільний момент інерції маховика

$$J_M = J_1 - J_2 - J_3 - J_4,$$

$$J_M = 12,75 - 2,28 - 1,33 - 0,0138 = 9,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Розрахунок моменту інерції колінчатого валу:

Момент інерції колінчатого валу складається з: моменту інерції кінця валу V під маховик

$$J_V = \frac{\pi\gamma L}{2} r_1^4 \cdot 10^3,$$

$$J_V = \frac{3,14 \cdot 7,8 \cdot 0,185}{2} \cdot 0,05^4 \cdot 10^3 = 0,0142 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент інерції валу VI

$$J_{VI} = \frac{3,14 \cdot 7,8 \cdot 0,165}{2} \cdot 0,065^4 \cdot 10^3 = 0,0348 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент інерції колінчатого переходу VII

$$J_{VII} = \gamma b H L \frac{b^2 + H^2}{12} \cdot 10^3$$

де b – глибина переходу ($b = 135$ мм),

$$J_{VII} = 7,8 \cdot 0,135 \cdot 0,32 \cdot 0,1 \cdot \frac{0,135^2 + 0,32^2}{12} \cdot 10^3 = 0,344 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент інерції валу шатуна VIII

$$J_{VIII} = \pi \gamma L r^2 \left(h^2 + \frac{r^2}{2} \right) \cdot 10^3,$$

$$J_{VIII} = 3,14 \cdot 7,8 \cdot 0,2 \cdot 0,065^2 \left(0,085^2 + \frac{0,065^2}{2} \right) \cdot 10^3 = 0,196 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент інерції підсиленого колінчатого переходу IX

$$J_{IX} = 2J_{VII},$$

$$J_{IX} = 2 \cdot 0,344 = 0,688 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент інерції останньої ділянки валу X

$$J_X = \frac{3,14 \cdot 7,8}{2} \cdot 0,12 \cdot 0,06^2 \cdot 10^3 = 0,0196 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Спільний момент інерції колінчатого валу

$$J_B = J_5 + J_6 + 2J_7 + 2J_8 + J_9 + J_{10},$$

$$J_B = 0,0142 + 0,0348 + 2 \cdot 0,344 + 2 \cdot 0,196 + 0,688 + 0,0196 = 1,836 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Спільний момент інерції колінчатого валу з маховиком

$$J = J_M + J_B,$$

$$J = 9,1 + 1,836 \approx 10,9 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

1.2.6. Визначити момент інерції привода з двигуном постійного струму типу П-22 із незалежним збудженням на основі номінальних ($P_{\text{ном}} = 1 \text{ кВт}$, $n_{\text{ном}} = 1500 \text{ об/хв}$, $I_{\text{ном}} = 12 \text{ А}$, $U_{\text{ном}} = 110 \text{ В}$, $R_{\text{я}} = 1,08 \text{ Ом}$) та дослідних даних, представлених у таблиці 1.1 та 1.2.

Таблиця 1.1 – Номінальні дослідні дані

U, В	I _в , А	n, об/хв.	P ₀ =U·I ₀ , Вт	ΔP _{вр} =P ₀ -I ₀ ² , Вт
10	0,6	120	6	5,6
20	0,6	270	12	11,6
30	0,65	395	19,5	19
40	0,7	510	28	27,5
50	0,75	660	37,5	36,9
60	0,8	800	48	47,3
70	0,85	930	59,5	58,7
80	0,95	1090	76	75
90	0,95	1220	85,5	84,5
100	1	1370	100	98,9
105	1	1450	105	103,9

Таблиця 1.2 – Номінальні дослідні дані

t, с	0	5	10	15	20	25	30	35	40
n, об/хв.	1480	1340	1230	1110	1000	900	780	690	590
t, с	45	50	55	60	65	70	75	80	85
n, об/хв	500	410	330	250	170	110	50	10	0

Розв'язок:

За даними табл. 1.1 і 1.2 будують криві $\Delta P_{\text{вр}} = f(n)$ і $\Delta P_{\text{вр}} = f(t)$ (рис ПІ.7).

Потім на основі цих кривих отримують залежність $\Delta P_{\text{вп}} = f(t)$ (рис. П1.8) і визначають площу A , обмежену цією кривою та осями координат.

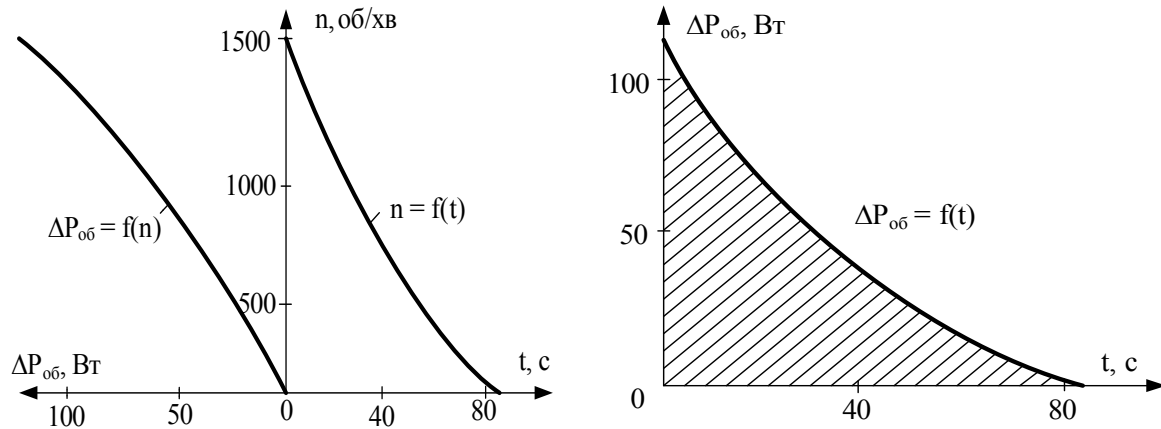


Рисунок. П1.7- Залежність $\Delta P_{\text{вп}} = f(t)$ Рисунок. П1.8 - Залежність $\Delta P_{\text{вп}} = f(t)$

Площа A чисельно дорівнює енергії (роботі), використаній на подолання втрат у період гальмування

$$A = 3170 \text{ Дж.}$$

Момент інерції привода з двигуном

$$J = 180 \frac{A}{n^2} = 180 \cdot \frac{3170}{1480^2} = 0,268 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

1.2.7. Робочий механізм з'єднаний з редуктором за допомогою довгого валу, який має жорсткість $c_{12} = 3 \cdot 10^5 \text{ Н м/рад}$. Коефіцієнт в'язкого тертя передачі $c_{12} = 2 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}$; момент інерції механізму $J_M = 420 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; момент інерції двигуна з редуктором $J_1 = 1.2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; передавальне число привода $i_p = 20$; ККД передач $\eta = 0.9$. Момент статичного навантаження механізму $M_M = 2700 \text{ Н} \cdot \text{м}$; момент, який

розвиває двигун під час розгону, вважати постійним і рівним $M_{п} = 350 \text{ Н м}$.

Визначити закон зміни моменту, що передається через гнучкий вал та порівняти максимальні значення моментів з врахуванням і без врахування в'язкого тертя.

Розв'язок:

Середнє кутове прискорення на валу

$$\varepsilon_{\text{сер}} = \frac{M_{п} \cdot i_{п} - M_{м} / \eta_{п}}{J_{1} \cdot i_{п}^2 + J_{м}}; \quad \varepsilon_{\text{сер}} = \frac{350 \cdot 20 - 2700 / 0.9}{1.2 \cdot 20^2 + 420} = 4.4 \text{ рад/с}^2.$$

Частота коливань моменту при відсутності в'язкого тертя

$$\Omega = \sqrt{c_{12} \cdot (J_{1} \cdot i_{п}^2 + J_{м}) / (J_{1} \cdot i_{п}^2 \cdot J_{м})};$$

$$\Omega = \sqrt{3 \cdot 10^5 \cdot (1.2 \cdot 20^2 + 420) / (1.2 \cdot 20^2 \cdot 420)} = 36.61 / \text{с}.$$

Коефіцієнт затухання

$$\alpha = \beta_{12} \cdot \Omega^2 / 2 \cdot c_{12}; \quad \alpha = 2 \cdot 10^3 \cdot 36.6^2 / 2 \cdot 3 \cdot 10^5 = 4.471 / \text{с}.$$

Частота коливань моменту при наявності в'язкого тертя

$$\Omega_0 = \sqrt{\Omega^2 - \alpha^2}; \quad \Omega_0 = \sqrt{36.6^2 - 4.47^2} = 36.51 / \text{с}.$$

Закон зміни моменту, що передається через гнучкий вал

$$M_{в} = M_{м} + J_{м} \cdot \varepsilon_{\text{сер}} - J_{м} \cdot \varepsilon_{\text{сер}} \cdot e^{-t} \cdot ((\alpha \cdot \sin \Omega_0 t) / \Omega_0 + \cos \Omega_0 t);$$

$$M_{в} = 2700 + 420 \cdot 4.4 - 420 \cdot 4.4 \cdot e^{-4.47t} \cdot (X);$$

$$\text{де: } (X) = ((4.47 \cdot \sin 36.5t) / 36.5 + \cos 36.5t).$$

Максимальне значення моменту за відсутності в'язкого тертя

$$M_{в0} = 2700 + 420 \cdot 4.4 + 420 \cdot 4.4 = 6396 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Максимальне значення моменту при наявності в'язкого тертя буде, якщо

$$\Omega_{0t} = \pi, \text{ тобто при } t = \pi/36.5 = 0.086 \text{ с.}$$

$$M_{\text{ВВТ}} = 2700 + 420 \cdot 4.4 + 420 \cdot 4.4 \cdot e^{-0.384} = 5812 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Співвідношення моментів $k_M = M_{\text{ВВТ}}/M_{\text{В0}}$

$$k_M = 5812/6396 = 0.909.$$

Максимальне значення моменту за наявності в'язкого тертя зменшиться на 91 %.

П1.3. Задачі для самостійного розв'язку

1.3.1. Визначити момент інерції J сталевого ротора (рис. П1.9) з такими розмірами: $L = 0.6$ м, $D_1 = 6.9$ м, $D_2 = 0.2$ м, $L_1 = 0.6$ м. Питома маса $\gamma = 7800$ кг/м³.

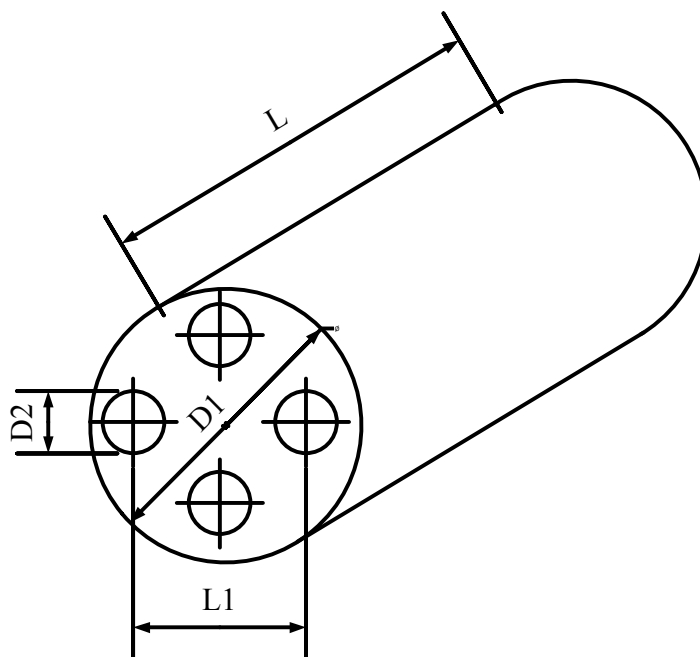


Рисунок П1.9 – Конструкція сталевого ротора

1.3.2 У скільки разів зменшиться момент інерції ротора двигуна, якщо його діаметр D зменшити, а довжину l збільшити у два рази. Будемо вважати ротор суцільним однорідним циліндром.

1.3.3. Розрахувати момент інерції шківів зі шпицями $n = 12$, зображеного на рис. П1.10. Матеріал маховика – сталь з питомою вагою $\gamma = 7,8 \text{ т/м}^3$.

Відповідь: $J_{пр} = 23,3 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

1.3.4. Визначити момент інерції шестерні, яка зображена на рис. П1.11. Матеріал шестерні – чавун з питомою вагою $\gamma = 7,2 \text{ т/м}^3$.

Відповідь: $J = 25 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Рисунок. П1.10 - Шків зі шпицями

Рисунок. П1.11 - Шестерня

1.3.5 Визначити приведений до валу двигуна сумарний момент інерції $J_{пр}$ механізму підіймача і ротора привідного двигуна (рис. П1.12), якщо при вимкненому двигуні без гальма вантаж з масою 1000 кг опускається за 8 с на 10 м. Маса вантажу, який потрібний для подолання втрат механізму,

складає 400 кг. Допустити, що втрати в механізмі не залежать від швидкості. Діаметр барабана $D = 0.5$ м, передавальне число редуктора $i = 15$.

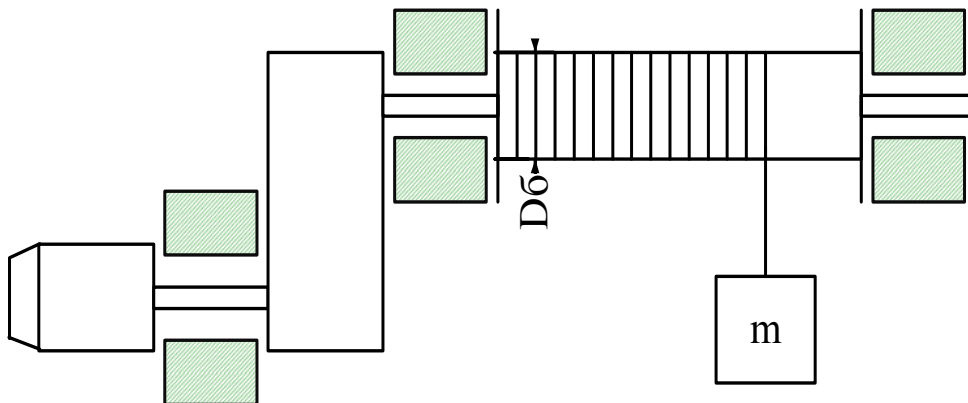


Рисунок П1.12 – Конструкція механізму підіймача.

1.3.6 Визначити величину статичного моменту M_c на валу двигуна і приведений до валу двигуна момент інерції $J_{пр}$ механізму лебідки з вантажем (рис.П1.13). Маса вантажу $m = 700$ кг, швидкість підіймання вантажу $V = 1.2$ м/с, швидкість обертання привідного двигуна $n = 975$ об/хв, діаметр барабана $D_δ = 0.5$ м, момент інерції барабана

$J_δ = 3.6$ кг · м², ККД механізму передач $\eta = 0.85$. Моментом інерції редуктора і масою троса знехтувати.

1.3.7. Для кінематичної схеми (рис.П1.13) визначити статичний момент на валу двигуна при підніманні M_{c1} та опусканні M_{c2} вантажу і приведений до валу двигуна момент інерції механізму лебідки з вантажем. Маса вантажу 12000 кг, швидкість підіймання вантажу $V = 0.5$ м/с. швидкість обертання двигуна $n = 1430$ об/хв, ККД передач при підійманні та опусканні $\eta = 0.85$. Масами крюка і троса можна знехтувати. Діаметр барабана $D_δ = 0.5$ м, його момент інерції $J_δ = 2.94$ кг · м². Момент інерції редуктора, приведений до вала двигуна, $J_p = 0.92$ кг · м².

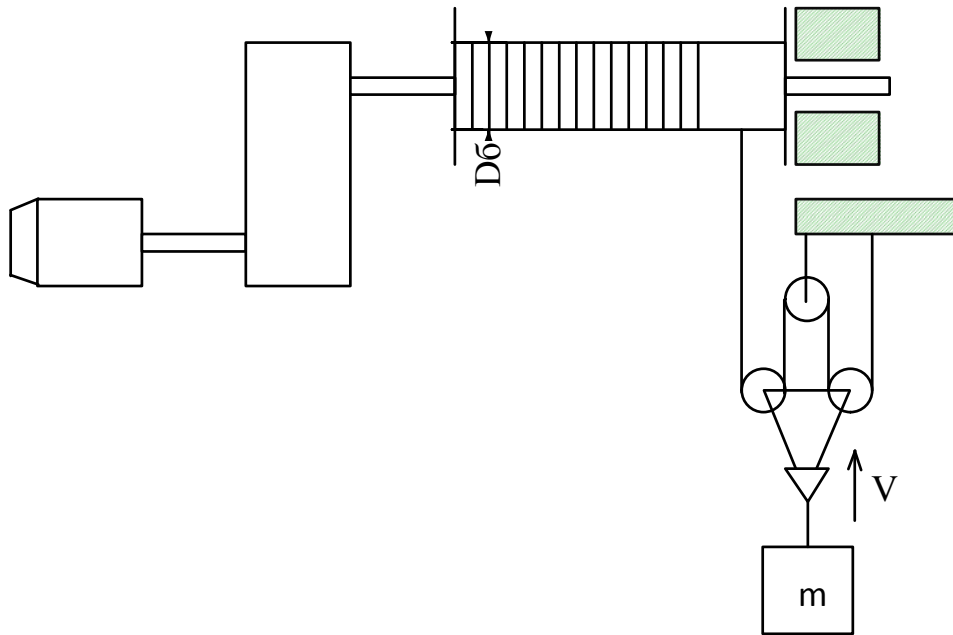


Рисунок П1.13 - Конструкція механізму лебідки з вантажем

1.3.8. Визначити приведені до валу двигуна статичний момент M_c і момент інерції J_m механізму переміщення (рис. П1.14) .

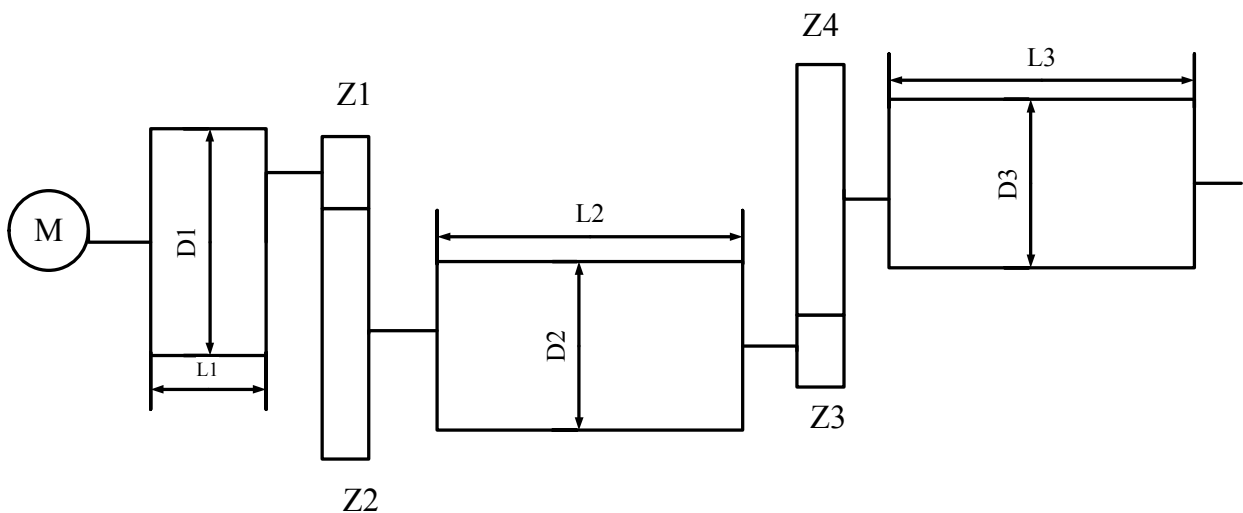


Рисунок П1.14 - Конструкція механізму переміщення

Діаметри валків $D_1 = 0.4$ м, $D_2 = 0.5$ м; довжина валків $L_1 = 0.8$ м, $L_2 = 1.2$ м. Діаметр маховика $D_3 = 1.5$ м, довжина $L_3 = 0.2$ м. Валки та маховик зроблені суцільними із сталі з питомою масою 7800

кг/м². Зусилля на ободі валка 1 $F_1 = 2000$ Н, на ободі валка 2 $F_2 = 14000$ Н. Передавальне число першого редуктора $i_1 = 2.33$, другого редуктора $i_2 = 2.25$; ККД першого редуктора $\eta = 0.87$, другого редуктора - $\eta = 0.91$. Швидкість обертання привідного двигуна $n_d = 730$ об/хв. Моментом інерції редукторів знехтувати.

1.3.9. Визначити момент, який повинен розвивати привідний двигун лебідки (рис. 1.13), та зусилля в тросі при підйманні та опусканні вантажу масою 8000 кг з прискоренням 2.1 м/с. Передавальне число редуктора $i = 15$, діаметр барабана $D_\delta = 0.8$ м. Момент інерції двигуна $J_\delta = 4,65$ кг . м², швидкість обертання двигуна $n_d = 950$ об/хв, ККД передач $\eta = 0.85$.

1.3.10. Визначити момент M_d , який повинен розвивати двигун лебідки (рис. 1.13) при підйманні вантажу з прискоренням 1.25 м/с². Статичний момент, приведений до валу двигуна, $M_c = 200$ Н .м. Момент інерції лебідки з вантажем, приведений до валу двигуна, $J_\delta = 0.75$ кг . м², момент інерції ротора привідного двигуна $J_d = 1.75$ кг . м². Діаметр барабана лебідки $D_\delta = 0.5$ м. Передавальне число редуктора $i = 6 . 8$.

1.3.11. Визначити приведений до валу двигуна статичний момент M_c та момент інерції $J_{мпр}$ механізму горизонтально-стругального верстату й деталі, що на ньому обробляється, (рис. 1.15). Маса стола $m_c = 3000$ кг, маса деталі $m_\delta = 600$ кг, зусилля різання $F = 20000$ Н, швидкість різання $V = 0.17$ м/с, коефіцієнт тертя стола до направляючих $\mu = 0.1$. Діаметр колеса восьмої Шестерні $D_8 = 0.5$ м, кількість зубців шестерень: $Z_1 = 15$, $Z_2 = 47$, $Z_3 = 46$, $Z_4 = 58$, $Z_5 = 18$, $Z_6 = 58$, $Z_7 = 14$, $Z_8 = 46$. Момент інерції шестерень: $J_1 = 0.08$ кг . м², $J_2 = 0.35$ кг . м², $J_3 = 0.2$ кг . м², $J_4 = 0.6$ кг . м², $J_5 = 0.35$ кг . м².

м^2 , $J_6 = 0.94 \text{ кг. м}^2$, $J_7 = 0.65 \text{ кг. м}^2$, $J_8 = 1.05 \text{ кг. м}^2$. ККД редуктора $\eta = 0.8$. Втратами на тертя в направляючих стола, викликаними вертикальною складовою зусилля різання, знехтувати.

1.3.12. Визначити величину прискорення та шлях, який пройде стіл, а також моменти на валу двигуна та на валу між шостою і сьомою шестернями при пуску двигуна стругального верстата (рис. 1.15).

Електромагнітний момент, який розвиває двигун при пуску, становить $M_d = 200 \text{ Нм}$. Статичний момент, приведений до валу двигуна, $M_c = 91 \text{ Н. м}$; передавальне число редуктора $i = 87.5$. Діаметр восьмої шестерні $D_8 = 0.5 \text{ м}$. Приведений до валу двигуна момент інерції всього механізму і деталі, що стругається, $J_m = 0.23 \text{ кг. м}^2$; момент інерції шестерень від першої до шостої $J_{1-6} = 0.14 \text{ кг. м}^2$; момент інерції двигуна $J_d = 1.5 \text{ кг. м}^2$.

Швидкість обертання двигуна $n = 558 \text{ об/хв}$. ККД передач $\eta = 0.86$.

1.3.13. Визначити приведені до валу двигуна статичний момент при підйманні навантаженої посудини та момент інерції механізму підймальної установки зі зрівноважувальним канатом (рис. ПІ.16). Опускається посудина без вантажу.

Маса посудини $m_c = 4000 \text{ кг}$, маса вантажу $m_b = 5000 \text{ кг}$, маса погонного метра канату $m_k = 12 \text{ кг}$. Швидкість підймання скіпа $v = 6 \text{ м/с}$. Діаметр барабана $D_6 = 4 \text{ м}$, діаметр напрямних шківів $D_6 = 5 \text{ м}$. Момент інерції : барабана $J_6 = 200 \text{ кг. м}^2$, напрямних шківів $J_{ш} = 75 \text{ кг. м}^2$ кожного. Довжина частин канату: $L_1 = 300 \text{ м}$, $L_2 = 10 \text{ м}$, $L_3 = 25 \text{ м}$, $L_4 = 15 \text{ м}$. Довжина зрівноважу вального канату: $L_5 = 300 \text{ м}$. На барабані вкладено 2.5 витка канату. Кутова швидкість двигуна $\omega = 50,4 \text{ рад/с}$. Коефіцієнт корисної дії редуктора, барабана та напрямних

шківів: $\eta = 0,71$. Момент інерції редуктора приведений до валу двигуна, $J_p = 2,5 \text{ кг. м}^2$.

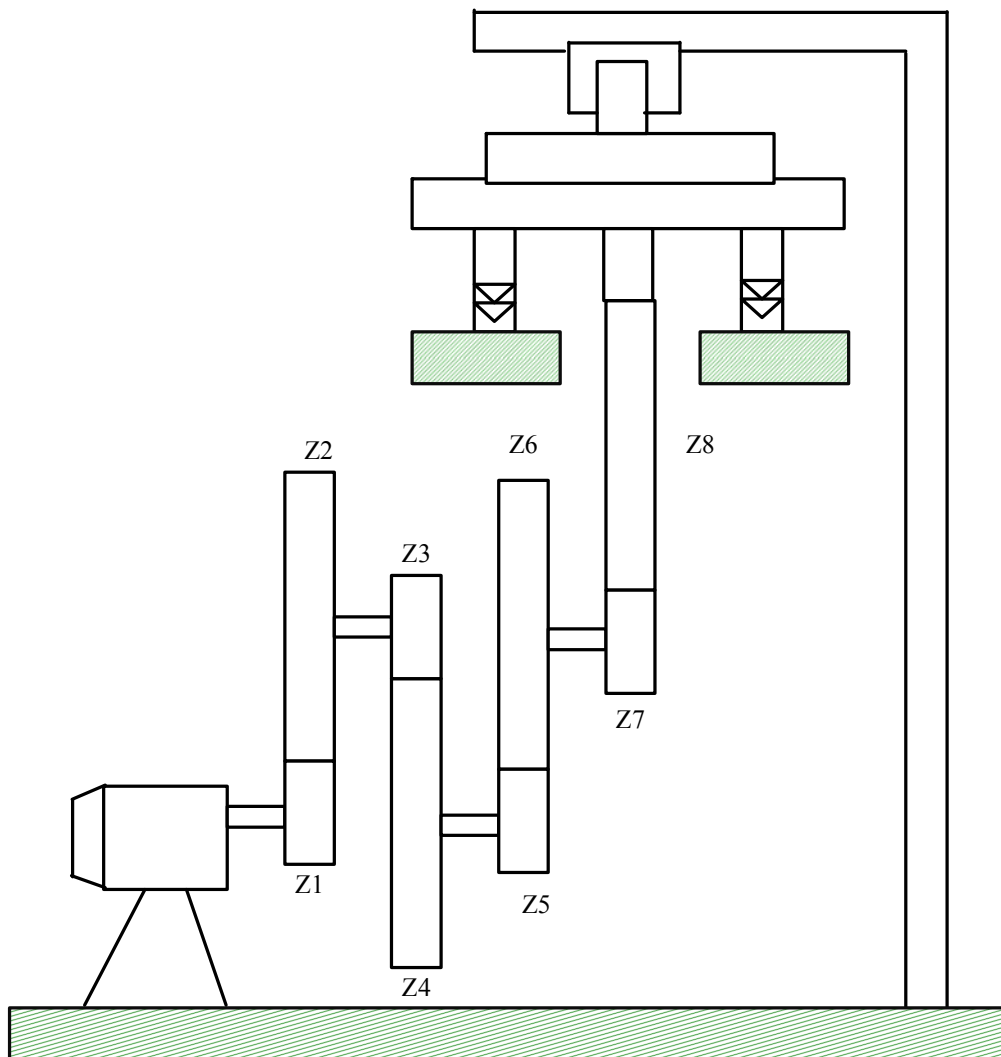


Рисунок П1.15 - Конструкція механізму стругального верстата

1.3.14. Визначити потужність, яку розвиває двигун підйомальної установки зі зрівноважувальним канатом (рисунок П1.16) при підйманні скіпа з усталеною швидкістю $v = 6 \text{ м/с}$, та величину моменту, який повинен розвинути двигун при пуску на піднімання, щоб забезпечити прискорення скіпа $a = 1.2 \text{ м/с}^2$. Приведений до валу двигуна статичний момент, $M_c = 10500 \text{ Н.м}$, приведений момент інерції механізму до валу двигуна $J_m = 320,5 \text{ кг.м}^2$, швидкість обертання

двигуна $n = 485$ об/хв., момент інерції двигуна $J_d = 300$ кг·м², діаметр барабана $D_6 = 4$ м, передавальне число редуктора $i = 16.9$.

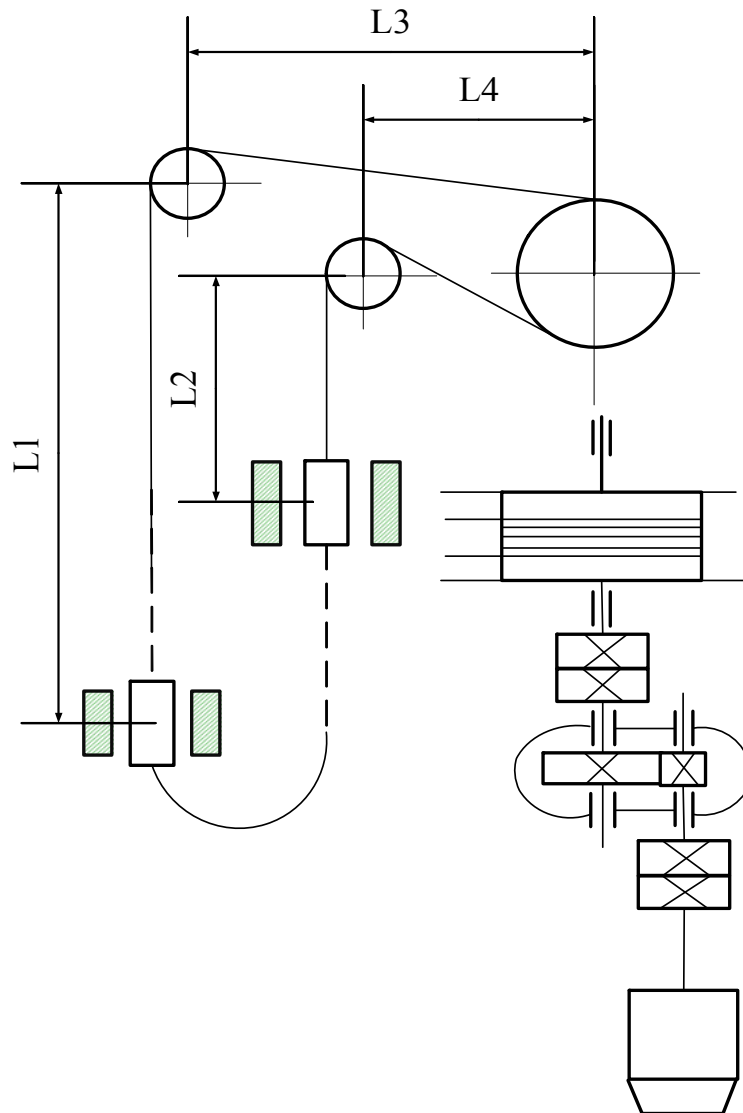


Рисунок ПІ.16 - Конструкція механізму підіймальної установки зі зрівноважувальним канатом

1.3.15. Визначити час розгону двигуна до швидкості обертання $n = 720$ об/хв, якщо середнє значення моменту, який розвиває двигун при пуску, $M_d = 445$ Н·м, а момент інерції приводу, приведений до валу двигуна, $J_{зв} = 8.55$ кг·м². Статичний момент на валу двигуна $M_c = 89.4$ Н·м.

1.3.16. Визначити час сповільнення електроприводу до зупинки, якщо середній гальмівний момент двигуна $M_d = 950$ Н·м, приведений до валу двигуна статичний момент $M_c = 350$ Н·м, приведений до валу двигуна момент інерції робочого механізму і електроприводу $J_{пр} = 16.2$ кг·м². Початкова швидкість обертання приводного двигуна $n_d = 579$ об/хв.

1.3.17. Визначити потужність, яку розвиває приводний двигун лебідки (рис. П1.13) при підйманні та опусканні вантажу з постійною швидкістю $V = 0.95$ м/с, та момент, який повинен розвинути двигун при пуску на підймання і опускання з прискоренням $\varepsilon = 0.62$ м/с². Статичний момент, приведений до валу двигуна при підйманні, $M_{сп} = 417$ Н·м, а при опусканні $M_{со} = 33.7$ Н·м. Приведений до валу двигуна момент інерції $J_{пр} = 4.8$ кгм². Швидкість обертання двигуна $n_d = 1422$ об/хв.

1.3.18. Визначити кількість обертів двигуна при його розгоні в неробочому ході до швидкості $n_d = 962$ об/хв. Середній момент, який розвиває двигун при пуску, $M_d = 248$ Н·м, момент інерції, приведений до валу двигуна, $J_{пр} = 4.12$ кг·м².

1.3.19. Визначити приведений до валу двигуна статичний момент при підйманні та опусканні кабіни, а також приведений до валу двигуна момент інерції від мас вантажного підіймача (рис. П1.17). Маса вантажу $T_b = 1200$ кг, маса кабіни $T_k = 700$ кг, маса противаги $T_n = 920$ кг. Швидкість руху вантажу при підйманні та опусканні $V = 1.75$ м/с, швидкість обертання двигуна $n_1 = 985$ об/хв. ККД передач $\eta = 0.87$.

1.3.20. Визначити час розгону привідного двигуна підіймача (рис. П1.17) до усталеної швидкості обертання $n_y = 785$ об/хв. при опусканні кабіни для

двох випадків, коли двигун розвиває:

1) постійний гальмівний момент $M_{\text{пг}} = 112 \text{ Н} \cdot \text{м}$;

2) постійний рушійний момент $M_{\text{пр}} = 112 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Статичний момент, приведений до валу двигуна, активний і дорівнює $M_c = 220 \text{ Н} \cdot \text{м}$, момент інерції електроустановки, приведений до валу двигуна, $J_{\text{пр}} = 5.3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

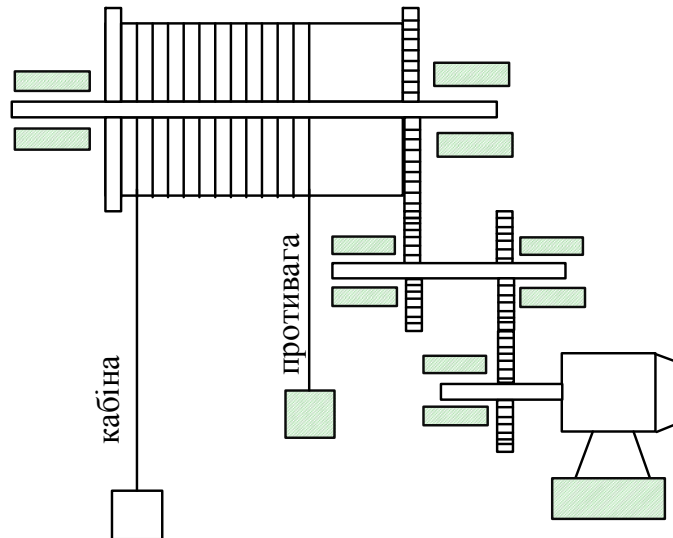


Рисунок ПІ.17 – Конструкція вантажного підіймача

1.3.21. Визначити величину статичного моменту на валу двигуна ножиць (рис.1.18) для положень механізму, коли кут $\varphi = 30^\circ$ та кут $\varphi = 45^\circ$. Зусилля різання $F_p = 20000 \text{ Н}$, ККД механізму і редуктора $\eta = 0,71$, радіуси $r_1 = r_2 = 1.45 \text{ м}$, плече $L = 1.25 \text{ м}$, $D = 0.6 \text{ м}$. Передавальне число редуктора $i = 19.7$.

1.3.22. Визначити приведені до валу двигуна статичний момент і момент інерції механізму візка (рис. 1.19). Маса візка $m_g = 3000 \text{ кг}$, швидкість руху візка $V = 1.82 \text{ м/с}$. Діаметр коліс візка $D_k = 0.3 \text{ м}$, діаметр цапф осі візка $D_{\text{ц}} = 0.06 \text{ м}$. Коефіцієнт тертя у підшипниках осі $\mu = 0.11$; коефіцієнт тертя кочення коліс до рейок $f = 5.1 \cdot 10^{-5}$. Коефіцієнт, що враховує тертя реборд коліс до рейок, $k = 1.3$.

Швидкість обертання двигуна $n = 954$ об/хв, ККД передач $\eta = 0.84$.
 Момент інерції обертальних частин передач та коліс, приведений до валу двигуна, $J_{пр} = 0.18$ кг. м².

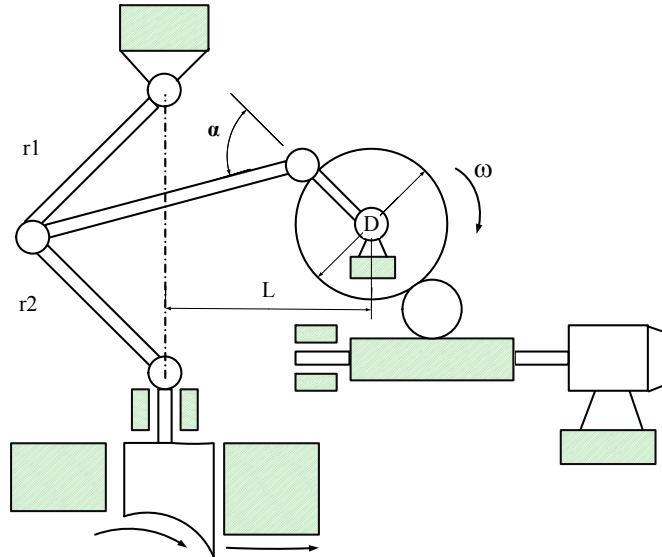


Рисунок П1.18 – Конструкція механізму ножиць

1.3.23. Визначити прискорення візка (рис. П1.19) при розгоні, якщо момент, який розвиває двигун, дорівнює $M_d = 25$ Н·м, статичний момент, приведений до валу двигуна, $M_c = 9.7$ Н·м, момент інерції механізму, приведений до валу двигуна, $J_{пр} = 0.505$ кгм². Момент інерції двигуна $J_d = 0.041$ кг м². Швидкість руху візка $v = 1.2$ м/с. Швидкість обертання двигуна $n = 972$ об/хв.

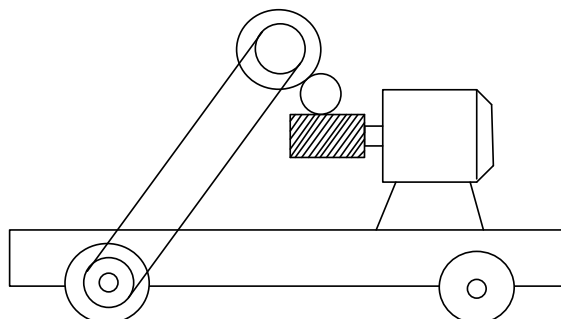


Рисунок П1.19 Конструкція механізму візка

1.3.24. Визначити приведені до валу двигуна статичний момент при підйманні навантаженого скіпа та момент інерції рухомих частин скіпового підіймача (рис. П1.20). Маса скіпа з вантажем складає 5000 кг; діаметр коліс скіпа $D_k = 0.25$ м; діаметр цапф осі коліс $D_o = 0.03$ м; коефіцієнт тертя у цапфі $\mu = 0.11$; коефіцієнт тертя кочення коліс до рейок $f = 6 \cdot 10^{-5}$; коефіцієнт на тертя реборд коліс до рейок $k = 1.32$. Кут нахилу $\alpha = 48^\circ$; ККД передач $\eta = 0.87$. Швидкість підймання скіпа $v = 1.22$ м/с; швидкість обертання двигуна $n = 782$ об/хв. Приведений до валу двигуна момент інерції від мас барабану, напрямного колеса, канату і редуктора $J_{пр} = 0.504$ кг м².

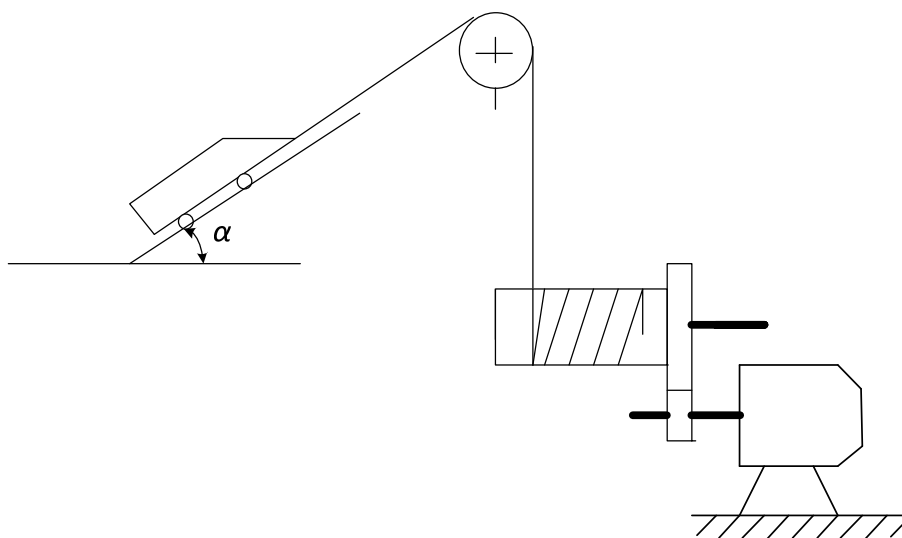


Рисунок П1.20 – Конструкція механізму скіпа

1.3.25. Визначити момент інерції ротора двигуна, якщо його швидкість обертання через 9 с після вимкнення з мережі зменшилась на 200 об/хв. Перед тим двигун працював без навантаження зі швидкістю обертання $n_d = 1050$ об/хв. та споживав з мережі потужність $P_c = 5.2$ кВт, Механічні втрати дорівнюють 40 % від втрат неробочого ходу і можна прийняти, що вони не змінюються при зміні швидкості обертання двигуна.

1.3.26. Для механізму, кінематична схема якого зображена на рис. 1.21, визначити момент двигуна, необхідний для забезпечення в період розгону середнього прискорення $a = 1.5 \text{ рад/с}^2$. Знайти також зусилля в канаті l_1 без врахування і з врахуванням його жорсткості.

Вихідні дані для розрахунків: маса вантажу $m_1 = 5000 \text{ кг}$; маса противаги $m_2 = 3500 \text{ кг}$; момент інерції привідного двигуна $J_d = 3.2 \text{ кг} \times \text{м}^2$; момент інерції редуктора, приведений до швидкохідного вала $J_p = 2.8 \text{ кг} \times \text{м}^2$; момент інерції барабана $J_6 = 500 \text{ кг} \times \text{м}^2$; діаметр барабана $D_6 = 2.0 \text{ м}$; передавальне число редуктора $i = 20$; ККД передач $\eta = 0.8$; жорсткість одного метра канату $c = 6 \times 10^7 \times \text{Н}$; довжина канату $L_1 = 300 \text{ м}$.

1.3.27. Визначити, з яким прискоренням буде опускатись вантаж m у механізмі, кінематична схема якого зображена на рис. П1.21, якщо приводний двигун вимкнути з мережі, а механічне гальмо не буде працювати. Дані механізму наведені в задачі 1.3.24.

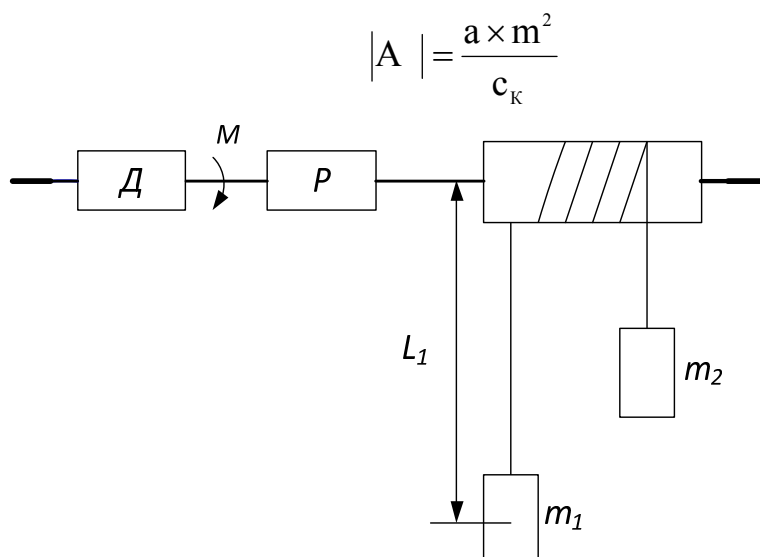


Рисунок П1.21 – Конструкція канатного механізму з противагою

1.3.28. Скласти розрахункову модель, знайти момент M_2 , що передається через вал 2 (рис. П1.22), та коефіцієнт динамічного перевантаження k_d при таких умовах: вхідний момент $M = \text{const} = 120 \text{ Н} \cdot \text{м}$; момент інерції двигуна $J_d = 0.4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; момент інерції передачі Π_1 , приведений до валу двигуна, $J_{\Pi 1} = 0.2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; момент інерції передачі Π_2 , приведений до валу механізму, $J_{\Pi 2} = 18.0 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; момент інерції механізму $J_M = 80 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. ККД передач: $\eta_1 = 0.92$, $\eta_2 = 0.9$; передавальні числа: $i_1 = 4.0$, $i_2 = 5.0$; жорсткість другого валу $c_2 = 8 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}$; момент статичного навантаження механізму $M_M = 800 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

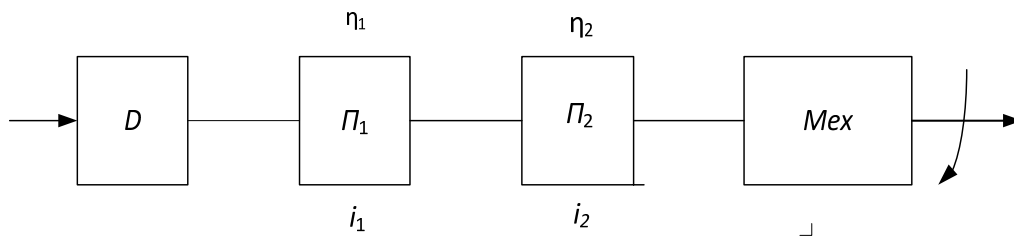


Рисунок 1.22 - Конструкція механізму із двома механічними передачами

1.3.29. Визначити, який момент повинен розвивати кожен із двигунів приводу механізму поворотної платформи екскаватора, кінематична схема якого наведена на рис. П1.23, щоб забезпечити її розгін з постійним прискоренням $\varepsilon = 0.05 \text{ рад/с}^2$. Визначити також момент, який передається через вал 1 і коефіцієнт динамічного перевантаження, якщо жорсткість цього вала $c = 8 \times 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{рад}$, а люфт передачі, приведений до валу двигуна, становить π радіан. Параметри приводних двигунів і передач однакові. Момент інерції кожного приводного двигуна $J_d = 30 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; момент інерції поворотної платформи зі всім обладнанням $J_{\text{пл}} = 160 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; передавальні числа передач: $i_1 = 20$, $i_2 = 25$; ККД першої передачі (з i_1) $\eta = 0.92$, другої передачі (з i_2) $\eta = 0.9$; момент статичного опору

на валу двигуна становить 10 % від динамічного моменту. Момент інерції редукторів не враховувати і вважати, що втрати в редукторі постійні й не залежать від статичного навантаження.

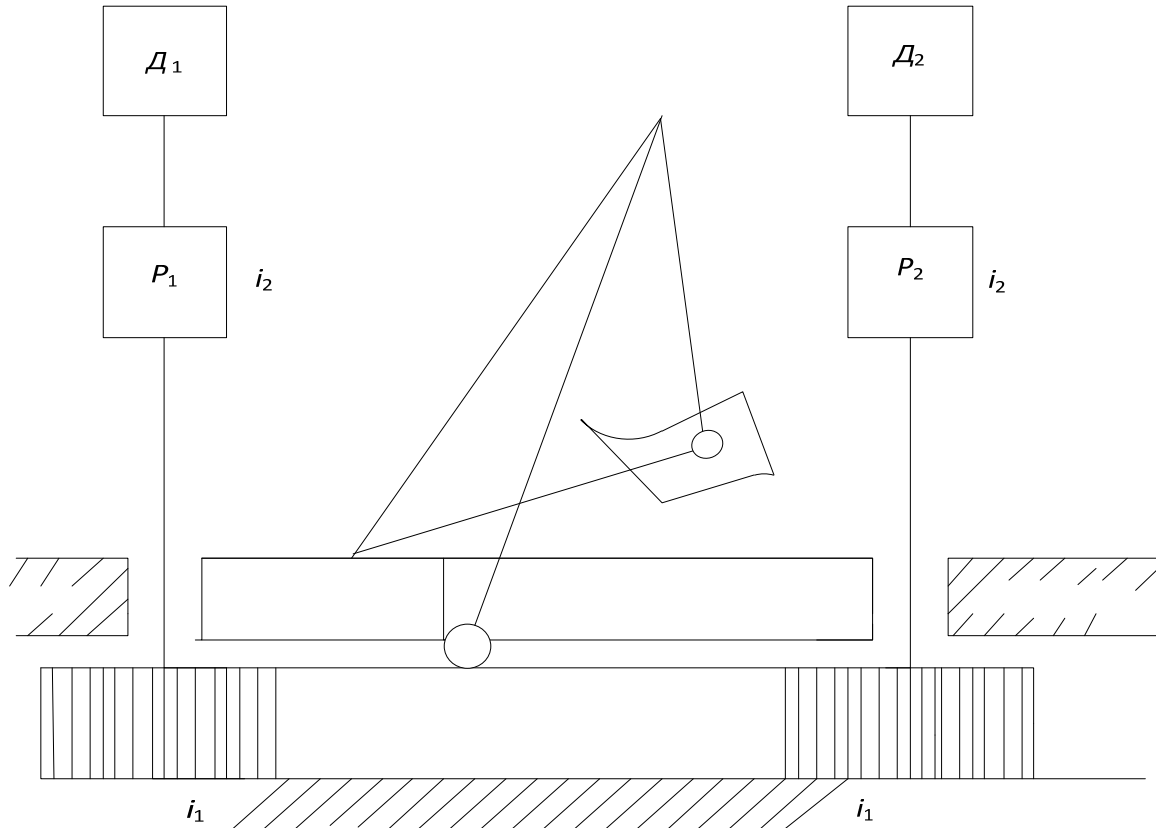


Рисунок П1.23 - Конструкція механізму поворотної платформи екскаватора

1.3.30. Для підіймача (рис. П1.16) з заданою тахограмою руху (рис.П1.24) побудувати навантажувальну діаграму механізму (діаграму зусиль у підйимальному канаті, якщо відомі такі параметри: швидкості руху посудини $v_1 = 1.5$ м/с, $v_y = 4.5$ м/с; допустиме прискорення в інтервалі часу t_1 дорівнює 1.1 м/с², а в інтервалі t_2 - 4.1 м/с²; висота підймання $H = 800$ м; маса вантажу $m_b = 6 \cdot 10^3$ кг; маса кліті $m_k = 5 \cdot 10^3$ кг; маса одного метра підйимального канату $p = 3.1$ кг; маса одного метра зрівноважувального канату $q = 2.6$ кг; довжина підйимального канату $l_1 = 800$ м; довжина зрівноважувального канату

$l_2 = 800$ м; маса обертових частин механізму, приведена до швидкості підйимального канату, $m_M = 9500$ кг.

Розрахунок статичного зусилля в канаті ведеться за формулою:

$$F = k \cdot m \cdot g + (p - q) \cdot (H - 2h_x) \cdot g \quad (H)$$

де k - коефіцієнт шахтних опорів, (можна прийняти $k = 1.1 \div 1.2$);

g - прискорення сили тяжіння;

h_x - шлях, що пройшла кліть з початку підймання.

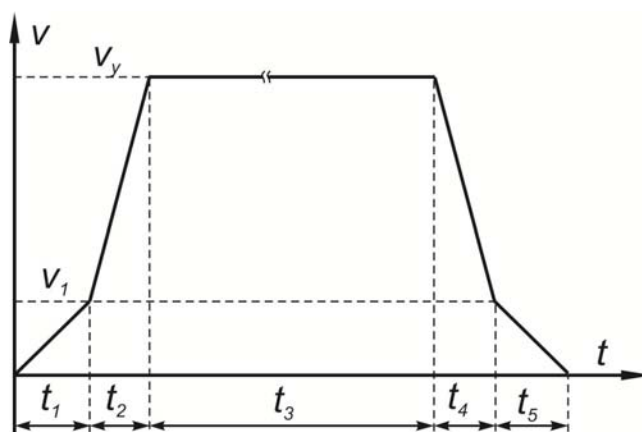


Рисунок ПІ.24 - Тахограма руху підйімача

1.3.31. Розрахувати і побудувати графік зміни моменту електродвигуна, який би забезпечував виконання тахограми руху механізму (задача 1.3.30), якщо момент інерції двигуна $J_d = 4.15$ кг·м², усталена швидкість обертання двигуна $n_d = 800$ об/хв., ККД передач $\eta = 0.75$.

1.3.32. Визначити момент на валу барабана в період розгону підйімача (задача 1.3.30), якщо момент інерції барабана $J_6 = 800$ кг·м², його діаметр $D_6 = 2.5$ м.

1.3.33. На рис. ПІ.25 наведена діаграма зміни прискорення ϵ при розгоні та гальмуванні електроприводу. Розрахувати та побудувати тахограму і діаграму зміни моменту двигуна, яка забезпечує задану

діаграму прискорення. Тривалості часу на діаграмі: $t_1 = t_3 = t_4 = t_6 = 2ct_2 = t_5 = 4c$, час роботи на усталеній швидкості $t_y = 8$ с. Сумарний приведений до вала двигуна момент інерції приводу $J_{пр} = 2.4$ кг.м²; максимальне прискорення $\varepsilon_{max} = 50$ рад/с²; момент статичного опору $M_c = 25$ Н.м.

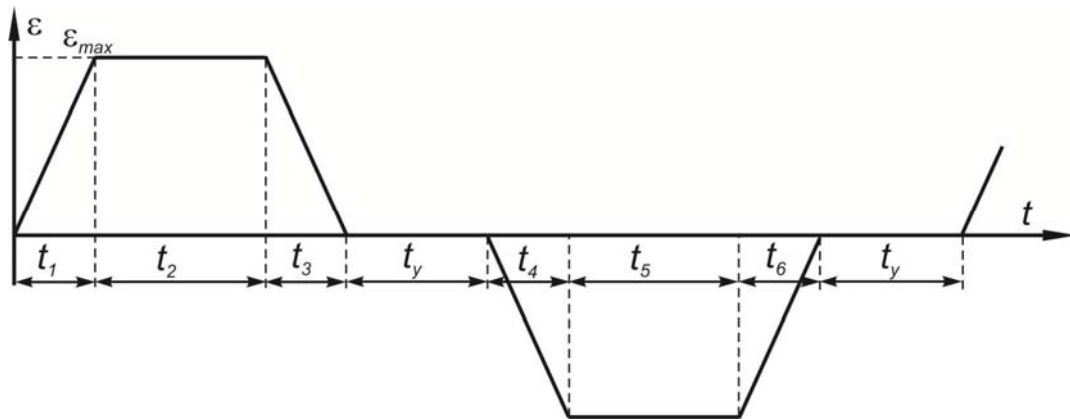


Рисунок П1.25 - Діаграма зміни прискорення ε при розгоні та гальмуванні електроприводу

1.3.34. Визначити, як змінюється статичний момент на валу барабана підіймальної установки (рис. П1.26) зі змінним радіусом навивання канату в залежності від кута повороту барабана φ . А саме, який буде статичний момент M при таких кутах повороту барабана:

$$\varphi_1 = 0, \varphi_2 = \varphi_{ш} / 2, \varphi_3 = \varphi_{ш};$$

де $\varphi_{ш}$ - максимальний кут повороту, який забезпечує підймання вантажу на задану висоту L .

Вихідні дані: Маса вантажу $m_v = 3000$ кг, маса кліті $m_k = 3500$ кг, повздовжня маса канату $p_k = 3.1$ кг/м, висота піднімання $L = 350$ м, мінімальний радіус барабана $R_{min} = 1.5$ м, максимальний радіус барабана $R_{max} = 2.5$ м.

1.3.35. Визначити момент на валу двигуна підіймальної установки (рис. П1.26) в кінці розгону до усталеної швидкості, якщо

прискорення барабана при розгоні постійне і рівне 0.5 рад/с^2 , усталена швидкість обертання двигуна $n_y = 420 \text{ об/хв.}$; передавальне число редуктора $i = 11$, момент інерції барабана $J_6 = 560 \text{ кг. м}^2$, ККД передач $\eta = 0.9$.

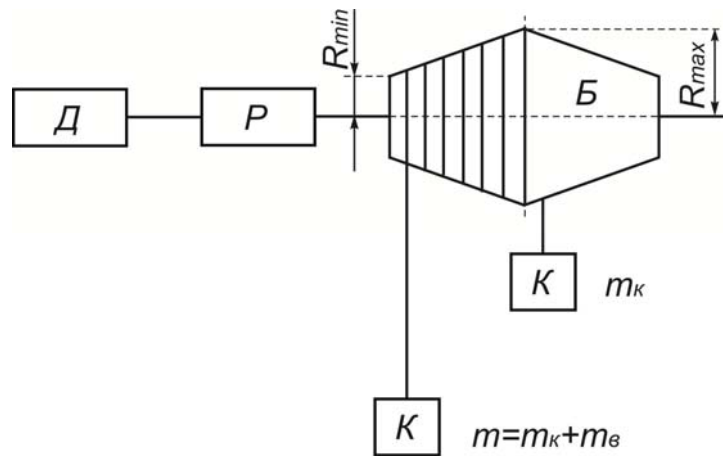


Рисунок ПІ.26 – Конструктивна схема підіймальної установки
(Д – двигун; Р – редуктор; Б – барабан; К – кліть)

1.3.36. Розрахувати, як буде змінюватись зусилля в канаті підіймальної установки (рис. ПІ.26), яка приводиться в рух асинхронним двигуном з фазним ротором потужністю $P_H = 500 \text{ кВт}$ ($n_H = 953 \text{ об/хв.}$, $\lambda_M = 2.2$, $J_d = 228 \text{ кг. м}^2$), при розгоні з початковим пусковим моментом $M_{п} = 1.8 M_H$. Механічну характеристику вважати прямолінійною. Сумарний момент інерції обертових частин механізму, приведений до валу двигуна, $J_{м пр} = 156 \text{ кг. м}^2$; маса посудини з вантажем $m_v = 15 \cdot 10^3 \text{ кг}$; жорсткість одного метра канату $c_k = 1.8 \cdot 10^8 \text{ Н. м}$; довжина канату $l_k = 450 \text{ м}$ передавальне число редуктора $i = 13$; діаметр барабана $D_6 = 2.0 \text{ м}$.
Визначити також величину максимального зусилля в канаті, якщо пусковий момент залишатиметься постійним і рівним $1.8 M_H$.

1.3.37. Скласти структурну схему й визначити всі її параметрів для підйимальної установки (рис.П1.26), яка приводиться в рух асинхронним двигуном з фазним ротором при розгоні з послідовно ввімкненими в колі ротора резисторами. Завантажена посудина знаходиться в нижньому положенні. Штучну механічну характеристику асинхронного двигуна вважати прямолінійною. Жорсткість одного метра підйимального канату $c_k = 2.2 \cdot 10^8$ Н.м. Момент інерції двигуна $J_d = 3.1$ кг·м²; усталена швидкість підймання посудини $v_m = 4.5$ м/с відповідає номінальній швидкості обертання двигуна $n_n = 570$ об/хв.; середнє прискорення посудини $a_m = 3.1$ м/с².

1.3.38. На рис. П1.27 зображена кінематична схема механізму підймання екскаватора ЕКГ 36/65А.

Основні параметри механізму: момент інерції барабанів з муфтами й гальмівними шківками $J_6 = 300 \cdot 10^4$ кг·м²; вага ковша з вантажем $G_k = 22.8$ т; кратність поліспасти $k_n = 2$; ККД механізму $\eta = 0.92$; номінальна швидкість підймання ковша $v_k = 1.6$ м/с; діаметр барабанів $D_6 = 2.4$ м; діаметр канатів $d_k = 60$ мм; модуль пружності канату $E_k = 1.05 \cdot 10^6$ кг/см²; довжина канату l_2 змінюється. Номінальна швидкість обертання двигуна $n_n = 26$ об/хв.; момент інерції двигуна $J_d = 300$ кг·м².

Привести цю систему підйимального механізму до двомасової моделі та визначити її коефіцієнти і параметри.

1.3.39. Визначити потужність, яку розвиває двигун установки зі зрівноважувальним канатом (рис. П1.28) при підйманні скіпа з усталеною швидкістю $v = 6$ м/с, та величину моменту, який повинен розвинути двигун при пуску на підймання, щоб забезпечити прискорення скіпа $a = 1.2$ м/с². Статичний момент. Приведений до валу двигуна, $M_c = 10500$ Н·м, приведений момент інерції механізму до

валу двигуна $J_M = 320,5 \text{ кг.м}^2$, швидкість обертання двигуна $n = 485 \text{ об/хв.}$, момент інерції двигуна $J_D = 300 \text{ кг.м}^2$, діаметр барабана $D_6 = 4 \text{ м}$, передавальне число редуктора $i = 16.9$.

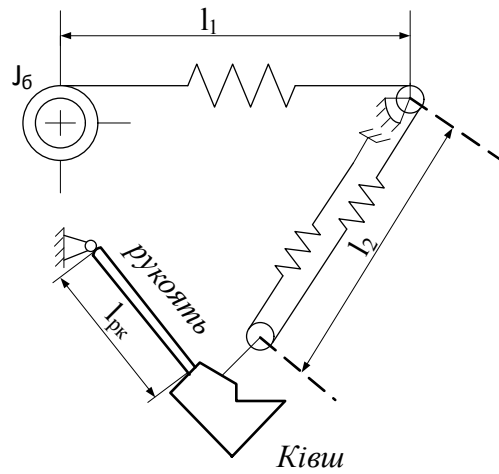


Рисунок ПІ.27 - Кінематична схема механізму підіймання екскаватора ЕКГ 36/65А

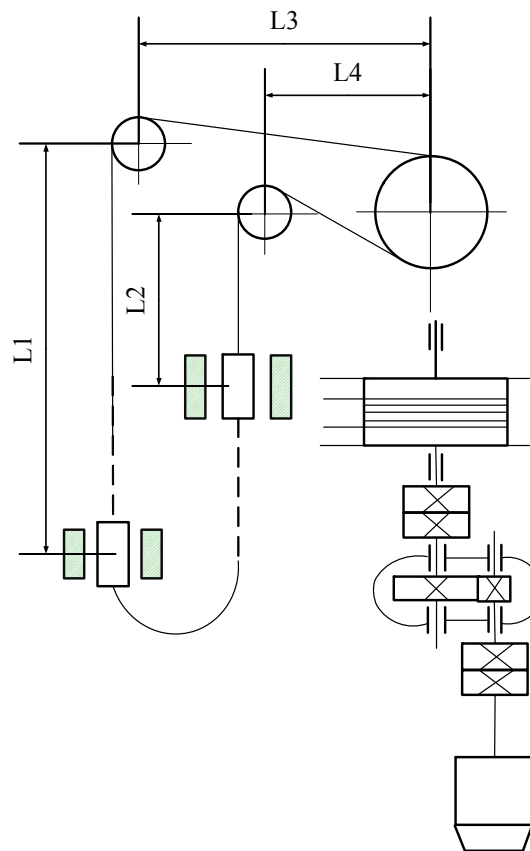


Рисунок ПІ.28 – Конструкція установки зі зрівноважувальним канатом

1.3.40. Визначити час розгону двигуна до швидкості обертання $n = 720$ об/хв., якщо середнє значення моменту, який розвиває двигун при пуску, $M_d = 445$ Н . м, а момент інерції приводу, приведений до валу двигуна, $J_{зв} = 8.55$ кг. м². Статичний момент на валу двигуна $M_c = 89.4$ Н . м.

1.3.41. Визначити час сповільнення електроприводу до зупинки, якщо середній гальмівний момент двигуна $M_d = 950$ Н . м. приведений до валу двигуна статичний момент $M_c = 350$ Н . м, приведений до валу двигуна момент інерції робочого механізму і електроприводу $J_{пр} = 16.2$ кг. м². Початкова швидкість обертання привідного двигуна $n_d = 579$ об/хв.

1.3.42. Визначити потужність, яку розвиває привідний двигун лебідки при підйманні та опусканні вантажу з постійною швидкістю $V = 0.95$ м/с, та момент, який повинен розвинути двигун при пуску на підймання і опускання з прискоренням $\varepsilon = 0.62$ м/с². Статичний момент, приведений до валу двигуна при підйманні, $M_{сп} = 417$ Н . м, а при опусканні $M_{со} = 33.7$ Н . м. Приведений до валу двигуна момент інерції $J_{пр} = 4.8$ кг. м². Швидкість обертання двигуна $n_d = 1422$ об/хв.

1.3.43. Визначити час розгону привідного двигуна підймача (рис. 1.28) до усталеної швидкості обертання $n_y = 785$ об/хв.. при опусканні кабіни для двох випадків, коли двигун розвиває:

- 1) постійний гальмівний момент $M_{пг} = 112$ Н . м;
- 2) постійний рушійний момент $M_{пр} = 112$ Н . м.

Статичний момент, приведений до валу двигуна, активний і дорівнює $M_c = 220$ Н . м, момент інерції електроустановки, приведений до валу двигуна, $J_{пр} = 5.3$ кг. м².

РОЗДІЛ П2. ВЛАСТИВОСТІ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Основні розрахункові формули та співвідношення

Номінальний момент на валу двигуна

$$M_H = P_H / \omega_H .$$

Конструктивна стала двигуна

$$c = p \cdot N / (2 \cdot \pi \cdot a) .$$

Конструктивний коефіцієнт двигуна

$$c\Phi_H = (U_H - R_{яд} \cdot I_H) / \omega_{нд} .$$

Електромагнітний момент двигуна

$$M = c\Phi \cdot I_{я} .$$

Номінальний електромагнітний момент двигуна

$$M_H = c\Phi_H \cdot I_H .$$

Струм короткого замикання

$$I_{кз} = U_H / R_{як} .$$

Момент короткого замикання

$$M_{кз} = c\Phi \cdot I_{кз} .$$

Коефіцієнт жорсткості лінеаризованої механічної характеристики

$$\beta = \partial M / \partial \omega = \Delta M / \Delta \omega \approx (c\Phi_H)^2 / R_{\text{як}} \approx M_{\text{кз}} / \omega_0 .$$

Номінальна ЕРС двигуна

$$E_H = c\Phi_H \cdot \omega_H .$$

Кутова швидкість неробочого ходу при номінальній напрузі

$$\omega_0 = U_H / c\Phi_H .$$

Номінальний опір якоря машини постійного струму

$$R_H = U_H / I_H .$$

П2.1. Властивості і характеристики електроприводів з двигунами постійного струму незалежного збудження.

П2.1.1 Основні розрахункові формули

Електромеханічна характеристика в нормальній схемі вмикання

$$\omega = \frac{U_H}{c\Phi_H} - \frac{R_{\text{яд}} + R_{\text{д}}}{c\Phi_H} \cdot I = \omega_0 - \frac{R_{\text{яд}} + R_{\text{д}}}{c\Phi_H} \cdot I .$$

Механічна характеристика в нормальній схемі вмикання

$$\omega = \frac{U_H}{c\Phi_H} - \frac{R_{\text{яд}} + R_{\text{д}}}{(c\Phi_H)^2} \cdot M = \omega_0 - \frac{R_{\text{яд}} + R_{\text{д}}}{(c\Phi_H)^2} \cdot M .$$

Електромеханічна характеристика при динамічному гальмуванні

$$\omega = - (R_{\text{яд}} + R_{\text{д}}) \cdot I / c\Phi_{\text{н}}.$$

Механічна характеристика при динамічному гальмуванні

$$\omega = - (R_{\text{яд}} + R_{\text{д}}) \cdot M / (c\Phi_{\text{н}})^2$$

Електромеханічна характеристика при шунтуванні обмотки якоря

$$\omega = \frac{U_{\text{н}}}{c\Phi_{\text{н}}} \cdot \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} + R_{\text{п}}} - \left(1 - \frac{R_{\text{г}} \cdot R_{\text{ш}}}{R_{\text{яд}} \cdot (R_{\text{ш}} + R_{\text{п}})} \right) \cdot \frac{R_{\text{яд}}}{c\Phi_{\text{н}}} \cdot I_{\text{я}}.$$

Механічна характеристика при шунтуванні обмотки якоря

$$\omega = \frac{U_{\text{н}}}{c\Phi_{\text{н}}} \cdot \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} + R_{\text{п}}} - \left(1 - \frac{R_{\text{г}} \cdot R_{\text{ш}}}{R_{\text{яд}} \cdot (R_{\text{ш}} + R_{\text{п}})} \right) \cdot \frac{R_{\text{яд}}}{(c\Phi_{\text{н}})^2} \cdot M.$$

Електромеханічна характеристика системи Г-Д

$$\omega = \frac{E_{\text{с}}}{c\Phi_{\text{н}}} - \frac{R_{\text{яд}} + R_{\text{яг}}}{c\Phi_{\text{н}}} \cdot I_{\text{я}}.$$

Механічна характеристика системи Г-Д

$$\omega = \frac{E_{\text{с}}}{c\Phi_{\text{н}}} - \frac{R_{\text{яд}} + R_{\text{яг}}}{(c\Phi_{\text{н}})^2} \cdot M.$$

ЕРС генератора, яка забезпечує кутову швидкість двигуна ω_1 при номінальному потоці збудження і статичному навантаженні на валу $M_{\text{с1}}$

$$E_{\Gamma} = c\Phi_H \cdot \omega_1 + (R_{\text{яд}} + R_{\text{яг}}) \cdot M_{\text{cl}} / c\Phi_H.$$

або

$$E_{\Gamma} = c\Phi_H \cdot \omega_1 + (R_{\text{яд}} + R_{\text{яг}}) \cdot I_{\text{cl}}.$$

Електромеханічна характеристика системи ТП-Д

$$\omega = \frac{E_{\text{до}} \cdot \cos \alpha}{c\Phi_H} - \frac{R_{\text{яд}} + r_{\text{сум}}}{c\Phi_H} \cdot I_{\text{я}}.$$

Механічна характеристика системи ТП-Д

$$\omega = \frac{E_{\text{до}} \cdot \cos \alpha}{c\Phi_H} - \frac{R_{\text{яд}} + r_{\text{сум}}}{(c\Phi_H)^2} \cdot M,$$

де $r_{\text{сум}} = r_{\text{т}} + r_{\text{тр}} + r_{\text{др}} + r_{\text{х}}$ - сумарний активний опір перетворювача.

Розрахунок опорів пускових резисторів для двигуна з незалежним (паралельним) збудженням

Графоаналітичний метод

Методика розрахунку подана в задачі 2.1. 2.3. Треба відмітити, що чим більше співвідношення I_1 / I_2 тим меншою буде кількість пускових резисторів. На рис. П2.1 наведений графоаналітичний розрахунок опорів пускових резисторів у три ступені.

r_1 – резистор, який першим вимикається з кола якоря.

Аналітичний метод

На рисунку П2.2 наведена принципова схема пуску в m ступенів.

Опір пускових резисторів можна розрахувати за формулами:

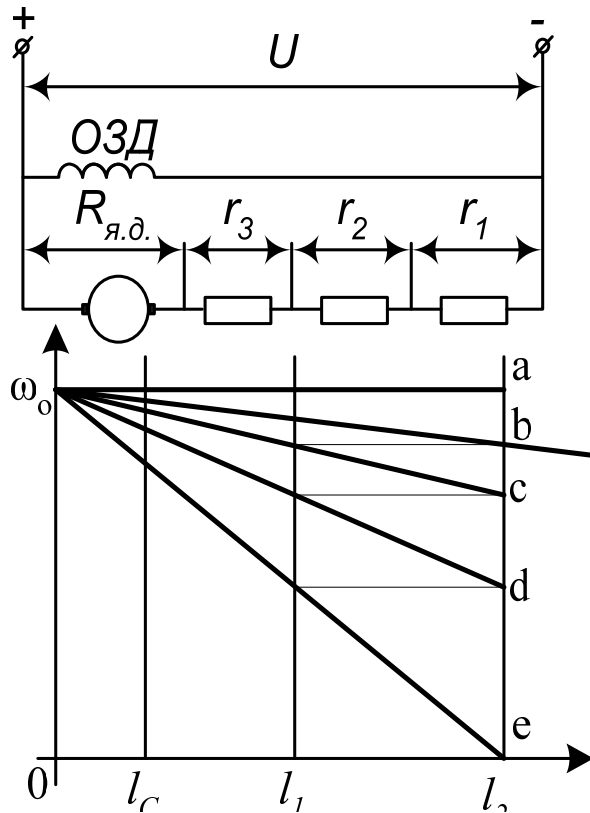
$$r_l = R_{\text{я.д.}} \cdot (\lambda - 1) \cdot \lambda^{m-l}$$

$$r_2 = R_{\text{я.д.}} \cdot (\lambda - 1) \cdot \lambda^{m-2}$$

$$r_3 = R_{\text{я.д.}} \cdot (\lambda - 1) \cdot \lambda^{m-3}$$

$$r_m = R_{\text{я.д.}} \cdot (\lambda - 1),$$

де $\lambda = I_1 / I_2$.



$$I_1 < I_{\text{доп}}$$

$$I_2 \geq I_C$$

$$r_1 = R_{\text{н.з.}} \cdot de / ab$$

$$r_2 = R_{\text{н.з.}} \cdot cd / ab$$

$$r_3 = R_{\text{н.з.}} \cdot bc / ab$$

Рисунок П2.1 –
Електрична схема ДПС

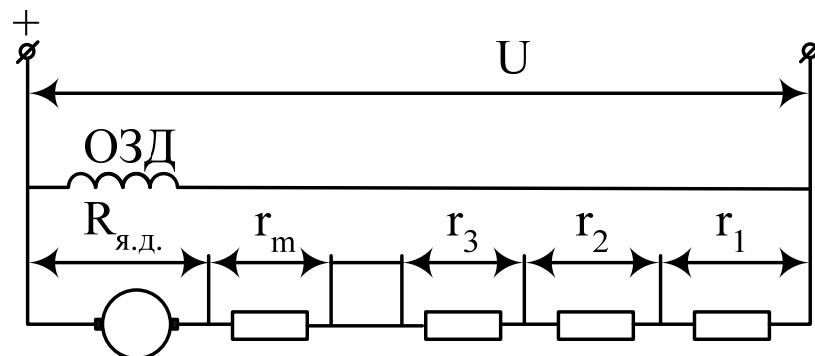


Рисунок П2.2 - Принципова схема пуску в m ступенів

Співвідношення струмів перемикачів при заданих I_1 або I_2

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{U_H}{1 - R_{я.д.}}} = \sqrt[m+1]{\frac{U_H}{2 - R_{я.д.}}}.$$

Кількість ступенів пускових резисторів при заданому значенні λ

$$m = \frac{\ln(U_H / (1 - R_{я.д.}))}{\ln \lambda} = \frac{\ln(U_H / (2 - R_{я.д.}))}{\ln \lambda} - 1.$$

Опір додаткового резистора при динамічному гальмуванні

$$R_{ГД} = \frac{c\Phi_H \cdot \omega_{но}}{I_{доп}} - R_{я.д.} = \frac{(c\Phi_H)^2 \cdot \omega_{но}}{M_{доп}} - R_{я.д.}.$$

Опір додаткового резистора при гальмуванні проти вмиканням

$$R_{ГПР} = \frac{U_H + c\Phi_H \cdot \omega_{но}}{I_{доп}} - R_{я.д.} = \frac{(U_H + c\Phi_H \cdot \omega_{но}) \cdot c\Phi_H}{M_{доп}} - R_{я.д.}.$$

П2.1.2 Приклади розв'язування задач

2.1.2.1. Для двигуна постійного струму з незалежним збудженням потужністю $P_H = 11$ кВт ($U_H = 220$ В, $I_H = 59$ А, $\omega_H = 314$ 1/с) визначити ККД при номінальному навантаженні та величину внутрішнього опору якоря, враховуючи, що при номінальному навантаженні його постійні та змінні втрати рівні між собою. Розрахувати та побудувати:

- природну електромеханічну характеристику;
- штучну з введеним послідовно в коло якоря додатковим резистором з опором $R_d = 1.63$ Ом;

- штучну при динамічному гальмуванні, в якій при номінальній швидкості струм у колі якоря дорівнює 118 А; визначити також опір додаткового резистора, який треба ввести послідовно в коло якоря для одержання цієї характеристики.

Розв'язок:

Коефіцієнт корисної дії двигуна

$$\eta = \frac{P_H \cdot 10^3}{U_H \cdot I_H}; \quad \eta = \frac{11 \cdot 10^3}{220 \cdot 59} = 0.846.$$

Внутрішній опір якоря двигуна

$$R_{\text{яд}} = 0.5 \cdot (U_H \cdot I_H - P_H \cdot 10^3) / I_H^2;$$

$$R_{\text{яд}} = 0.5 \cdot (220 \cdot 59 - 11 \cdot 10^3) / 59^2 = 0.284 \text{ Ом}.$$

Конструктивний коефіцієнт

$$c\Phi_H = \frac{U_H \cdot R_{\text{яд}} \cdot I_H}{\omega_H}; \quad c\Phi_H = \frac{220 - 0.284 \cdot 59}{314} = 0.647 \text{ В} \cdot \text{с/рад}.$$

Кутова швидкість неробочого ходу

$$\omega_0 = U_H / c\Phi_H; \quad \omega_0 = 220 / 0.647 = 340 \text{ рад/с}.$$

Природна електромеханічна характеристика будується через дві точки з координатами: $I_{\text{я}} = 0, \omega = \omega_0$, та $I_{\text{я}} = I_{\text{н}}, \omega = \omega_{\text{н}}$. Ця характеристика повинна обов'язково проходити через точку з координатами: $\omega = 0, I_{\text{я}} = I_{\text{кз}}$. Це дає можливість проконтролювати правильність розрахунку.

Струм короткого замикання кола якоря

$$I_{кз} = U_H / R_{яд} ; \quad I_{кз} = 220 / 0.284 = 774.5 \text{ А} .$$

Треба відзначити, що струм короткого замикання у 13,1 разів більший від номінального.

Кутова швидкість на штучній характеристиці при номінальному навантаженні

$$\omega_{ш} = \frac{U_H - (R_{яд} + R_d) \cdot I_H}{c\Phi_H} ;$$

$$\omega_{ш} = \frac{220 - (0.284 + 1.63) \cdot 59}{0.647} = 165.5 \text{ рад/с} .$$

Штучна електромеханічна характеристика будується через точки з координатами: $I_{я} = 0, \omega = \omega_0$ та $I_{я} = I_H, \omega = \omega_{ш}$.

Електромеханічна характеристика динамічного гальмування будується через точки з такими координатами: $I_{я} = 0, \omega = 0$ та $I_{я} = 118 \text{ А}, \omega = \omega_H$.

Величину опору додаткового резистора, який потрібно ввести послідовно в коло якоря при динамічному гальмуванні

$$R_{дг} = \frac{0.647 \cdot 314}{118} - 0.284 = 1.44 \text{ Ом} .$$

Розраховані характеристики зображені на рис. П2.3.

2.1.2.2. Розрахувати й побудувати штучну механічну характеристику двигуна постійного струму з незалежним збудженням потужністю $P_H = 5.4$ кВт ($U_H = 220 \text{ В}, I_H = 26 \text{ А}, n_H = 1000 \text{ об/хв} \dots$, постійні та змінні втрати при

номінальному навантаженні рівні між собою) для випадку, коли напруга, прикладена до якорного кола $U_1 = 0.5 U_H$, опір додаткового резистора у колі якоря $R_d = 3 R_{яд}$, магнітний потік двигуна $\Phi_1 = 0.7 \Phi_H$.

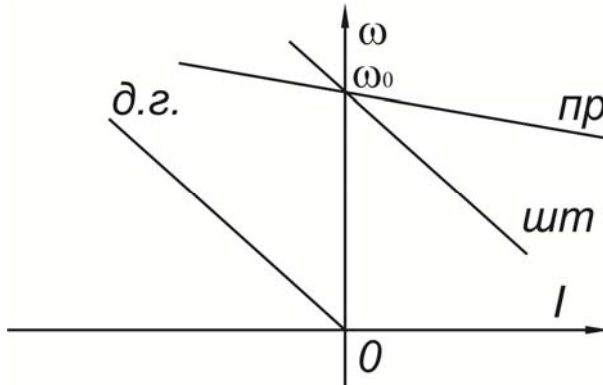


Рисунок П2.3 - Електромеханічна характеристика

Порівняти відносні перепади швидкостей на природній та штучній механічних характеристиках при номінальному навантаженні.

Розв'язок:

Внутрішній опір кола якоря

$$R_{яд} = 0.5 \cdot (U_H \cdot I_H - P_H \cdot 10^3) / I_H^2 ;$$

$$R_{яд} = 0.5 \cdot (220 \cdot 26 - 5.4 \cdot 10^3) / 26^2 = 0.237 \text{ Ом} .$$

Номінальна кутова швидкість

$$\omega_H = \pi \cdot n_H / 30 ; \quad \omega_H = 3.14 \cdot 1000 / 30 = 104.7 \text{ рад/с} .$$

Конструктивний коефіцієнт

$$c\Phi_H = \frac{U_H - R_{яд} \cdot I_H}{\omega_H} ; \quad c\Phi_H = \frac{220 - 0.237 \cdot 26}{104.7} = 2.04 \text{ В} \cdot \text{с/рад} .$$

Кутова швидкість неробочого ходу при номінальній напрузі

$$\omega_0 = U_H / c\Phi_H ; \quad \omega_0 = 220/2.04 = 107.8 \text{ рад/с} .$$

Номінальний електромагнітний момент

$$M_H = c\Phi_H \cdot I_H ; \quad \omega_0 = 220/2.04 = 107.8 \text{ рад/с} .$$

Перепад швидкості при номінальному навантаженні на природній характеристиці

$$\Delta\omega_H = \frac{R_{\text{яд}} \cdot M_H}{(c\Phi_H)^2} ; \quad \Delta\omega_H = \frac{0.237 \cdot 53}{2.04^2} = 3.02 \text{ рад/с} .$$

Відносний перепад швидкості на природній характеристиці

$$\delta\omega\% = \frac{\Delta\omega_H}{\omega_0} \cdot 100\% ; \quad \delta\omega\% = \frac{3.02}{107.8} \cdot 100 = 2.8\% .$$

Кутова швидкість неробочого ходу при $U_1 = 0.5 \cdot U_H$ та при $\Phi_1 = 0.7 \cdot \Phi_H$

$$\omega_{0\text{ш}} = U_1 / c\Phi_1 ; \quad \omega_{0\text{ш}} = 0.5 \cdot 220 / (0.7 \cdot 2.04) = 77 \text{ рад/с} .$$

Перепад швидкості на штучній характеристиці

$$\Delta\omega_{\text{ш}} = \frac{(R_{\text{яд}} + R_{\text{д}}) \cdot M_H}{(0.7 \cdot c\Phi_H)^2} ; \quad \Delta\omega_{\text{ш}} = \frac{(0.237 + 3 \cdot 0.237) \cdot 53}{(0.7 \cdot 2.04)^2} = 24.6 \text{ рад/с} .$$

$$\delta\omega_{\text{ш}}\% = \frac{\Delta\omega_{\text{ш}}}{\omega_{0\text{ш}}} \cdot 100\% ; \quad \delta\omega_{\text{ш}}\% = \frac{24.6}{77} \cdot 100 = 32\% .$$

Таким чином співвідношення перепадів швидкості

$$\delta\omega_{ш} = 32/2.8\delta\omega_{н} ; \quad \delta\omega_{ш} = 11.4\delta\omega_{н} .$$

Природна 1 та штучна 2 механічні характеристики зображені на рис. П2.4.

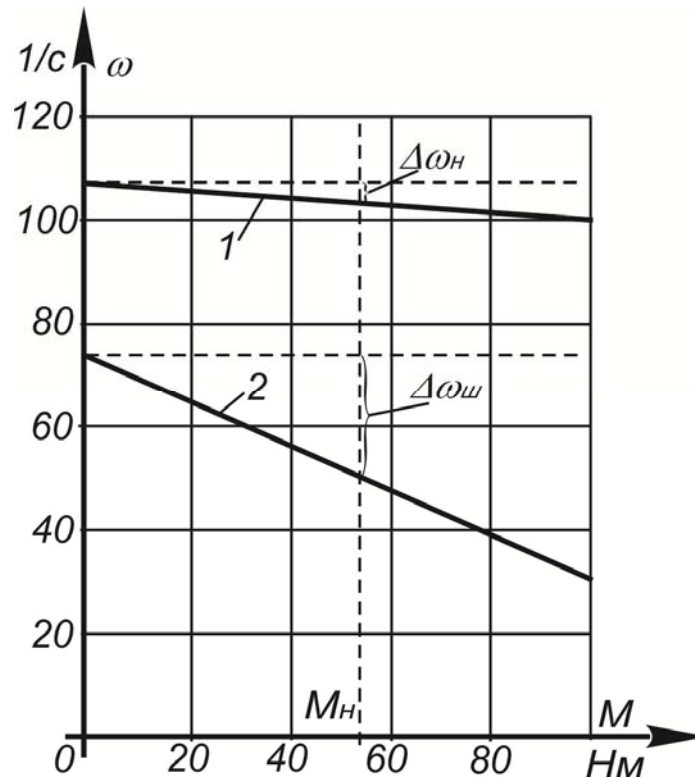


Рисунок П2.4 - Природна 1 та штучна 2 механічні характеристики

2.1.2.3. Для двигуна постійного струму з незалежним збудженням потужністю $P_n = 3.2$ кВт ($U_n = 220$ В, $I_n = 19$ А, $n_n = 750$ об/хв., $R_{яд} = 0.735$ Ом), розрахувати аналітичним і графоаналітичним методами опори пускових резисторів у чотири ступені. Максимальний струм перемикання $I_1 = 41.8$ А. Струм статичного навантаження $I_c = 17$ А.

Необхідно визначити мінімальний струм перемикання I_2 .

Розв'язок:

Аналітичний метод

Співвідношення $I_1/I_2 = \lambda$

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{U_n}{I_1 \cdot R_{\text{яд}}}};$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{220}{41.8 \cdot 0.735}} = 1.64$$

Опори пускових резисторів

$$r_1 = \lambda^3 \cdot (\lambda - 1) \cdot R_{\text{яд}}; r_1 = 1/64^3 \cdot (1/64 - 1) \cdot 0.735 = 2.05 \text{ Ом}$$

$$r_2 = \lambda^2 \cdot (\lambda - 1) \cdot R_{\text{яд}}; r_2 = 1/64^2 \cdot (1/64 - 1) \cdot 0.735 = 1.26 \text{ Ом}$$

$$r_3 = \lambda \cdot (\lambda - 1) \cdot R_{\text{яд}}; r_3 = 1/64 \cdot (1/64 - 1) \cdot 0.735 = 0.76 \text{ Ом}$$

$$r_4 = (\lambda - 1) \cdot R_{\text{яд}}; r_4 = (1/64 - 1) \cdot 0.735 = 0.76 \text{ Ом}$$

Сумарний опір пускових резисторів

$$R_{\text{II}} = r_1 + r_2 + r_3 + r_4; R_{\text{II}} = 2.05 + 1.26 + 0.76 + 0.46 = 4.53 \text{ Ом}$$

Сумарний опір кола якоря

$$R_{\text{кя}} = R_{\text{II}} + R_{\text{яд}}; R_{\text{кя}} = 4.53 + 0.735 = 5.265 \text{ Ом}$$

Схема вмикання резисторів показана на рис. П2.5 а.

Графоаналітичний метод

Номінальна кутова швидкість

$$\omega_n = \pi \cdot \frac{n_n}{30};$$

$$\omega_n = 3.14 \cdot 750/30 = 78.5 \text{ рад/с.}$$

Конструктивний коефіцієнт двигуна

$$c\Phi_n = \frac{U_n - R_{яд} \cdot I_n}{\omega_n}; \quad c\Phi_n = \frac{220 - 0.735 \cdot 19}{78.5} = 2.62 \text{ В} \cdot \text{с/рад.}$$

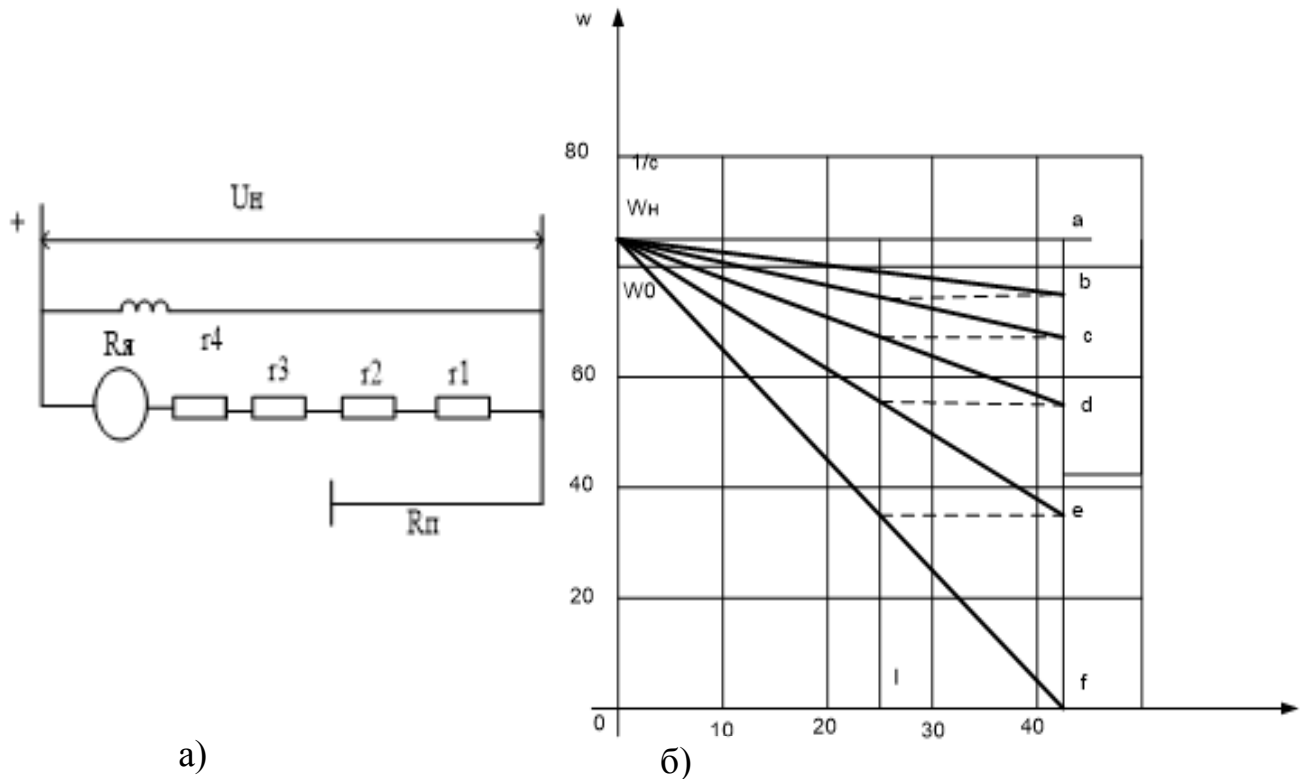


Рисунок П2.5 - Схема вмикання резисторів

Кутова швидкість неробочого ходу

$$\omega_0 = U_n / c\Phi_n = 220 / 2.62 = 84 \text{ рад/с.}$$

Будується природна характеристика $\omega = f(I)_я$, яка проходить через точки з координатами $I_я = 0, \omega = \omega_0$, та $I_я = I_n, \omega = \omega_n$.

Мінімальний струм перемикання $I_2 = I_1 / \gamma; I_2 = 41.8 / 1.64 = 25.5 \text{ А.}$
Провівши вертикальні лінії через $I_1 = I_2$ до перетину з природною

характеристикою будується пускова діаграма в чотири ступені, починаючи від точки з координатами $I_{я} = I_1$, $\omega = 0$. Остання горизонтальна лінія повинна прийти в точку b. На діаграмі відрізок $ab \neq R_{яд}$, $fe \neq r_1$, $ed \neq r_2$, $dc \neq r_3$, $cb \neq r_4$.

Отже, опори пускових резисторів:

$$r_1 = fe/ab \cdot R_{яд}; r_1 = 2.82 \cdot 0.735 = 2.07 \text{ Ом},$$

$$r_2 = ed/ab \cdot R_{яд}; r_2 = 1.73 \cdot 0.735 = 1.27 \text{ Ом},$$

$$r_3 = dc/ab \cdot R_{яд}; r_3 = 0.95 \cdot 0.735 = 0.77 \text{ Ом},$$

$$r_4 = cb/ab \cdot R_{яд}; r_4 = 0.63 \cdot 0.735 = 0.46 \text{ Ом}.$$

Аналітичний і графоаналітичний методи розрахунку дали достатньо близькі значення опорів пускових резисторів.

П 2.1.3 Задачі для самостійного розв'язку

2.1.3.1. Двигун постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН180L ($P_n = 7.1$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 40$ А, $n_n = 750$ об/хв., $R_{я} + R_{ш} = 0.443$ Ом) приводить в рух підіймач лебідки. Визначити величину електромагнітного моменту двигуна та значення струму в колі якоря при опусканні вантажу, якщо двигун працює на природній механічній характеристиці в рекуперативному режимі паралельно з мережею з кутовою швидкістю $\omega_c = -83$ рад/с.

2.1.3.2. Двигун постійного струму з незалежним збудженням типу 2П250М ($P_n = 30$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 168.4$ А, $n_n = 750$ об/хв..., $R_{яд} = 0.298$ Ом) приводить в рух підіймальний механізм мостового крана. Визначити, з якою кутовою швидкістю працює двигун, підіймаючи вантаж зі статичним моментом на валу $M_c = 320$ Н·м, якщо в коло його якоря введено додатковий резистор з опором $R_d = 1.1$ Ом

2.1.3.3. Двигун постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН225М ($P_H = 37$ кВт, $U_H = 220$ В, $I_H = 193.3$ А, $n_H = 1500$ об/хв..., $R_{яд} + R_{дп} = 0.0524$ Ом) працює на природній механічній характеристиці зі статичним моментом на валу двигуна $M_c = 0.72 M_H$. Для зупинки двигун переводиться в режим проти-вмикання. Визначити величину електромагнітного моменту на початку гальмування і при зупинці, якщо в коло якоря ввести додатковий резистор з опором $R_d = 1.63$ Ом.

2.1.3.4. Двигун постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН225М ($P_H = 37$ кВт, $U_H = 220$ В, $I_H = 193.3$ А, $n_H = 1500$ об/хв..., $R_{яд} + R_{дп} = 0.0524$ Ом) працює на природній механічній характеристиці зі статичним моментом на валу двигуна $M_c = 0.72 M_H$. Для зупинки двигун переводиться в режим проти-вмикання. Визначити величину електромагнітного моменту на початку гальмування і при зупинці, якщо в коло якоря ввести додатковий резистор з опором $R_d = 1.63$ Ом.

2.1.3.5. Двигун постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН132L ($P_H = 5.5$ кВт, $U_H = 220$ В, $I_H = 31.1$ А, $n_H = 1500$ об/хв..., $R_{я} + R_{дп} = 0.592$ Ом) працює при ослабленому магнітному потоці з швидкістю обертання 2250 об/хв... і статичним моментом на валу двигуна $M_c = 0.8 M_H$. Для зупинки двигун переводиться в режим проти-вмикання з номінальним потоком збудження. Визначити величину електромагнітного моменту на початку та кінці гальмування, якщо в коло якоря ввести додатковий резистор з опором $R_d = 3.8$ Ом.

2.1.3.6. Визначити кутову швидкість і струм у колі якоря двигуна постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН180М ($P_H = 8.0$ кВт, $U_H = 220$ В, $I_H = 43.8$ А, $n_H = 1060$ об/хв..., $R_{я} + R_{дп} = 0.303$ Ом), якщо

статичний момент на валу двигуна $M_c = 0.47 M_H$, а магнітний потік $\Phi_1 = 0.47 \Phi_H$.

2.1.3.7. Визначити величину опорів, які потрібно ввімкнути в коло якоря двигуна постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН225L ($P_H = 30$ кВт, $U_H = 220$ В, $I_H = 161.4$ А, $n_H = 1060$ об/хв..., $R_{яд} = 0.0687$ Ом) для забезпечення таких режимів роботи механізму:

- 1) $n_1 = 300$ об/хв...; $M_{c1} = 51$ Н·м,
- 2) $n_2 = 600$ об/хв...; $M_{c2} = 110$ Н·м,
- 3) $n_3 = 900$ об/хв...; $M_{c3} = 170$ Н·м.

2.1.3.8. Визначити величину опору додаткового резистора, який потрібно ввімкнути в колі якоря двигуна постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН132L ($P_H = 3.0$ кВт, $U_H = 220$ В, $I_H = 18.1$ А, $n_H = 1000$ об/хв..., $R_{я} + R_{дп} = 1.52$ Ом, $R_{оз} = 183$ Ом) для одержання швидкості обертання $n_c = 4000$ об/хв. при статичному моменті на валу двигуна $M_c = 5.6$ Н·м. Потік вважати пропорційним струмові збудження.

2.1.3.9. Стругальний верстат приводиться в рух двигуном постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН132М ($P_H = 2.5$ кВт, $U_H = 220$ В, $I_H = 15.5$ А, $n_H = 1000$ об/хв., $R_{я} + R_{дп} = 1.843$ Ом). У робочому режимі статичний момент $M_{c1} = 0.81 M_H$, а при неробочому ході $M_{c2} = 0.21 M_H$. Визначити швидкість обертання двигуна в робочому режимі та при неробочому ході верстата для таких напруг на якорі двигуна: $U_1 = U_H$; $U_2 = 0.71 U_H$; $U_3 = 1.1 U_H$. Напруга на обмотці збудження стабільна і дорівнює номінальній.

2.1.3.10. Підйомна лебідка крана приводиться в рух двигуном постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН280М ($P_H = 45$ кВт, $U_H = 220$ В,

$I_H = 237.8$ А, $n_H = 750$ об/хв..., $R_{яд} = 0.049$ Ом). Параметри кінематичної схеми механізму мають такі значення: $D_1 = 0.65$ м, $Z_1 = 20$, $Z_2 = 60$, $Z_3 = 15$, $Z_4 = 60$. Швидкість при підйманні та опусканні вантажу змінюється за допомогою додаткових резисторів у колі якоря.

Розрахувати величину опору додаткового резистора, який треба ввімкнути в коло якоря цього двигуна для забезпечення:

- підймання вантажу масою 3000 кг зі швидкістю 25 м/хв..;
- опускання цього вантажу з такою ж швидкістю.

В якому режимі повинен працювати двигун при опусканні вантажу масою 300 кг зі швидкістю 25 м/хв..?

2.1.3.11. Шпиндель токарного верстату приводиться в рух двигуном постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПФ225М ($P_H = 22$ кВт, $U_H = 220$ В, $I_H = 121.2$ А, $n_H = 1000$ об/хв., $R_я + R_{дп} = 0.129$ Ом). Кінематична схема механізму зображена на рис. 2.6, на якому параметри мають такі значення: $Z_1 = 20$, $Z_2 = 60$, $Z_3 = 15$, $Z_4 = 90$. Визначити кутову швидкість шпинделя при статичному моменті на його валу $M_{c1} = 185$ Н·м та при $M_{c2} = 2500$ Н·м, якщо двигун працює на природній механічній характеристиці, а також при введеному додатковому резисторі в колі якоря з опором $R_d = 0.6$ Ом.

2.1.3.12. Визначити аналітичним методом величину опору резисторів R_n та $R_{ш}$, які потрібно ввімкнути послідовно і паралельно (рис.П2.7) в коло якоря двигуна постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН132М ($P_H = 7.0$ кВт, $U_H = 220$ В, $I_H = 38.3$ А, $n_H = 2240$ об/хв., $R_я + R_{дп} = 0.392$ Ом), щоб одержати кутову швидкість $\omega_c = 0.28 \omega_H$, при $\omega_0 = 0.42 \omega_0$, якщо статичний момент на валу двигуна $M_c = 0.7 M_H$.

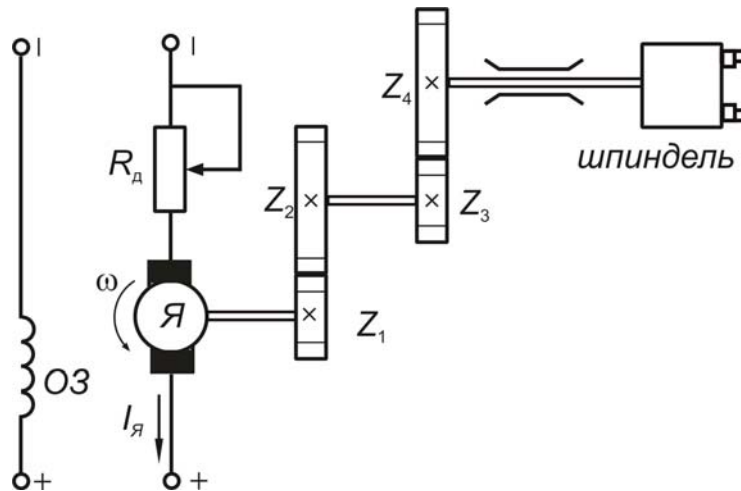


Рисунок.П2.6 - Кінематична схема механізму шпинделя

2.1.3.13. Визначити графоаналітичним методом величину опору резисторів $R_{\text{п}}$ та $R_{\text{ш}}$, які потрібно ввімкнути послідовно й паралельно (рис. П2.7) в коло якоря двигуна з незалежним збудженням типу 2ПН112L ($P_{\text{н}} = 2.2$ кВт, $U_{\text{н}} = 220$ В, $I_{\text{н}} = 13.3$ А, $n_{\text{н}} = 1500$ об/хв., $R_{\text{яд}} = 1.816$ Ом), щоб одержати механічну характеристику, що проходить через точки: $M = 0$, $\omega_0 = 57$ рад/с та $M = M_{\text{с}} = 12$ Н·м, $\omega_{\text{с}} = 31$ рад/с.

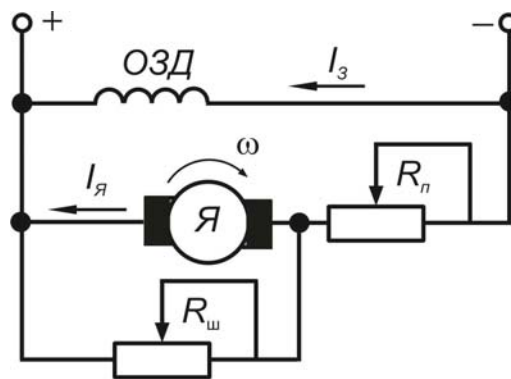


Рисунок П2.7 – Схеми ввімкнення опорів

2.1.3.14. Визначити опори резисторів $R_{\text{п}}$ і $R_{\text{ш}}$, які треба ввімкнути в коло якоря двигуна постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН132М ($P_{\text{н}} = 10.5$ кВт, $U_{\text{н}} = 220$ В, $I_{\text{н}} = 56.8$ А, $n_{\text{н}} = 3000$ об/хв., $R_{\text{я}} + R_{\text{дп}} = 0.234$ Ом), схема вмикання якого наведена на рис.2.47, щоб момент

короткого замикання $M_{кз} = 2M_n$, а при нульовому значенні моменту двигун розвиває швидкість $\omega_0 = 62$ рад/с.

2.1.3.15. Двигун постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН225М ($P_n = 22$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 122$ А, $n_n = 1000$ об/хв., $R_{яд} = 0.1289$ Ом), ввімкнено за схемою рис.2.4. Послідовно в коло якоря ввімкнено додатковий резистор $R_n = 0.54$ Ом. При нульовому значенні моменту двигун обертається з кутовою швидкістю $\omega_0 = 42$ рад/с. Визначити величину опору резистора $R_{ш}$, що ввімкнений паралельно до якоря.

2.1.3.16. Розрахувати і побудувати механічну характеристику двигуна постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН160М ($P_n = 4.5$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 25.7$ А, $n_n = 1000$ об/хв., $R_{яд} = 0.715$ Ом), якщо його ввімкнути за схемою з шунтуванням якоря (рис.2.4) з опорами резисторів: $R_n = 1.1$ Ом, $R_{ш} = 0.71$ Ом.

2.1.3.17. Визначити величину опорів резисторів R_n і $R_{ш}$ у схемі, зображеній на рис.2.4, які треба ввімкнути в коло якоря двигуна постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН112L ($P_n = 5.3$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 30.1$ А, $n_n = 3000$ об/хв., $R_{я} + R_{дп} = 0.437$ Ом), щоб при номінальному навантаженні та повзучій кутовій швидкості $\omega_1 = 30$ рад/с перепад швидкості не перевищував $\Delta\omega = 15$ рад/с.

2.1.3.18. Розрахувати та побудувати електромеханічну характеристику двигуна постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН280М ($P_n = 45$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 234.8$ А, $n_n = 700$ об/хв., $R_{яд} = 0.049$ Ом, $R_{оз} = 28$ Ом), а також штучну електромеханічну характеристику при ослабленому магнітному потоці, якщо в коло обмотки збудження

ввімкнути додатковий резистор з опором $R_d = 18.1$ Ом. Вважати, що магнітна система двигуна ненасичена.

2.1.3.19. Визначити величину опору додаткового резистора, який треба ввімкнути послідовно з обмоткою збудження двигуна постійного струму незалежного збудження типу 2ПН180М ($P_H = 8.0$ кВт, $U_H = 220$ В, $I_H = 43.8$ А, $n_H = 1060$ об/хв., $R_{яд} = 0.303$ Ом, $R_{оз} = 74.8$ Ом), щоб при статичному моменті на валу двигуна $M_c = 0.61 M_H$ одержати кутову швидкість $\omega_c = 270$ рад/с. Вважати, що магнітна система машини ненасичена.

2.1.3.20. Визначити кутову швидкість ω_H , та момент короткого замикання $M_{кз}$ двигуна постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН132L ($P_H = 5.5$ кВт, $U_H = 220$ В, $I_H = 31.1$ А, $n_H = 1500$ об/хв., $R_{яд} = 0.592$ Ом, $R_{оз} = 101$ Ом), якщо в коло обмотки збудження ввести додатковий резистор з опором $R_d = 101$ Ом. Вважати, що магнітна система двигуна ненасичена.

2.1.3.21. Розрахувати та побудувати електромеханічну характеристику $\omega = f(I_a)$ при динамічному гальмуванні двигуна постійного струму незалежного збудження серії П101 ($P_H = 32$ кВт, $U_H = 220$ В, $I_H = 172$ А, $n_H = 600$ об/хв., $R_a + R_{дп} = 0.075$ Ом), якщо в коло його якоря введений додатковий резистор з опором $R_d = 0.51$ Ом.

2.1.3.22. Визначити величину опору додаткового резистора R_d , який треба ввімкнути послідовно в коло якоря двигуна постійного струму незалежного збудження типу 2ПН132L ($P_H = 1.9$ кВт, $U_H = 220$ В, $I_H = 11.3$ А, $n_H = 750$ об/хв., $R_{яд} = 0.995$ Ом) при роботі в режимі динамічного гальмування. Що при опусканні вантажу зі статичним моментом $M_c = 0.75 M_H$ він розвивав швидкість $\omega_c = 61$ рад/с.

2.1.3.23. Двигун постійного струму незалежного збудження типу 2ПН250L ($P_n = 30$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 162$ А, $n_n = 750$ об/хв., $R_{яд} = 0.082$ Ом) приводить в рух лебідку крана і підіймає вантаж, який створює на його валу статичний момент $M_c = 0.68 M_n$.

Визначити кутову швидкість електроприводу при опусканні цього вантажу, якщо двигун перевести в режим динамічного гальмування і ввести в коло його якоря додатковий резистор з опором $R_d = 0.11$ Ом. ККД передач $\eta = 0.82$.

2.1.3.24. Двигун постійного струму незалежного збудження типу 2ПН180L ($P_n = 10$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 55$ А, $n_n = 1000$ об/хв., $R_{яд} = 0.279$ Ом) працює з навантаженням $M_c = 0.71 M_n$. Визначити аналітичним і графічним методами величину опору додаткового резистора, який потрібно ввімкнути послідовно в коло якоря при переведенні його в режим динамічного гальмування, щоби початковий момент дорівнював $2M_n$.

2.1.3.25. Визначити величину початкового поштовху струму при переведенні двигуна постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН250М ($P_n = 37$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 198$ А, $n_n = 1000$ об/хв., $R_{яд} = 0.082$ Ом) який працює на природній механічній характеристиці з активним статичним моментом на валу $M_c = 0.63M_n$, якщо перевести його в режим проти-вмикання і при цьому ввімкнути послідовно в коло якоря додатковий резистор з опором $R_d = 1.7$ Ом. . Визначити також величину кутової швидкості, яку розвине двигун у протилежному напрямку, після закінчення перехідного процесу.

2.1.3.26. Двигун постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН180L ($P_n = 18.5$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 96.7$ А, $n_n = 1500$ об/хв.,

$R_{\text{яд}} = 0.109 \text{ Ом}$, $R_{\text{яд}} = 3I_{\text{н}}$) приводить в рух механізм, що створює на його валу постійний статичний активний момент $M_c = 104 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Визначити яку швидкість буде розвивати двигун, якщо послідовно в коло його якоря ввести додатковий резистор з опором $R_d = 0.52 \text{ Ом}$. Визначити також величину опору додаткового резистора, який потрібно ввімкнути послідовно в коло якоря двигуна при переведенні його в режим проти вмикання зі штучної характеристики, щоб струм у колі якоря при цьому не перевищив допустимого значення.

2.1.3.27. Двигун постійного струму незалежного збудження типу 2ПБ180L ($P_{\text{н}} = 11 \text{ кВт}$, $U_{\text{н}} = 220 \text{ В}$, $I_{\text{н}} = 56 \text{ А}$, $n_{\text{н}} = 2200 \text{ об/хв.}$, $R_{\text{яд}} = 0.109 \text{ Ом}$, $R_{\text{оз}} = 174 \text{ Ом}$, $I_{\text{доп}} = 3I_{\text{н}}$) Визначити кутову швидкість, яку розвине двигун після реверсування, якщо при гальмуванні проти вмикання послідовно в коло якоря введено додатковий резистор для обмеження струму до допустимого значення, а статичний момент після зміни напрямку обертання зменшиться у два рази.

2.1.3.28. Двигун постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН160L ($P_{\text{н}} = 16 \text{ кВт}$, $U_{\text{н}} = 400 \text{ В}$, $n_{\text{н}} = 0.875 n_{\text{н}} = 2360 \text{ об/хв.}$, $n_{\text{макс}} = 4000 \text{ об/хв.}$, $R_{\text{яд}} = 0.302 \text{ Ом}$, $R_{\text{яд}} = 0.302 \text{ Ом}$, $R_{\text{оз}} = 49.4 \text{ Ом}$, $U_{\text{оз}} = 220 \text{ В}$, $I_{\text{доп}}/I_{\text{н}} = 3$) працює на природній механічній характеристиці зі статичним моментом на валу двигуна $M_c = 0.91M_{\text{н}}$. Для досягнення максимальної швидкості застосовується ослаблення потоку. Визначити величину опору додаткового резистора, який потрібно в коло обмотки збудження двигуна для одержання максимальної швидкості, а також допустиме значення статичного моменту, враховуючи, що струм у колі якоря при цьому не повинен перевищувати $1.1I_{\text{н}}$. Розрахувати й побудувати механічні

характеристики електроприводу при номінальному та максимально ослабленому магнітному потоці.

2.1.3.29. Розрахувати аналітичним та графоаналітичним методами опори резисторів для запуску двигуна постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН132М ($P_n = 10.5$ кВт, $U_n = 200$ В, $n_n = 3000$ об/хв., $R_{яд} = 0.234$ Ом) у чотири ступені, при статичному навантаженні на валу двигуна $M_c = 0.78M_n$, і допустимому моменті $M_{доп} = 3M_n$.

2.1.3.30. Розрахувати опори резисторів для запуску двигуна постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН160L ($P_n = 11$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 58.4$ А, $n_n = 1500$ об/хв., $R_{яд} = 0.169$ Ом) таким чином, щоби при допустимому струмі в колі якоря $I_{доп} = 3I_n$ середній пусковий момент дорівнював $M_{сер} = 1.91M_n$. Побудувати пускову діаграму.

2.1.3.31. Визначити аналітичним методом величину мінімального струму перемикання при запуску двигуна постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН250L ($P_n = 45$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 239.2$ А, $n_n = 1000$ об/хв., $R_{яд} = 0.046$ Ом) у три ступені з максимальним струмом перемикання $I_1 = 2.4I_n$. Магнітний потік збудження двигуна – номінальний.

2.1.3.32. Визначити величину опорів пускових резисторів і значення максимального струму перемикання при пуску двигуна постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН132М ($P_n = 4.0$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 23$ А, $n_n = 1500$ об/хв., $R_{яд} = 0.9$ Ом) у сім ступенів з мінімальним струмом перемикання $I_2 = 30$ А. Магнітний потік збудження двигуна – номінальний.

2.1.3.33. Розрахувати графоаналітичним методом кількість ступенів реостату і величину їх опорів для ступінчастого запуску двигуна

постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН180М ($P_n = 15$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 79.7$ А, $n_n = 1500$ об/хв., $R_{яд} = 0.14$ Ом), якщо максимальний струм перемикачів $I_1 = 160$ А, а момент статичного навантаження на валу двигуна при розгоні $M_c = 0.45M_n$. Магнітний потік збудження двигуна – номінальний.

2.1.3.34. Визначити величину опору додаткового резистора, який треба ввімкнути послідовно в коло якоря двигуна постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН180М ($P_n = 37$ кВт, $U_n = 440$ В, $I_n = 107$ А, $n_n = 3150$ об/хв., $R_{яд} = 0.14$ Ом), що працює на природній механічній характеристиці зі статичним навантаженням $M_c = 72M_n$, для забезпечення гальмування противмиканням з середнім гальмівним моментом $M_r = 214$ Н·м. Магнітний потік збудження двигуна – номінальний.

2.1.3.35. При гальмуванні противмиканням послідовно в коло якоря двигуна постійного струму з незалежним збудженням типу 2ПН250L ($P_n = 22$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 122$ А, $n_n = 600$ об/хв., $R_{яд} = 0.129$ Ом), введено додатковий резистор з опором $R_d = 27$ Ом.

Визначити величину початкового кидка струму в колі якоря, при гальмуванні з природної механічної характеристики. Якщо статичний момент на валу двигуна $M_c = 170$ Н·м, величину струму в колі якоря при зупинці двигуна, а також значення середнього гальмівного моменту.

2.1.3.36. Визначити співвідношення швидкостей та відносне падіння швидкості двигуна постійного струму з незалежним збудженням при роботі на природній характеристиці й на штучній при $U = 0.5 U_n$ та при $\Phi = 0.85\Phi_n$, якщо двигун завантажений моментом $M_c = 0.85M_n$, а номінальне відносне падіння швидкості $\delta\omega_n \% = \Delta\omega_n \cdot 100/\omega_{0n} = 5.2\%$.

П2.2. Властивості і характеристики електроприводів з двигуном постійного струму послідовного й змішаного збудження

П2.2.1. Основні розрахункові формули та співвідношення

Природна електромеханічна характеристика

$$\omega = \frac{U_H}{c\Phi} - \frac{R_{яд} + R_{одз}}{c\Phi} \cdot I_{я}.$$

Природна механічна характеристика

$$\omega = \frac{U_H}{c\Phi} - \frac{R_{яд} + R_{одз}}{(c\Phi)^2} \cdot M_{я}.$$

У двигунів постійного струму з послідовним та змішаним збудженням $\Phi = f(I_{я})$, тому їх природні характеристики доцільніше будувати графоаналітичним методом на основі універсальних кривих, зображених на рисунках П2.8. та П2.11.

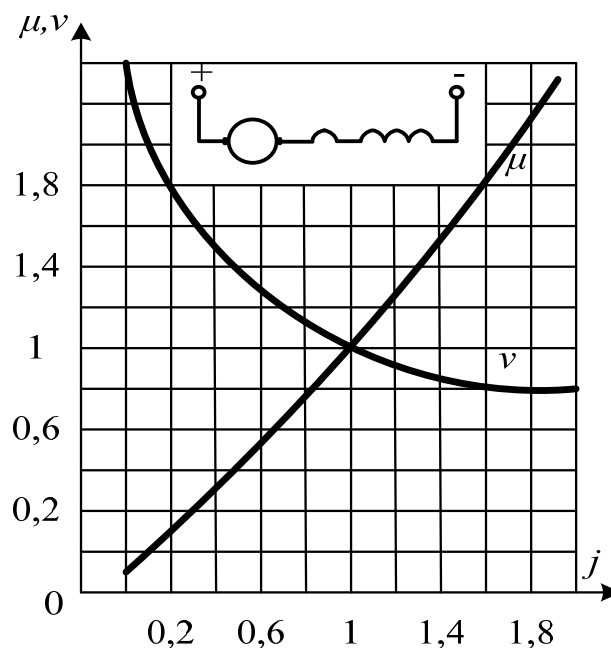


Рисунок П2.8 - Універсальні криві

$$\omega_{шт} = \omega_{пр} \cdot \frac{U_H - (R_{яд} + R_D) \cdot I_{я}}{U_H - R_{яд} \cdot I_{я}};$$

Штучна електромеханічна характеристика при введеному послідовно в коло якоря додатковому резисторі

$$R_{Д1} = \frac{U_H}{I_H} - R_{ОЗ};$$

де $R_{яд} = R_{оя} + R_{ш} + R_{о\text{ пос з}}$; $\omega_{пр}$ - кутова швидкість двигуна на природну електромеханічній характеристиці при заданому $I_{я}$.

Розрахунок опорів пускових резисторів для двигунів з послідовним та змішаним збудженням.

Графоаналітичний метод

Методика розрахунку пускових резисторів для двигуна з послідовним збудженням подана в задачі 2.2.12. Треба відмітити, що чим більше співвідношення I_1/I_2 , тим меншою буде кількість пускових резисторів.

На рис. П2.9. наведений графоаналітичний розрахунок опорів пускових резисторів у чотири ступені для двигуна з послідовним збудженням.

Величина опорів пускових резисторів визначається у відповідному масштабі з графіка на рис.П2.10; де r_1 - опір резистора, який вимикається першим.

Опори пускових резисторів для двигуна зі змішаним збудженням розраховуються таким же методом, як і для двигуна з послідовним збудженням.

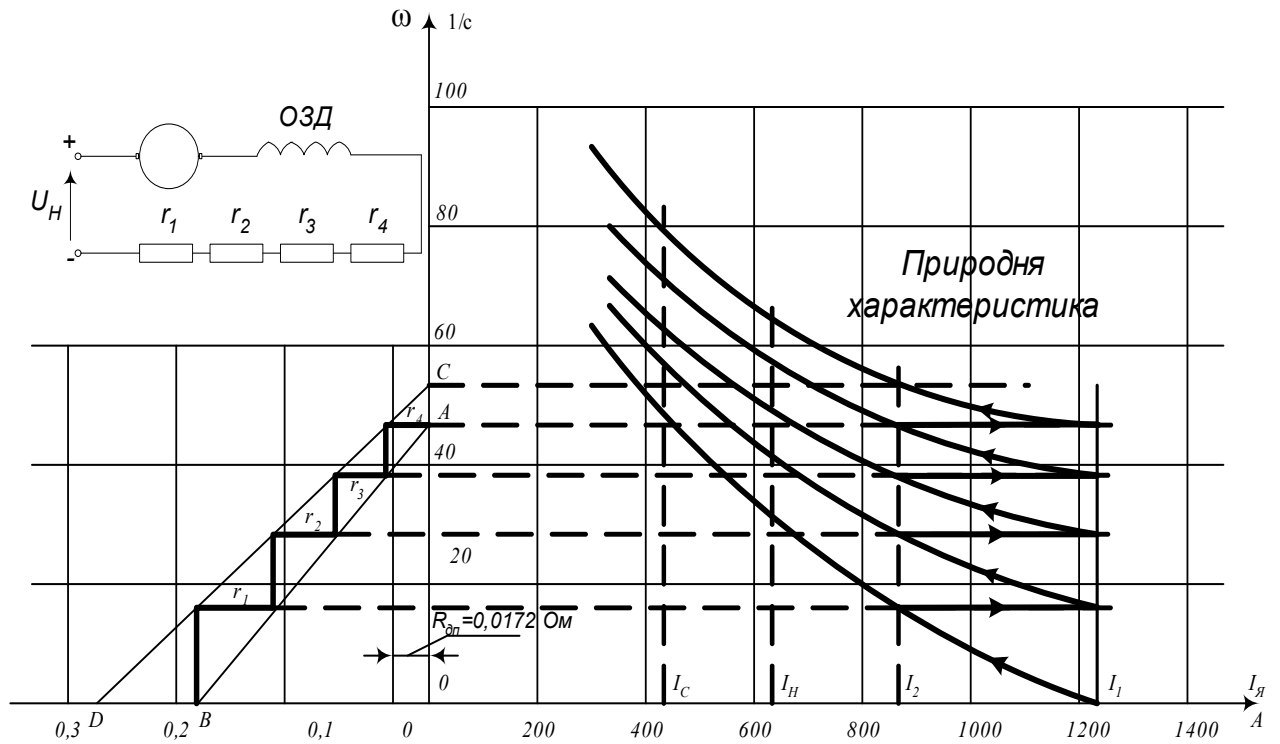


Рисунок П2.9 - Графоаналітичний розрахунок опорів пускових резисторів

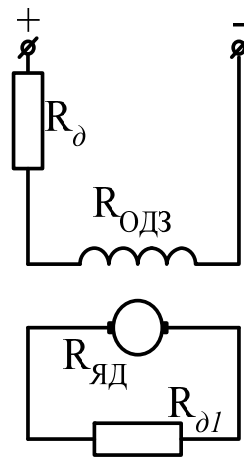


Рисунок П2.10 – Електрична схема ДПС при динамічному гальмуванні з незалежним збудженням

Опір додаткових резисторів при динамічному гальмуванні з незалежним збудженням (рис. 2.10)

$$R_{д1} = \frac{U_H}{I_H} - R_{ОЗ};$$

$$R_{д2} = \frac{E_{по}}{I_{доп}} - R_{яв} = \frac{E_H \cdot \omega_{по}}{\omega_H \cdot I_{доп}} - R_{яв}.$$

Опір додаткового резистора при гальмуванні противмиканням

$$R_{пр} = \frac{(U_H + E_{по})}{I_{доп}} - (R_{яв} + R_{оз});$$

$$E_{по} = \frac{(U_H - I_{доп} \cdot (R_{яв} + R_{оз})) \cdot \omega_{по}}{\omega_{пр}};$$

де $E_{по}$ - ЕРС двигуна на початку динамічного гальмування;
 $I_{доп}$ - допустимий струм якорного кола; $\omega_{пр}$ - кутова швидкість на природній характеристиці, яка відповідає $I_{доп}$; $R_{яв} = (R_{оя} + R_{дп})$

Електромеханічна характеристика двигуна послідовного збудження при шунтуванні обмотки якоря (рисунок П.7).

$$\omega = \frac{U_H}{c\Phi_1} \cdot \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R'_п} - \left(I + \frac{R'_п \cdot R_{ш}}{R_{яд} \cdot (R'_п + R_{ш})} \right) \cdot \frac{R_{яд}}{c\Phi_1} \cdot I_{я}.$$

механічна характеристика двигуна послідовного збудження при шунтуванні обмотки якоря (рисунок П2.11)

$$\omega = \frac{U_H}{c\Phi_1} \cdot \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R'_п} - \left(I + \frac{R'_п \cdot R_{ш}}{R_{яд} \cdot (R'_п + R_{ш})} \right) \cdot \frac{R_{яд}}{(c\Phi_1)^2} \cdot M,$$

де $R'_п = (R_{оз} + R_{п})$; Φ_1 - магнітний потік збудження, що залежить від струму в колі якоря.

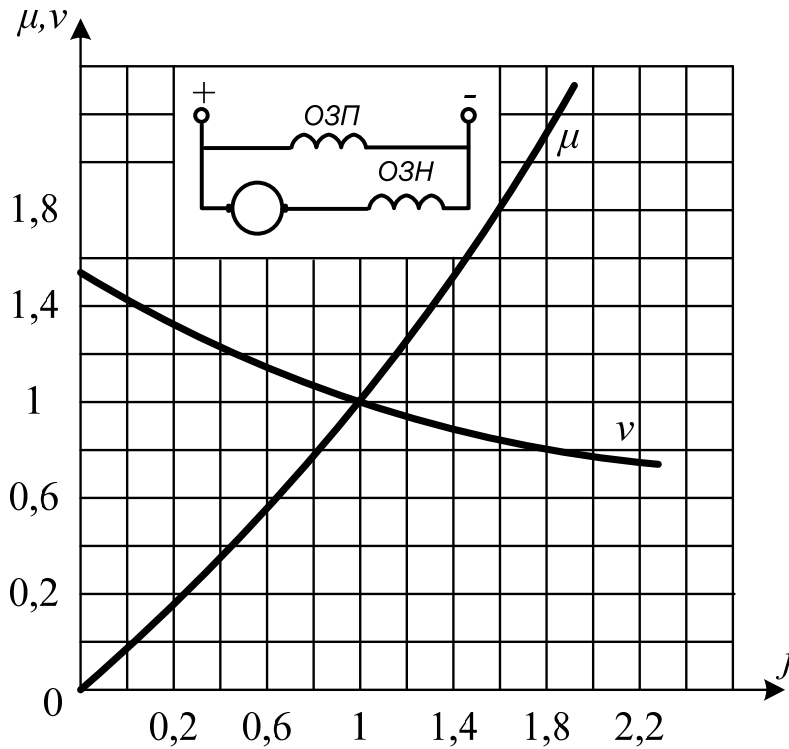


Рисунок П2.11 - Механічна характеристика двигуна послідовного збудження при шунтуванні обмотки якоря

П2.2.2. Приклади розв'язування задач

2.2.2.1. Двигун постійного струму з послідовним збудженням типу МП-51 ($P_n = 25$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 134$ А, $n_n = 575$ об/хв., $R_{я} = 0.0845$ Ом $R_{зб} = 0.032$ Ом) працює на природній характеристиці з реактивним моментом на валу двигуна зі швидкістю обертання $n_c = 850$ об/хв..
Визначити:

- величину опору резистора, який треба ввімкнути послідовно в коло якоря при переведенні двигуна в режим проти вмикання, щоби ЕРС в якорі після перемикання дорівнювала номінальній напрузі;

- уставлену кутову швидкість на реостатній характеристиці в протилежному напрямку обертання, якщо величина статичного моменту на валу залишиться незмінною.

Розв'язок:

Відносна швидкість

$$v_c = n_c/n_n; v_c = 850/575 = 1.48.$$

Номінальна кутова швидкість

$$\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot n_n/60; \omega_n = 2 \cdot \pi \cdot 575/60 = 60.2 \text{ рад/с.}$$

Кутова швидкість при статичному навантаженні

$$\omega_c = \pi \cdot n_n/30; \omega_c = \pi \cdot 850/30 = 89 \text{ рад/с.}$$

Конструктивний коефіцієнт при номінальних параметрах

$$c\Phi_n = \frac{U_n - (R_{\text{яд}} + R_{\text{зб}}) \cdot I_n}{\omega_n};$$
$$c\Phi_n = \frac{220 - (0.0845 + 0.032) \cdot 134}{60.2} = 3.4 \text{ В} \cdot \text{с/рад.}$$

Конструктивний коефіцієнт при кутовій швидкості ω_c та ЕРС, рівній

U_n

$$c\Phi_c = E_c/\omega_c; c\Phi_c = 280/89 = 2.47 \text{ В} \cdot \text{с/рад.}$$

Відносне значення магнітного потоку при цьому навантаженні

$$k_\Phi = c\Phi_c/c\Phi_n;$$
$$k_\Phi = 2.47/3.4 = 0.727.$$

З кривої намагнічування для такої величини потоку відносна величина струму в колі якоря $i_c = 0.47$.

Абсолютне значення струму в колі якоря

$$R_{\text{кя}} = (U_{\text{н}} + E)/I_{\text{с}};$$

$$R_{\text{кя}} = (220+220)/63 = 6.98 \text{ Ом.}$$

Додатковий опір, який потрібно ввімкнути в коло якоря

$$R_{\text{д}} = R_{\text{кя}} - (R_{\text{я}} + R_{\text{зб}});$$

$$R_{\text{д}} = 6.98 - (0.0845 + 0.032) = 6.86 \text{ Ом.}$$

Номінальний момент на валу двигуна

$$M_{\text{н}} = P_{\text{н}} \cdot 10^3 / \omega_{\text{н}};$$

$$M_{\text{н}} = 25 \cdot 10^3 / 60.2 = 415.3 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

На універсальних характеристиках $\mu = f_1(i)$ та $\nu = f_2(i)$ (рис. П2.8) відносній швидкості $\nu = 1.48$ відповідає відносне значення моменту $\mu_{\text{с}} = 0.27$, з яким працює двигун на природній характеристиці до перемикання.

Абсолютне значення статичного моменту

$$M_{\text{с}} = \mu_{\text{с}} \cdot M_{\text{н}};$$

$$M_{\text{с}} = 0.27 \cdot 415.3 = 112.1 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

При переході швидкості двигуна через нуль, тобто при $\omega = 0$. струм в колі якоря на штучній електромеханічній характеристиці

$$I_1 = U_{\text{н}} / R; \quad I_1 = 220 / 6.98 = 31.5 \text{ А.}$$

Відносне значення цього струму

$$i_1 = I_1 / I_{\text{н}}; \quad i_1 = 31.5 / 134 = 0.235.$$

На універсальній характеристиці $\mu = f_1(i)$ (рис. П2.8) відносному значенню i_1 відповідає $\mu_1 = 0.14$.

Абсолютне значення пускового моменту

$$M_1 = \mu_1 \cdot M_H; \quad M_1 = 0.14 \cdot 415.3 = 58.14 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Отже, двигун, зупинившись, не зможе обертатись в протилежному напрямі, тому що реактивний статичний момент $M_c > M_1$.

2.2.2.2. Розрахувати пускові опори для двигуна постійного струму послідовного збудження типу ДП-82А ($P_H = 125$ кВт, $U_H = 220$ В, $I_H = 630$ А, $n_H = 590$ об/хв., $R_{\text{я}} = 0.0121$ Ом, $R_{\text{зб}} = 0.051$ Ом) При статичному навантаженні двигуна струм у колі якоря $I_c = 440$ А. Максимальний струм перемикачів $I_1 = 1280$ А; кількість пускових ступенів резистора $m = 4$.

Побудувати пускову діаграму приводу.

Розв'язок:

Номінальна кутова швидкість

$$\omega_H = \pi \cdot n_H / 30; \quad \omega_H = 3.14 \cdot 590 / 30 = 61.8 \text{ рад/с}.$$

Використовуючи універсальну характеристику $v = f(i)$, наведену на рис. Д.28, розраховують природну електромеханічну характеристику (табл. 2.1).

На основі даних (табл. П2.1) будують природну характеристику, $\omega = f(I_{\text{я}})$, (рис. П2.12). Вліво від початку координат відкладають у відповідному масштабі величину внутрішнього опору двигуна $R_{\text{вн}} = R_{\text{я}} + R_{\text{зб}} = 0.0172$ Ом.

Визначають кутову швидкість на природній характеристиці, яка відповідає струмові I_1 ; $\omega_1 = 48$ рад/с. Провівши пряму через точку з координатами: $\omega = \omega_1$, $I = I_1$, паралельну до осі абсцис, знаходять точку А.

Таблиця П2.1 – Дані розрахунку природної електромеханічної характеристики

i	-	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1,8	2	2.2	2.4
v	-	1.6	1.23	1.09	1	0.94	0.89	0.85	0.81	0.78	0.75	0.73
$I_{я}$	А	252	398	504	630	756	882	1008	1134	1260	1386	1512
ω	1/с	99	76	67.4	61.8	58	55	52.5	50	48.2	46.4	45.1

Опір якірного кола двигуна при $\omega = 0$ та $I = I_1$

$$R_{як} = U_H / I_1; \quad R_{як1} = 220 / 1260 = 0.175 \text{ Ом}$$

Відклавши значення опору $R_{як1}$ вліво від початку координат, знаходять точку В й будують допоміжну пряму АВ, що є характеристикою $\omega = f(R_{як})$ при $I_я = I_1 = \text{const}$.

Задавшись величиною мінімального струму перемикавання $I_2 \geq 1.2 I_c$, методом поступового наближення знаходять $I_2 = 882$ А та відповідну йому кутову швидкість на природній характеристиці $\omega_2 = 55$ рад/с, таким чином, щоби двигун запускався у чотири ступені. Провівши пряму через точку з координатами: $\omega = \omega_1$, $I = I_2$, паралельно до осі абсцис, знаходять точку С.

Опір якірного кола двигуна при $\omega = 0$ та $I_2 = 882$ А

$$R_{як2} = U_H / I_2; \quad R_{як2} = 220 / 882 = 0.249 \text{ Ом}$$

Відклавши значення опору $R_{як2}$ вліво від початку координат, знаходять точку D та будують допоміжну пряму CD, яка є характеристикою $\omega = f(R_{як})$ при $I_я = I_2 = \text{const}$.

Починаючи з точки D, будують ламану лінію між прямими АВ та CD.

Остання горизонтальна пряма накресленої ламаної повинна прийти в точку А.

Величини опорів пускових резисторів визначають за графіком.

Таблиця П2.2 - Дані розрахунку штучної електромеханічної характеристики

$I_{я}$, А	252	378	504	630	756	882	1008	1134	1260	1386
$\omega_{пр}$, 1/с	99	76	67.4	61.8	58	55	52.5	50	48.2	46.4
$\omega_{ш1}$, 1/с	80.7	54.7	42	32.8	24.6	17.6	11.3	5.42	0	-5.3
$\omega_{ш2}$, 1/с	87.3	62.4	51.3	43	36.6	31.1	26.2	21.5	17.3	13.4
$\omega_{ш3}$, 1/с	92.8	68.7	58.7	51.7	46.6	42.2	38.4	34.7	31.6	28.8
$\omega_{ш4}$, 1/с	96.3	72.9	63.7	57.5	49.5	48.7	45.7	43.5	41.2	39.1

$$r_1 = 0.056 \text{ Ом} \quad R_1 = 0.174 \text{ Ом}$$

$$r_2 = 0.047 \text{ Ом} \quad R_3 = 0.118 \text{ Ом}$$

$$r_3 = 0.031 \text{ Ом} \quad R_3 = 0.071 \text{ Ом}$$

$$r_4 = 0.023 \text{ Ом} \quad R_4 = 0.040 \text{ Ом}$$

Штучна електромеханічна характеристика

$$\omega_{ши} = \omega_{пр} = \frac{U_n - I_{я} \cdot R_i}{U_n - I_{я} \cdot R_{вн}}; \quad \text{де } i = 1, 2, 3, 4$$

Задаючись струмом $I_{я}$, знаходять на природній характеристиці (рис. П2.8) відповідну йому кутову швидкість $\omega_{пр}$ і розраховують для заданого струму кутову швидкість на штучній характеристиці з відповідним опором кола якоря R_i . Результати розрахунку зведені в табл. П2.2.

Штучні характеристики та пускова діаграма приводу зображені на рис. П2.12 у першому квадранті.

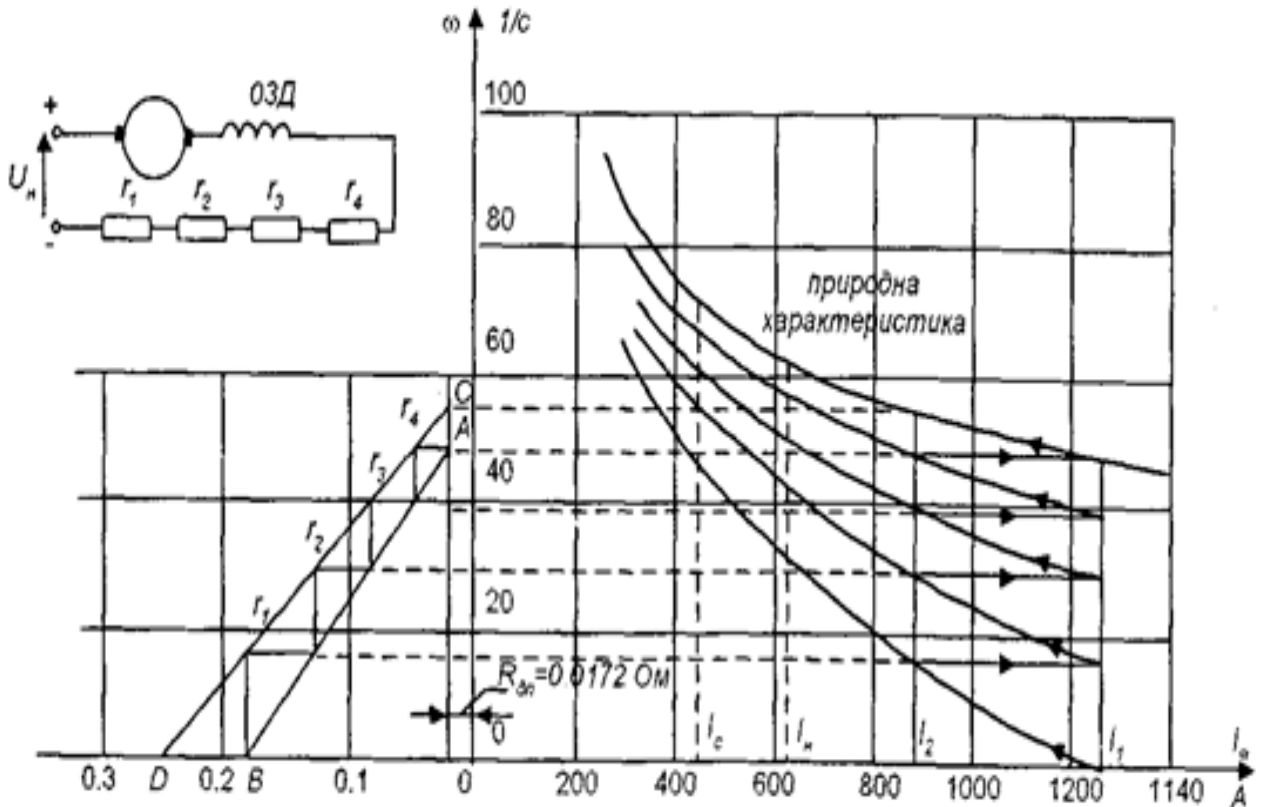


Рисунок П2.12 - Штучні характеристики та пускова діаграма приводу

П2.2.3. Задачі для самостійного розв'язку

2.2.3.1. Визначити опір резистора, який треба ввімкнути в коло якоря двигуна постійного струму з послідовним збудженням типу МП-41 ($P_n = 12.5$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 72$ А, $n_n = 680$ об/хв., $R_{яд} + R_{зд} = 0.331$ Ом), щоб при навантаженні на валу $M_c = 162$ Н·м, двигун розвивав кутову швидкість $\omega_c = 32$ рад/с.

2.2.3.4. Розрахувати опори резисторів, які потрібно ввімкнути послідовно в коло якоря двигуна постійного струму з послідовним збудженням типу МП-32 ($P_n = 9.0$ кВт, $U_n = 220$ В, $I_n = 52$ А, $n_n = 750$ об/хв., $R_{я} + R_{зб} = 0.491$ Ом), для запуску його в три ступені при статичному

навантаженні на валу $M_c = 0.42 \text{ Н} \cdot \text{м}$, з середнім пусковим моментом $M_n = 200 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

2.2.3.6. Двигун постійного струму з послідовним збудженням типу МП-32 ($P_n = 9.0 \text{ кВт}$, $U_n = 220 \text{ В}$, $I_n = 52 \text{ А}$, $n_n = 750 \text{ об/хв.}$, $R_{\text{я}} + R_{\text{зб}} = 0.491 \text{ Ом}$) працює з послідовно ввімкненим у колі якоря додатковим опором $R_d = 0.68 \text{ Ом}$. Визначити кутову швидкість двигуна при трьох значеннях статичного моменту на його валу : $M_{c1} = 0.5 M_k$, $M_{c2} = 0.9 M_k$, та $M_{c3} = 1.25 M_k$.

2.2.3.8. Піднімальний механізм крана приводиться в рух двигуном постійного струму з послідовним збудженням типу МП-42 ($P_n = 17 \text{ кВт}$, $U_n = 220 \text{ В}$, $I_n = 92 \text{ А}$, $n_n = 680 \text{ об/хв.}$, $R_{\text{я}} + R_{\text{зб}} = 0.224 \text{ Ом}$). Діаметр барабана $D_6 = 0.5 \text{ м}$; передавальне число $i = 36$; ККД передач $\eta = 0.925$. Визначити:

- швидкість піднімання вантажу масою $m_1 = 1700 \text{ кг}$, коли двигун працює на природній механічній характеристиці;
- величину опору, який потрібно ввімкнути послідовно в коло якоря щоби механізм підіймав вантаж масою $m_2 = 4.9 \text{ т}$ зі швидкістю 17 м/хв. ;
- величину опору, який потрібно ввімкнути послідовно в коло якоря щоби двигун працюючи в режимі проти вмикання, опускав вантаж масою $m_3 = 3.4 \text{ т}$ зі швидкістю 15 м/хв.

2.2.3.5. Визначити кутову швидкість неробочого ходу та кутову швидкість при номінальному навантаженні двигуна постійного струму з послідовним збудженням типу МП-22 ($P_n = 4.5 \text{ кВт}$, $U_n = 220 \text{ В}$, $I_n = 28 \text{ А}$, $n_n = 880 \text{ об/хв.}$, $R_{\text{я}} = 0.87 \text{ Ом}$, $R_{\text{зб}} = 0.26 \text{ Ом}$), ввімкнено за схемою, показаною на рис.П2.13 з шунтуванням обмотки якоря, де $R_{II} = 0.92 \text{ Ом}$, $R_{III} = 0.38 \text{ Ом}$.

2.2.3.6. Визначити опір резистора, який потрібно ввести додатково послідовно в коло якоря двигуна постійного струму з послідовним збудженням, щоби забезпечити підймання вантажу масою $m_b=500\text{кг}$ зі швидкістю $v_2 = 2.1\text{м/с}$, якщо на природній характеристиці вантаж підіймався зі швидкістю $v_1 = 3.0\text{м/с}$, при кутовій швидкості двигуна $\omega_c = 60\text{ рад/с}$. Сумарний внутрішній опір кола якоря двигуна, що відповідає природній характеристиці, $R_{зб}=0.11\text{Ом}$; номінальна напруга $U_n=220\text{В}$; ККД передачі $\eta_n = 0.81$.

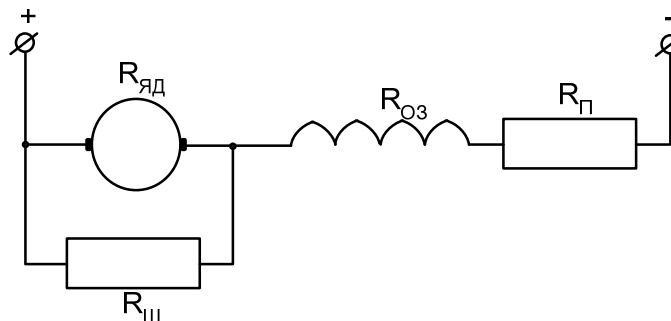


Рисунок П2.13 – Схема двигуна постійного струму з послідовним збудженням з шунтуванням обмотки якоря

При розрахунку користуватись універсальними характеристиками, наведеними на рис.П2.8.

2.2.3.7. Визначити кутову швидкість неробочого ходу і момент короткого замикання двигуна постійного струму з послідовним збудженням типу МП-42 ($P_n = 17\text{ кВт}$, $U_n = 220\text{ В}$, $I_n = 92\text{ А}$, $n_n = 680\text{ об/хв.}$, $R_я = 0.17\text{ Ом}$, $R_{зб} = 0.056\text{ Ом}$) ввімкнено за схемою, зображеною на рис. 2.13, якщо $R_{п} = 0.832\text{ Ом}$, $R_{ш} = 0.21\text{ Ом}$.

РОЗДІЛ ПЗ. ВЛАСТИВОСТІ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З ДВИГУНАМИ ЗМІННОГО СТРУМУ

Основні розрахункові формули та співвідношення

Синхронна швидкість обертання:

$$n_o = \frac{60 \cdot f}{P_H}$$

Синхронна кутова швидкість:

$$\omega_o = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{P_H}$$

ПЗ.1. ВЛАСТИВОСТІ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ

ПЗ.1.1 Основні розрахункові формули та співвідношення

Ковзання ротора:

$$S = \frac{n_o - n_H}{n_o} = \frac{\omega_o - \omega_H}{\omega_o}$$

Електромеханічна характеристика:

$$I_2' = \frac{U_\phi}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{S}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}}$$

Механічна характеристика:

$$M = \frac{m U_\phi r_2'}{S \omega_o \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{S}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}$$

або після математичних перетворень:

$$M = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + \varepsilon)}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S} + 2 \cdot \varepsilon} = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + a \cdot S_K)}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S} + 2 \cdot a \cdot S_K};$$

при $\varepsilon \rightarrow 0$

$$M = \frac{2 \cdot M_K}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S}};$$

де $a = \frac{r_1'}{r_2'}$ - співвідношення активних опорів статора й ротора; m - кількість фаз статора.

Критичне ковзання ротора:

$$S_K = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1'^2 + (x_1 + x_2')^2}};$$

Відносне значення активного опору статора:

$$\varepsilon = \frac{r_1}{\sqrt{r_1'^2 + (x_1 + x_2')^2}};$$

Критичний момент:

$$M_K = \frac{m \cdot U_\phi^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left(r_1 \pm \sqrt{r_1'^2 + (x_1 + x_2')^2} \right)}.$$

Номінальний активний опір обмотки ротора:

$$R_H = \frac{U_{2K}}{\sqrt{3} \cdot I_{2H}}.$$

Активний опір обмотки фази ротора:

$$r_2 = \frac{U_{2K} \cdot S_H}{\sqrt{3} \cdot I_{2H}}.$$

Коефіцієнт трансформації ЕРС від статора до ротора:

$$k_C = \frac{E_1}{U_{2K}} \approx \frac{0.95 \cdot U_H}{U_{2K}}.$$

Приведені опори ротора до обмотки статора:

$$z_2' = k_C^2 \cdot z_C; \quad r_2' = k_C^2 \cdot r_2; \quad x_2' = k_C^2 \cdot x_2.$$

Приведений активний опір ротора можна визначити також:

$$r_2' = \frac{M_{II} \cdot \omega_O}{3 \cdot I_{II}^2} \approx \frac{M_{II} \cdot \omega_O}{3 \cdot k_i^2 \cdot I_H^2}$$

де $k_i = I_{II}/I_H$; M_{II} - пусковий момент двигуна.

Механічна характеристика динамічного гальмування при ненасиченому магнітному колі двигуна:

$$M = \frac{-2 \cdot M_{KДГ}}{\frac{v}{v_K} + \frac{v_K}{v}};$$

де $v = \frac{n}{n_0} = \frac{\omega}{\omega_0}$ - відносна швидкість обертального руху.

Розрахунок опору пускових резисторів асинхронного двигуна з фазним ротором

Графоаналітичний розрахунок опору пускових резисторів у три ступені приведений у задачі 3.2.3.39. Треба відмітити, що чим більше співвідношення M_1/M_2 , тим меншою буде кількість пускових резисторів.

Аналітичний метод розрахунку

Ковзання, при якому перемикається резистор на m -ному ступені:

$$S_M = (\gamma \cdot \delta)^{M-1}; \quad \gamma = \frac{M_K}{M_1} + \sqrt{\left(\frac{M_K}{M_1}\right)^2 - 1};$$

$$\delta = \frac{M_K}{M_2} - \sqrt{\left(\frac{M_K}{M_2}\right)^2 - 1};$$

де M_K, M_I - відповідно, максимальний і мінімальний моменти перемикачів.

Критичне ковзання на m -ному ступені:

$$S_{KM} = \gamma^M \cdot \delta^{M-1}.$$

Значення опорів пускових резисторів асинхронного двигуна:

$$r_{Д1} = r_2 \cdot \left(\frac{S_{K1}}{S_K - 1} \right); \quad r_{Д2} = r_2 \cdot \left(\frac{S_{K2}}{S_K - 1} \right); \quad r_{Д3} = r_2 \cdot \left(\frac{S_{K3}}{S_K - 1} \right); \quad r_{ДМ} = r_2 \cdot \left(\frac{S_{KM}}{S_K - 1} \right);$$

ПЗ.1.2 Приклади розв'язування задач

3.1.2.1. Асинхронний двигун з фазним ротором типу МТЗ1-6 ($P_H = 11.0$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 28.4$ А, $n_H = 953$ об/хв., $r_1 = 0.415$ Ом, $x_1 = 0.465$, $U_{2к} = 200$ В, $I_{2н} = 35.4$ А, $r_2 = 0.132$ Ом, $x_2 = 0.27$, $k_e = 1.84$ Ом, $\lambda = M_K/M_H = 3.1$) працює з реактивним моментом на валу $M_c = 95$ Н·м.

Визначити величину пускового моменту цього двигуна та його кутову швидкість при статичному навантаженні, якщо в коло ротора ввести додатковий резистор з опором $R_d = 1.1$ Ом.

Розв'язок:

Приведені опори ротора до обмоток статора:

$$r'_2 = r_2 \cdot k_e^2; \quad r'_2 = 0.132 \cdot 1.84^2 = 0.447 \text{ Ом};$$

$$R'_d = R_d \cdot k_e^2; \quad R'_d = 1.1 \cdot 1.84^2 = 3.724 \text{ Ом};$$

$$x'_2 = x_2 \cdot k_e^2; \quad x'_2 = 0.132 \cdot 1.84^2 = 0.447 \text{ Ом};$$

Індуктивний опір при короткому замиканні:

$$x_k = x_1 + x'_2; \quad x_k = 0.465 + 0.914 = 1.379 \text{ Ом}.$$

Номинальна кутова швидкість:

$$\omega_H = \pi \cdot n_H / 30; \quad \omega_H = 3.14 \cdot 953 / 30 = 99.8 \text{ рад/с}.$$

Синхронна кутова швидкість:

$$\omega_0 = \pi \cdot n_0 / 30; \quad \omega_0 = 3.14 \cdot 1000 / 30 = 104.7 \text{ рад/с}.$$

Номінальний момент на валу двигуна:

$$M_n = P_n \cdot 10^3 / \omega_n; M_n = 11 \cdot 10^3 / 99.8 = 110.2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критичний момент двигуна:

$$M_k = 3.1 \cdot M_n; M_k = 3.1 \cdot 110.2 = 341 / 6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Механічна характеристика асинхронного двигуна:

$$M = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + \varepsilon)}{s/s_k + s_k/s + 2 \cdot \varepsilon}.$$

Критичне ковзання на штучній характеристиці:

$$s_{ку} = r^2_2 + R^2_\delta / \sqrt{r^2_1 + x^2_k}; \quad s_{ку} = 0.415 / \sqrt{0.415^2 + 1.379^2} = 0.29.$$

Відносна величина активного опору статора:

$$\varepsilon = \frac{r_1}{\sqrt{r^2_1 + x^2_k}}; \quad \varepsilon = \frac{0.415}{\sqrt{0.415^2 + 1.379^2}} = 0.29.$$

Пусковий момент на штучній характеристиці ($s = 1.0$):

$$M = \frac{2 \cdot 314.6 \cdot (1 + 0.29)}{1/2.9 + 2.9/1 + 2 \cdot 0.29} = 230.3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Співвідношення критичного й статичного моментів:

$$\lambda_{np} = \frac{M_n}{M_{np}}; \quad \lambda_{np} = \frac{341.6}{95} = 3.6.$$

Ковзання на штучній характеристиці при $M = M_c$:

$$s_{uu} = s_{ку} \cdot \left(\lambda_c \cdot (1 + \varepsilon) - \varepsilon \pm \sqrt{(\lambda_c \cdot (1 + \varepsilon) - \varepsilon)^2 - 1} \right);$$

$$s_{uu} = 2.09 \cdot \left(3.6 \cdot (1 + 0.29) - 0.29 \pm \sqrt{(3.61 \cdot (1 + 0.29) - 0.29)^2 - 1} \right);$$

$$s_{c1} = 24.9; \quad s_{c2} = 0.336.$$

Приймаємо $s_{c2} = 0.336$, яке відповідає режимові двигуна (s_{c2} відповідає режимові проти-вмикання).

Швидкість обертання на штучній характеристиці при $M = M_c$

$$n_c = n_0 \cdot (1 - s_c); \quad n_c = 1000 \cdot (1 - 0.336) = 664 \text{ об/хв}.$$

Кутова швидкість на штучній характеристиці при $M = M_c$:

$$\omega_c = \omega_0 \cdot (1 - s_c); \quad \omega_{\text{ш}} = 104,7 \cdot (1 - 0,336) = 69/5 \text{ рад/с.}$$

3.1.2.2. Асинхронний двигун потужністю $P_H = 400$ кВт ($U_H = 380$ В, $n_H = 970$ об/хв., $U_{2k} = 535$ В, $I_{2H} = 475$ А, $\lambda = M_K / M_H = 2,5$) приводить в рух підймальний механізм. При опусканні вантажу зі швидкістю $n_c = 0,3 n_H$ двигун працює в режимі проти-вмикання з навантаженням $M_c = 0,8 M_H$. Визначити, що треба зробити з резистором у колі ротора, щоб при падінні напруги живлення на 20 % забезпечити задану швидкість опускання вантажу.

Розв'язок:

Синхронна кутова швидкість:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30}; \quad \omega_0 = \frac{\pi \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ рад/с.}$$

Номінальне ковзання:

$$s_H = \frac{(n_0 - n_H)}{n_0}; \quad s_H = \frac{(1000 - 970)}{1000} = 0,03.$$

Критичне ковзання:

$$s_K = s_H \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}); \quad s_K = 0,03 \cdot (2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1}) = 0,144.$$

Активний опір обмотки однієї фази ротора:

$$r_2 = \frac{U_{2k} \cdot s_H}{1,73 \cdot I_{pH}}; \quad r_2 = \frac{535 \cdot 0,03}{1,73 \cdot 475} \text{ Ом.}$$

Ковзання при статичному навантаженні:

$$s_c = \frac{s_H \cdot M_c}{M_H}; \quad s_c = 0,03 \cdot 0,8 = 0,024.$$

Ковзання при опусканні вантажу, коли $U_M = U_H$:

$$s_{\text{спр}} = \frac{n_0 + 0,3n_H}{n_0}; \quad s_{\text{спр}} = \frac{1000 + 0,3 \cdot 970}{1000} = 1,29.$$

Опір додаткового резистора в колі ротора:

$$R_{д} = \frac{s_{\text{снр}}}{s_c - 1} \cdot r_2; \quad R_{д} = \frac{1,29}{0,024 - 1} \cdot 0,0195 = 1,03 \text{ Ом.}$$

Критичне ковзання на штучній характеристиці:

$$s_{\text{кш}} = s_{\text{нш}} \cdot \frac{r_2 + R_{д}}{r_2}; \quad s_{\text{кш}} = s_{\text{к}} \cdot \frac{0,0195 + 1,03}{0,0195} = 53,8 s_{\text{к}}.$$

Співвідношення моментів при пониженій напрузі:

$$\lambda_c = \lambda \cdot k_U^2 \cdot \frac{M_{\text{н}}}{M_c}; \quad \lambda_c = 2,5 \cdot \frac{0,64}{0,8} = 2,0.$$

Ковзання на штучній характеристиці:

$$s_{\text{сш}} = s_{\text{нш}} \cdot (\lambda_c + \sqrt{\lambda_c^2 - 1}); \quad s_{\text{сш}} = 53,8 \cdot (2 + \sqrt{2^2 - 1}) = 2,08.$$

Кутова швидкість двигуна при пониженій напрузі живлення:

$$\omega_c = \omega_0 \cdot (1 - s_{\text{сш}}); \quad \omega_c = 104,7 \cdot (1 - 2,08) = -113 \text{ рад/с.}$$

Величина опору додаткового резистора в колі ротора, з яким двигун при пониженій напрузі буде працювати із заданою швидкістю:

$$R_{\text{д1}} = \frac{(r_2 + R_{д}) \cdot s_{\text{снр}}}{s_{\text{сш}}} - r_2;$$

$$R_{\text{д1}} = \frac{(0,0195 + 1,03) \cdot 1,29}{2,08} - 0,0195 = 0,631 \hat{\text{и}}.$$

Отже, треба зменшити опір додаткового резистора на:

$$\Delta R = R_{д} - R_{\text{д1}}; \quad \Delta R = 1,03 - 0,631 = 0,399 \text{ Ом.}$$

3.1.2.3. Для краново-металургійного асинхронного двигуна з фазним ротором типу МТФ312-6 ($P_{\text{н}} = 17,5 \text{ кВт}$, $U_{\text{н}} = 380 \text{ В}$, $I_{\text{н}} = 42,5 \text{ А}$, $n_{\text{н}} = 950 \text{ об/хв.}$, $r_1 = 0,23 \text{ Ом}$, $x_1 = 0,334 \text{ Ом}$, $U_{2\text{к}} = 233 \text{ В}$, $I_{2\text{н}} = 54 \text{ А}$, $r_2 = 0,107 \text{ Ом}$, $x_2 = 0,244 \text{ Ом}$, $k_c = 2,66$, $M_{\text{к}} / M_{\text{н}} = 2,4$) з реактивним статичним навантаженням $M_c = 108 \text{ Н. м}$ потрібно змінити напрям обертання зміною двох фаз живлення статора.

Визначити:

- величину опору резистора, який треба при цьому ввести додатково в коло ротора для обмеження початкового гальмівного моменту до $M_{пр} = 0,81 M_k$;
- величину моменту двигуна при зупинці (пускового в протилежному напрямку обертання);
- кутову швидкість двигуна в протилежному напрямку, якщо величина статичного моменту при реверсуванні не зміниться.

Розв'язок:

Приведені опори ротора до обмоток статора:

$$r'_2 = r_2 \cdot k_e^2; \quad r'_2 = 0,107 \cdot 2,66^2 = 0,757 \text{ Ом.}$$

$$x'_2 = x_2 \cdot k_e^2; \quad x'_2 = 0,244 \cdot 2,66^2 = 1,726 \text{ Ом.}$$

$$x_n = x_1 + x'_2; \quad x_n = 0,344 + 1,726 = 2,06 \text{ Ом.}$$

Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}; \quad \omega_n = \frac{3,14 \cdot 950}{30} = 99,5 \text{ рад/с.}$$

Синхронна кутова швидкість:

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30}; \quad \omega_0 = \frac{\pi \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ рад/с.}$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\omega_n}; \quad M_n = \frac{17,5 \cdot 10^3}{99,5} = 175,9 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Критичний момент двигуна:

$$M_k = 2,4 M_n; \quad M_k = 2,4 \cdot 175,9 = 422,2 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Початковий момент при проти-вмиканні:

$$M_{пр} = 0,8 M_k; \quad M_{пр} = 0,8 \cdot 422,2 = 337,7 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Номінальне ковзання

$$s_n = \frac{(n_0 - n_n)}{n_0}; \quad s_n = \frac{(1000 - 950)}{1000} = 0,05.$$

Ковзання на природній характеристиці при $M = M_c$:

$$s_c = s_n \frac{M_c}{M_n}; \quad s_c = 0,05 \cdot \frac{108}{175,9} = 0,0306.$$

Ковзання на штучній характеристиці при проти-вмиканні:

$$s_{ш} = 1 + (1 - s_c); \quad s_{ш} = 1 + (1 - 0,0306) = 1,97.$$

Відносна величина активного опору статора:

$$\varepsilon = \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}; \quad \varepsilon = \frac{0,23}{\sqrt{0,23^2 + 2,06^2}} = 0,11.$$

Співвідношення моментів критичного та проти-вмикання:

$$\lambda_{пр} = \frac{M_k}{M_{пр}}; \quad \lambda_{пр} = \frac{422,2}{337,7} = 1,25.$$

Критичне ковзання при штучній характеристиці:

$$s_{кш} = s_{ш} \left(\lambda_{пр} \cdot (1 + \varepsilon) - \varepsilon \pm \sqrt{(\lambda_{пр} \cdot (1 + \varepsilon) - \varepsilon)^2 - 1} \right);$$

$$s_{кш} = 1,97 \cdot \left(1,25 \cdot (1 + 0,11) - 0,11 \pm \sqrt{(1,25 \cdot (1 + 0,11) - 0,11)^2 - 1} \right);$$

$$s_{кш1} = 4,08; \quad s_{кш2} = 0,95.$$

Приймаємо $s_{кш1} = 4,08$, тому що це ковзання відповідає меншому гальмівному струмові.

Величина приведенного додаткового опору в колі ротора:

$$R'_d = s_{кш} \cdot \sqrt{r_1^2 + x_k^2} - r'_2;$$

$$R'_d = 4,08 \cdot \sqrt{0,23^2 + 2,06^2} - 0,757 = 7,7 \text{ Ом}.$$

Абсолютне значення опору додаткового резистора в колі ротора:

$$R_d = \frac{R'_d}{k_e^2}; \quad R_d = \frac{7,7}{2,66^2} = 1,4 \text{ Ом}.$$

Величина пускового моменту на штучній характеристиці:

$$M_{\text{шт}} = \frac{2M_k \cdot (1 + \varepsilon)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\varepsilon}; \quad M_{\text{шт}} = \frac{2 \cdot 422,2 \cdot (1 + 0,11)}{\frac{1}{4,08} + 4,08 + 2 \cdot 0,11} = 206,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Співвідношення критичного і статичного моментів:

$$\lambda_c = \frac{M_k}{M_c}; \quad \lambda_c = \frac{422,2}{108} = 3,91.$$

Ковзання на штучній характеристиці при $M = M_c$:

$$s_{\text{шт1}} = s_{\text{кшт1}} \cdot (\lambda_c \cdot (1 + \varepsilon) - \varepsilon \pm \sqrt{(\lambda_c \cdot (1 + \varepsilon) - \varepsilon)^2 - 1});$$

$$s_{\text{шт1}} = 4,08 \cdot (3,91 \cdot (1 + 0,11) - 0,11 \pm \sqrt{(3,91 \cdot (1 + 0,11) - 0,11)^2 - 1});$$

$$s_{\text{шт11}} = 34,04; \quad s_{\text{шт12}} = 0,45.$$

Приймаємо $s_{\text{шт12}} = 0,45$, тому це ковзання відповідає режиму двигуна в протилежному напрямку обертання.

Кутова швидкість у протилежному напрямку обертання:

$$\omega_{\text{шт}} = \omega_0 \cdot (1 - s_{\text{шт12}}); \quad \omega_{\text{шт}} = 104,7 \cdot (1 - 0,45) = 57,7 \text{ рад/с}.$$

3.1.2.4. Асинхронний двигун з фазним ротором типу МТФ411-8 ($P_H = 18$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 46,7$ А, $n_0 = 700$ об/хв., $r_1 = 0,327$ Ом, $x_1 = 0,53$ Ом, $U_{2к} = 221$ В, $I_{2н} = 59$ А, $r_2 = 0,117$ Ом, $x_2 = 0,26$ Ом, $k_c = 2,04$, $M_k / M_H = 2,5$) повинен працювати в режимі динамічного гальмування зі швидкістю $\omega_c = -32$ рад/с. Статорна обмотка вмикається до джерела постійного струму за схемою, наведеною на рис. ПЗ.1. Активний статичний момент на валу двигуна $M_c = 175$ Н.м.

Визначити величину опору додаткових резисторів, які потрібно ввімкнути симетрично в коло ротора, щоб критичний момент у режимі динамічного гальмування дорівнював критичному моменту в рушійному режимі при номінальній напрузі живлення статора.

Розв'язок:

Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_H = \pi \cdot n_H / 30; \quad \omega_H = \pi \cdot 700 / 30 = 73.3 \text{ рад/с}$$

Синхронна кутова швидкість:

$$\omega_0 = \pi \cdot n_0 / 30; \quad \omega_0 = \pi \cdot 750 / 30 = 78.5 \text{ рад/с}$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_H = P_H \cdot 10^3 / \omega_H; \quad M_H = 18 \cdot 10^3 / 73.3 = 245.6 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Номінальне ковзання:

$$s_H = (n_0 - n_H) / n_0; \quad s_H = (750 - 700) / 750 = 0.067.$$

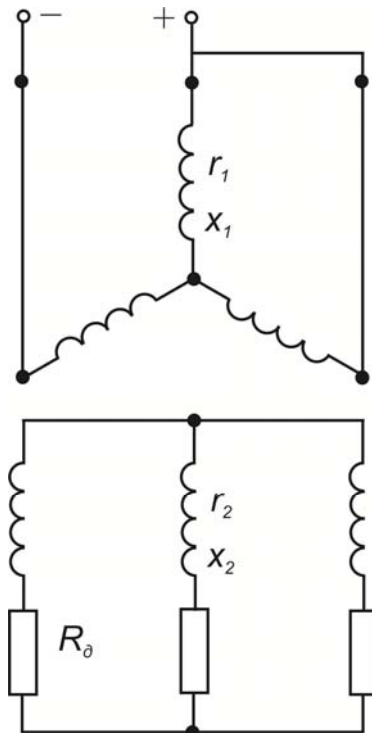


Рисунок ПЗ.1 - Асинхронний двигун в режимі динамічного гальмування

Приймаємо, що відносна швидкість при номінальному моменті динамічного гальмування дорівнює номінальному ковзанню:

$$v_H = s_H; \quad v_H = 0.067.$$

Відносна швидкість при $M_c = 175 \text{ Н} \cdot \text{м}$ на характеристиці динамічного гальмування без додаткового резистора в колі ротора:

$$v_c = v_H \cdot M_c / M_H; \quad v_c = 0.067 \cdot 175 / 245.6 = 0.0475.$$

Відносна швидкість на характеристиці з додатковим резистором R_d в колі ротора

$$v_{c1} = \omega_c / \omega_0; \quad v_{c1} = 32/78.5 = 0.408.$$

Величина опору додаткового резистора в колі ротора:

$$R_{d1} = r_2 \cdot (v_{c1} / v_c - 1); R_{d1} = 0.117 \cdot (0.408 / 0.0475 - 1) = 0.888 \text{ Ом}.$$

3.1.2.5. Для асинхронного двигуна типу МТН211-6 ($P_H = 7.5$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 20.8$ А, $n_0 = 935$ об/хв., $r_1 = 0.68$ Ом, $x_1 = 1.07$ Ом, $U_{2к} = 255$ В, $I_{2H} = 19.8$ А, $r_2 = 0.44$ Ом, $x_2 = 0.88$ Ом, $k_c = 1.38$, $\lambda = M_K / M_H = 2.5$) розрахувати графоаналітичним методом опори резисторів для його пуску в три ступені. Момент статичного навантаження на валу двигуна $M_c = 0.55 M_H$; максимальний момент перемикання $M1 = 150$ Н·м.

Розв'язок:

Приведені опори ротора до обмоток статора:

$$r'_2 = r_2 \cdot k_e^2; \quad r'_2 = 0.44 \cdot 1.38^2 = 0.838 \text{ Ом}$$

$$x'_2 = x_2 \cdot k_e^2; \quad x'_2 = 0.88 \cdot 1.38^2 = 1.68 \text{ Ом}$$

$$x_K = x_1 + x'_2; \quad x_K = 1.07 + 1.68 = 2.75 \text{ Ом}$$

Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_H = \pi \cdot n_H / 30; \quad \omega_H = \pi \cdot 935 / 30 = 97.9 \text{ рад/с}.$$

Синхронна кутова швидкість:

$$\omega_0 = \pi \cdot n_0 / 30; \quad \omega_0 = \pi \cdot 1000 / 30 = 104.7 \text{ рад/с}.$$

Номінальне ковзання:

$$s_H = (\omega_0 - \omega_H) / \omega_0; \quad s_H = (104.7 - 97.9) / 104.7 = 0.065.$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_H = P_H \cdot 10^3 / \omega_H; \quad M_H = 7.5 \cdot 10^3 / 97.9 = 76.6 \text{ Н·м}.$$

Критичний момент двигуна:

$$M_K = 2.5 \cdot M_H; \quad M_K = 2.5 \cdot 76.6 = 191.5 \text{ Н·м}.$$

Відносна величина активного опору статора:

$$\varepsilon = r_1 / \sqrt{r_1^2 + x_k^2}; \quad \varepsilon = 0.68 / \sqrt{0.68^2 + 2.75^2} = 0.24.$$

Критичне ковзання на природній характеристиці:

$$s_k = s_n \left(\lambda \cdot (1 + \varepsilon) - \varepsilon \pm \sqrt{(\lambda \cdot (1 + \varepsilon) - \varepsilon)^2 - 1} \right);$$

$$s_{k_{\text{min}}} = 0.65 \cdot \left(2.5 \cdot (1 + 0.24) - 0.24 \pm \sqrt{(2.5 \cdot (1 + 0.24) - 0.24)^2 - 1} \right);$$

$$s_{k1} = 0.36; \quad s_{k2} = 0.0114.$$

Механічна характеристика асинхронного двигуна:

$$M = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + \varepsilon)}{s/s_k + s_k/s + 2 \cdot \varepsilon} \quad M = \frac{2 \cdot 191.5 \cdot (1 + 0.24)}{s/0.36 + 0.36/s + 2 \cdot 0.24} = 206.3 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Задаючись значеннями ковзання від $s = 0$ до $s = s_k$, розраховуємо і зводимо в табл. 3.1 та будуємо на рис. 3.3 робочу частину природної механічної характеристики.

Статичний момент навантаження:

$$M_c = 0.55 \cdot M_H; \quad M_c = 0.55 \cdot 76.6 = 42.1 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Мінімальний момент перемикавання:

$$M_H \geq 1.2 \cdot M_c; \quad M_H \geq 1.2 \cdot 42.1 \geq 50.6 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Для визначення величини опорів пускових резисторів будуємо пускову діаграму в такій послідовності. Проводимо вертикальну лінію через точку з координатами: $M = M_1, s = 1$. Ця вертикаль перетне

Таблиця ПЗ.1 – Результати розрахунку природної механічної характеристики

S	-	0.02	0.04	0.065	0.08	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.36
M	Н·м	25.6	49.3	76.6	91.3	109	144	167	182	189	192

• природну характеристику в точці b й горизонтальну лінію, яка проходить через точку з координатами: $M = 0, s = 0$, в точці a . З'єднавши точки з координатами: $M = 0, s = 0$ та $M = M_1, s = 1$, одержимо спрямлену

штучну механічну характеристику двигуна з повністю введеними в коло ротора додатковими резисторами. Підбираючи $M_2 \geq 50.6$ Н·м, поступовим наближенням будемо пускову діаграму в три ступені (рис. ПЗ.2). З пускової діаграми визначаємо величину опорів додаткових резисторів, взявши до уваги, що відрізок $ab = r_2$

$$de \equiv R_{д1} \qquad R_{д1} = r_2 \cdot de / ab$$

$$cd \equiv R_{д2} \qquad R_{д2} = r_2 \cdot cd / ab$$

$$bc \equiv R_{д3} \qquad R_{д3} = r_2 \cdot bc / ab$$

$$be \equiv R_{п} \qquad R_{п} = r_2 \cdot be / ab$$

$$R_{д1} = 0.44 \cdot 2.785 = 1.265 \text{ Ом}; \quad R_{д2} = 0.44 \cdot 1.531 = 0.764 \text{ Ом};$$

$$R_{д3} = 0.44 \cdot 0.844 = 0.371 \text{ Ом}; \quad R_{п} = R_{д1} + R_{д2} + R_{д3}$$

$$R_{п} = 1.265 + 0.674 + 0.371 = 2.31 \text{ Ом.}$$

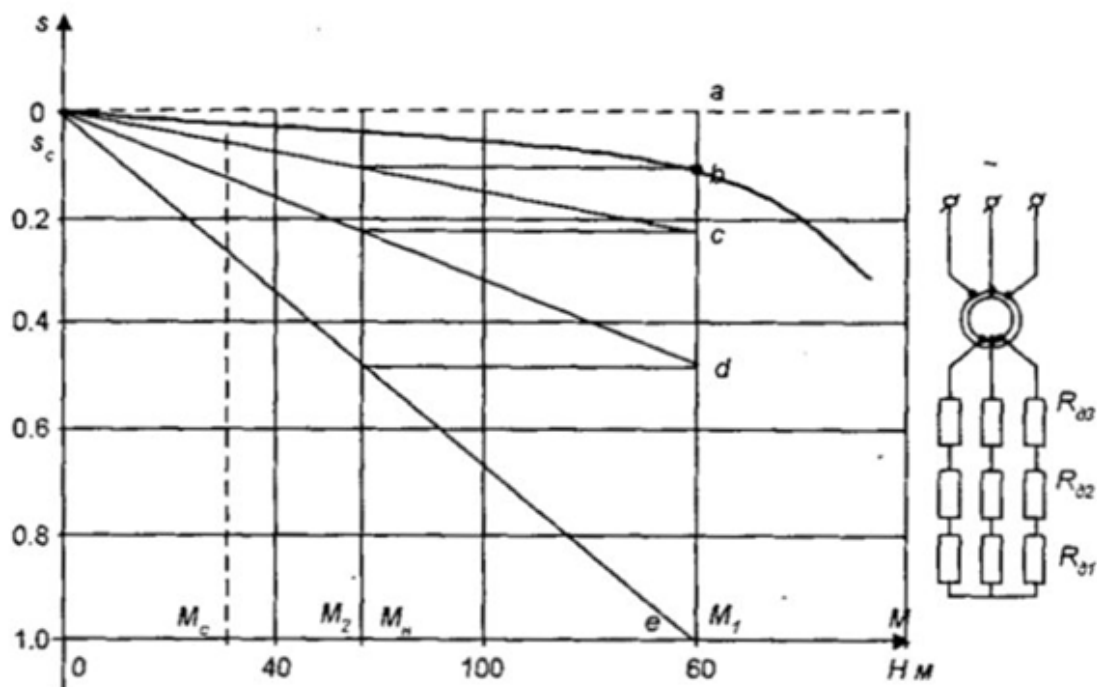


Рисунок ПЗ.2 - Пускова діаграму АД в три ступені

3.1.2.6. Для асинхронного двигуна типу МТФ612-10 ($P_H = 60$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 145$ А, $n_H = 578$ об/хв., $U_{2к} = 245$ В, $I_{2H} = 153$ А, $\lambda = M_K / M_H = 3.0$)

розрахувати аналітичним методом опори резисторів, які потрібно ввімкнути додатково в коло ротора для запуску двигуна в чотири ступені ($m = 4$). Момент статичного навантаження при пуску $M_c = 0.42 M_n$; максимальний момент перемикання $M_1 = 2.1 M_n$. Механічні характеристики двигуна на робочих ділянках вважати прямолінійними.

Розв'язок:

Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_n = \pi \cdot n_n / 30; \omega_n = 3.14 \cdot 578 / 30 = 60.5 \text{ рад/с.}$$

Синхронна кутова швидкість:

$$\omega_0 = \pi \cdot n_0 / 30; \omega_0 = 3.14 \cdot 600 / 30 = 62.8 \text{ рад/с.}$$

Номінальне ковзання:

$$s_n = \frac{(\omega_0 - \omega_n)}{\omega_0}; \quad s_n = \frac{(62.8 - 60.5)}{62.8} = 0.0367.$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\omega_n}; \quad M_n = \frac{60 \cdot 10^3}{60.5} = 991.3 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Критичний момент двигуна:

$$M_k = 3.0 \cdot M_n; M_k = 3.0 \cdot 991.3 = 2973.9 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Максимальний момент перемикання:

$$M_1 = 2.1 \cdot M_n; M_1 = 2.1 \cdot 991.3 = 2081.7 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Момент статичного навантаження:

$$M_c = 0.42 \cdot M_n; M_c = 0.42 \cdot 991.3 = 416.3 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Мінімальний момент перемикання:

$$M_2 \geq 1.2 \cdot M_c; M_2 \geq 1.2 \cdot 416.3 \geq 499.6 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Активний опір обмотки однієї фази ротора:

$$r_2 = \frac{E_{pn} \cdot s_n}{1.73 \cdot I_{pn}}; \quad r_2 = \frac{245 \cdot 0.0367}{1.73 \cdot 153} \text{ Ом}$$

Співвідношення максимального й мінімального моментів:

$$\lambda = \sqrt[m]{M_n / (s_n \cdot M_1)} \qquad \lambda = \sqrt[4]{991.3 / (0.0367 \cdot 2081.7)} = 1.9$$

Опори додаткових резисторів:

$$R_{д4} = r_2 \cdot (\lambda - 1) \qquad R_{д4} = 0.034 \cdot (1.9 - 1) = 0.031 \text{ Ом}$$

$$R_{д3} = R_{д4} \cdot \lambda \qquad R_{д3} = 0.031 \cdot 1.9 = 0.058 \text{ Ом}$$

$$R_{д2} = R_{д3} \cdot \lambda \qquad R_{д2} = 0.058 \cdot 1.9 = 0.11 \text{ Ом}$$

$$R_{д1} = R_{д2} \cdot \lambda \qquad R_{д1} = 0.11 \cdot 1.9 = 0.21 \text{ Ом}$$

Мінімальний момент перемикання:

$$M_2 = M_1 / \lambda; \quad M_2 = 2081.7 / 1.9 = 1095.6 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Мінімальний момент перемикання $M_2 > 1.2 M_c$, отже запуск двигуна здійсниться за заданим законом.

3.1.2.7. Сформулювати залежності для визначення середнього значення моменту асинхронного двигуна за час перехідного процесу.

Розв'язок:

Середнє значення моменту асинхронного двигуна за час пуску, гальмування противмиканням, реверсування та рекуперативного гальмування:

$$M_{\text{сеп}} = \frac{1}{s_{\text{по}} - s_{\text{кін}}} \cdot \int_{s_{\text{кін}}}^{s_{\text{по}}} M(s) ds$$

Залежність моменту асинхронного двигуна від ковзання описується рівнянням механічної характеристики:

$$M = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + \varepsilon)}{s/s_k + s_k/s + 2 \cdot \varepsilon}$$

Підставляємо це рівняння у вираз середнього моменту

$$M_{\text{сеп}} = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + \varepsilon) \cdot s_k}{s_{\text{по}} - s_{\text{кін}}} \cdot \int_{s_{\text{кін}}}^{s_{\text{по}}} \frac{s}{s^2 + 2 \cdot \varepsilon \cdot s_k \cdot s + s_k^2} ds$$

Після інтегрування одержуємо вираз для визначення середнього моменту асинхронного двигуна:

$$M_{\text{сер}} = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + \varepsilon) \cdot s_k}{s_{\text{по}} - s_{\text{кін}}} \cdot \left(\ln(s^2 + 2 \cdot \varepsilon \cdot s_k \cdot s + s_k^2) - \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot s_k}{\sqrt{s_k^2 - \varepsilon \cdot s_k / 2}} \cdot \arctg \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot s_k}{\sqrt{s_k^2 - \varepsilon \cdot s_k / 2}} \right) \Bigg|_{s_{\text{кін}}}^{s_{\text{по}}}$$

Середнє значення моменту асинхронного двигуна, в якого $r_1 \ll x_k$, тобто коли $\varepsilon \rightarrow 0$:

$$M_{\text{сер}} = \frac{M_k \cdot s_k}{s_{\text{по}} - s_{\text{кін}}} \cdot \ln(s^2 + s_k^2) \Bigg|_{s_{\text{кін}}}^{s_{\text{по}}}$$

Середнє значення моменту асинхронного двигуна при динамічному гальмуванні:

$$M_{\text{сер дг}} = \frac{M_{\text{к дг}} \cdot v_k}{v_{\text{по}} - v_{\text{кін}}} \cdot \int_{v_{\text{кін}}}^{v_{\text{по}}} \frac{v}{v^2 + v_k^2} dv$$

Після інтегрування одержуємо вираз для визначення середнього моменту асинхронного двигуна при динамічному гальмуванні:

$$M_{\text{сер дг}} = \frac{M_{\text{к дг}} \cdot v_k}{v_{\text{по}} - v_{\text{кін}}} \cdot \ln(v^2 + v_k^2) \Bigg|_{v_{\text{кін}}}^{v_{\text{по}}}$$

3.1.2.8. У краново-металургійного асинхронного двигуна з фазним ротором типу МТФ312-6 ($P_n = 17,5$ кВт, $U_n = 380$ В, $I_n = 42,5$ А, $n_n = 950$ об/хв., $r_1 = 0,23$ Ом, $x_1 = 0,334$ Ом, $U_{2к} = 233$ В, $I_{2н} = 54$ А, $r_2 = 0,107$ Ом, $x_2 = 0,244$ Ом, $k_c = 2,66$, $M_k / M_n = 2,4$) з реактивним статичним навантаженням $M_c = 108$ Н·м потрібно змінити напрям обертання зміною двох фаз живлення статора.

Визначити:

- величину опору резистора, який треба при цьому ввести додатково в коло ротора для обмеження початкового гальмівного моменту до $M_{\text{пр}} = 0,81 M_k$;
- величину моменту двигуна при зупинці (пускового в протилежному напрямку обертання);

- кутову швидкість двигуна в протилежному напрямку, якщо величина статичного моменту при реверсуванні не зміниться.

Розв'язок:

Приведені опори ротора до обмоток статора:

$$r'_2 = r_2 \cdot k_e^2; \quad r'_2 = 0,107 \cdot 2,66^2 = 0,757 \text{ Ом.}$$

$$x'_2 = x_2 \cdot k_e^2; \quad x'_2 = 0,244 \cdot 2,66^2 = 1,726 \text{ Ом.}$$

$$x_H = x_1 + x'_2; \quad x_H = 0,344 + 1,726 = 2,06 \text{ Ом.}$$

Номинальна кутова швидкість:

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30}; \quad \omega_H = \frac{3,14 \cdot 950}{30} = 99,5 \text{ рад/с.}$$

Синхронна кутова швидкість:

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30}; \quad \omega_0 = \frac{\pi \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ рад/с.}$$

Номинальний момент двигуна:

$$M_H = \frac{P_H \cdot 10^3}{\omega_H}; \quad M_H = \frac{17,5 \cdot 10^3}{99,5} = 175,9 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Критичний момент двигуна:

$$M_K = 2,4 M_H; \quad M_K = 2,4 \cdot 175,9 = 422,2 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Початковий момент при проти-вмиканні:

$$M_{np} = 0,8 M_K; \quad M_{np} = 0,8 \cdot 422,2 = 337,7 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Номинальне ковзання:

$$s_H = \frac{(n_0 - n_H)}{n_0}; \quad s_H = \frac{(1000 - 950)}{1000} = 0,05.$$

Ковзання на природній характеристиці при $M = M_c$:

$$s_c = s_H \frac{M_c}{M_H}; \quad s_c = 0,05 \cdot \frac{108}{175,9} = 0,0306.$$

Ковзання на штучній характеристиці при проти-вмиканні:

$$s_{\text{ш}} = 1 + (1 - s_c); \quad s_{\text{ш}} = 1 + (1 - 0,0306) = 1,97.$$

Відносна величина активного опору статора:

$$\varepsilon = \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}; \quad \varepsilon = \frac{0,23}{\sqrt{0,23^2 + 2,06^2}} = 0,11.$$

Співвідношення моментів критичного та проти-вмикання:

$$\lambda_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{к}}}{M_{\text{пр}}}; \quad \lambda_{\text{пр}} = \frac{422,2}{337,7} = 1,25.$$

Критичне ковзання при штучній характеристиці:

$$s_{\text{кш}} = s_{\text{ш}} \left(\lambda_{\text{пр}} \cdot (1 + \varepsilon) - \varepsilon \pm \sqrt{(\lambda_{\text{пр}} \cdot (1 + \varepsilon) - \varepsilon)^2 - 1} \right);$$

$$s_{\text{кш}} = 1,97 \cdot (1,25 \cdot (1 + 0,11) - 0,11 \pm \sqrt{(1,25 \cdot (1 + 0,11) - 0,11)^2 - 1});$$

$$s_{\text{кш1}} = 4,08; \quad s_{\text{кш2}} = 0,95.$$

Приймаємо $s_{\text{кш1}} = 4,08$, тому що це ковзання відповідає меншому гальмівному струмові.

Величина приведенного додаткового опору в колі ротора:

$$R'_d = s_{\text{кш}} \cdot \sqrt{r_1^2 + x_k^2} - r'_2;$$

$$R'_d = 4,08 \cdot \sqrt{0,23^2 + 2,06^2} - 0,757 = 7,7 \text{ Ом}.$$

Абсолютне значення опору додаткового резистора в колі ротора:

$$R_d = \frac{R'_d}{k_e^2}; \quad R_d = \frac{7,7}{2,66^2} = 1,4 \text{ Ом}.$$

Величина пускового моменту на штучній характеристиці:

$$M_{\text{мш}} = \frac{2M_{\text{к}} \cdot (1 + \varepsilon)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\varepsilon}; \quad M_{\text{мш}} = \frac{2 \cdot 422,2 \cdot (1 + 0,11)}{\frac{1}{4,08} + 4,08 + 2 \cdot 0,11} = 206,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Співвідношення критичного і статичного моментів:

$$\lambda_c = \frac{M_{\text{к}}}{M_c}; \quad \lambda_c = \frac{422,2}{108} = 3,91.$$

Ковзання на штучній характеристиці при $M = M_c$:

$$s_{ш1} = s_{кш1} \cdot \left(\lambda_c \cdot (1 + \varepsilon) - \varepsilon \pm \sqrt{(\lambda_c \cdot (1 + \varepsilon) - \varepsilon)^2 - 1} \right);$$

$$s_{ш1} = 4,08 \cdot \left(3,91 \cdot (1 + 0,11) - 0,11 \pm \sqrt{(3,91 \cdot (1 + 0,11) - 0,11)^2 - 1} \right);$$

$$s_{ш11} = 34,04; \quad s_{ш12} = 0,45.$$

Приймаємо $s_{ш12} = 0,45$, тому це ковзання відповідає режиму двигуна в протилежному напрямку обертання.

Кутова швидкість у протилежному напрямку обертання:

$$\omega_{ш} = \omega_0 \cdot (1 - s_{ш12}); \quad \omega_{ш} = 104,7 \cdot (1 - 0,45) = 57,7 \text{ рад/с}.$$

3.1.2.9. Визначити середнє значення моменту при запуску асинхронного короткозамкненого двигуна типу МТКН512-8 ($P_H = 45$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 104$ А, $n_H = 680$ об/хв., $r_1 = 0.103$ Ом, $x_1 = 0.172$ Ом, $r'_2 = 0.237$ Ом, $x'_2 = 0.366$ Ом, $\lambda_M = M_K / M_H = 2.5$). Статичний момент на валу двигуна $M_H = 520$ Н·м.

Розв'язок:

Номинальна кутова швидкість:

$$\omega_H = \pi \cdot n_H / 30; \quad \omega_H = 3.14 \cdot 680 / 30 = 71.2 \text{ рад/с}.$$

Синхронна кутова швидкість:

$$\omega_0 = \pi \cdot n_0 / 30; \quad \omega_0 = 3.14 \cdot 750 / 30 = 78.5 \text{ рад/с}.$$

Номинальне ковзання:

$$s_H = \frac{(\omega_0 - \omega_H)}{\omega_0}; \quad s_H = \frac{(78.5 - 71.2)}{178.5} = 0.093.$$

Номинальний момент двигуна:

$$M_H = \frac{P_H \cdot 10^3}{\omega_H}; \quad M_H = \frac{45 \cdot 10^3}{71.2} = 632 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Ковзання при статичному навантаженні:

$$s_c = \frac{s_n \cdot M_c}{M_n}; \quad s_c = \frac{0.093 \cdot 520}{632} = 0.0765.$$

Критичний момент двигуна:

$$M_k = \lambda_m \cdot M_n; \quad M_k = 2.5 \cdot 632 = 1580 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Індуктивний опір короткого замикання:

$$x_k = x_1 + x_2'; \quad x_k = 0.172 + 0.366 = 0.538 \text{ Ом}.$$

Критичне ковзання:

$$s_k = r_2' / \sqrt{r_1^2 + x_k^2}; \quad s_k = 0.237 / \sqrt{0.103^2 + 0.538^2} = 0.433.$$

Середнє значення моменту при пуску двигуна%

$$M_{\text{сер п}} = \frac{M_k \cdot s_k}{s_{\text{по}} - s_{\text{кін}}} \cdot \ln \frac{s_{\text{по}}^2 + s_k^2}{s_{\text{кін}}^2 + s_k^2}.$$

Враховуючи, що при пуску двигуна $s_{\text{по}} = 1$, $s_{\text{кін}} = s_c$.

Відношення середнього пускового моменту до номінального:

$$k_{\text{п}} = M_{\text{сер п}} / M_n; \quad k_{\text{п}} = 1345 / 632 = 2.13.$$

ПЗ.1.3 Задачі для самостійного розв'язку

3.1.3.1. Для асинхронного двигуна типу МТФ 313-6 ($P_n = 16$ кВт, $U_n = 380$ В, $I_n = 37.6$ А, $n_n = 955$ об/хв., $\cos \varphi = 0.77$, $r_1 = 0.33$ Ом, $x_1 = 0.41$ Ом, $U_{2к} = 208$ В, $I_{2н} = 42.5$ А, $r_2 = 0.099$ Ом, $x_2 = 0.25$, $k_e = 1.75$ Ом) визначити опір резистора, який треба ввімкнути в коло ротора, щоб при пуску він розвивав пусковий момент $M_{\text{п}} = M_k$. Розрахувати, яку кутову швидкість буде розвивати двигун при такому опорі в колі ротора й номінальному навантаженні.

3.1.3.2. Краново-металургійний асинхронний двигун з фазним ротором типу МТФ411-6 ($P_n = 27$ кВт, $U_n = 380$ В, $I_n = 37.6$ А, $n_n = 955$ об/хв., $\cos \varphi = 0.77$, $r_1 = 0.197$ Ом, $x_1 = 0.287$ Ом, $U_{2к} = 246$ В, $I_{2н} = 77$ А, $r_2 = 0.0763$

Ом, $x_2 = 0.236$, $k_e = \quad = 2.37$ Ом) працює з реактивним моментом на валу $M_c = 252$ Н. м.

Визначити кутову швидкість цього двигуна та пусковий момент, якщо в усі три фази його ротора ввести додаткові резистори з опором $R_{д2} = 0.85$ Ом, а в усі три фази кола статора - індуктивний опір $X_{д1} = 0.51$ Ом.

3.1.3.3. Для асинхронного двигуна типу МТФ412-8 ($P_n = 26$ кВт, $U_n = 380$ В, $I_n = 71.5$ А, $n_n = 715$ об/хв., $\cos\varphi = 0.68$, $r_1 = 0.182$ Ом, $x_1 = 0.313$ Ом, $U_{2к} = 266$ В, $I_{2н} = \quad = 68$ А, $r_2 = 0.095$ Ом, $x_2 = 0.231$, $k_e = 2.03$ Ом) розрахувати й побудувати природну механічну характеристику, а також штучну при введених симетрично в усі три фази дроселях з активним опором $R_{др} = 0.15$ Ом та індуктивним опором $X_{др} = 0.613$ Ом.

3.1.3.4. Для краново-металургійного асинхронного двигуна з фазним ротором типу МТН412-8 ($P_n = 26$ кВт, $U_n = 380$ В, $I_n = 72$ А, $n_n = 710$ об/хв., $\cos\varphi = 0.68$, $r_1 = \quad = 0.202$ Ом, $x_1 = 0.313$ Ом, $U_{2к} = 266$ В, $I_{2н} = 68$ А, $r_2 = 0.102$ Ом, $x_2 = 0.231$, $k_e = 2$ Ом, $\lambda_{ш} = M_k / M_n = 2.5$) розрахувати і побудувати механічну та електромеханічну характеристики. Визначити величину додаткового опору, який треба ввімкнути в коло ротора, щоб одержати критичне ковзання $s_k = 1.0$. Розрахувати величину пускового моменту, який при цьому буде розвивати двигун, та величину струму в колі ротора.

3.1.3.5. Краново-металургійний шестиполюсний асинхронний двигун з фазним ротором приводить в рух механізм із кутовою швидкістю $\omega_c = 48$ рад/с. Дані двигуна: $s_n = 0.055$; $U_{2к} = 233$ В; $I_{2н} = 54$ А; $x_2 = 0.254$ Ом. У кожен фазу ротора введено додатково дросель з опорами: $R_{др} = 0.72$ Ом, $X_{др} = 0.63$ Ом. Визначити величину моменту навантаження двигуна. Втрати в обмотці статора знехтувати.

3.1.3.6. Асинхронний двигун з фазним ротором типу МТН411-6 ($P_H = 27.0$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 65.5$ А, $n_H = 950$ об/хв., $r_2 = 0.081$ Ом) приводить в рух відцентрову помпу з механічною характеристикою: $M / M_H = 0.8 + 0.92 (n/n_H)^2$ Визначити величину опору резисторів, які треба ввімкнути додатково в коло ротора, щоб одержати швидкості обертання двигуна $n_{c1} = 300$ об/хв. та $n_{c2} = 600$ об/хв.. При розрахунку вважати механічні характеристики двигуна в межах від $M = 0$ до $M = 1.6 M_H$ прямолінійними.

3.1.3.7. Асинхронний двигун з фазним ротором типу МТ21 -6 ($P_H = 5.0$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 14.9$ А, $n_H = 940$ об/хв., $U_{2k} = 164$ В, $I_{2H} = 20.6$ А, $\lambda_{ш} = M_K/M_H = 2.9$) приводить в рух вентилятор з механічною характеристикою $M = 0.22 + 0.75 \cdot 10^{-6} n^2$.

Визначити:

- кутову швидкість двигуна та величину статичного моменту на природній механічній характеристиці;

- величину опору резистора, який потрібно ввімкнути додатково в коло ротора двигуна для того, щоб вентилятор обертався з кутовою швидкістю $\omega_c = 45$ рад/с;

- величину пускового й статичного моменту на штучній характеристиці.

3.1.3.8. Краново-металургійний асинхронний двигун з фазним ротором типу МТФ 412-6 ($P_H = 3.0$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 70.5$ А, $n_H = 970$ об/хв., $U_{2k} = 259$ В, $I_{2H} = 72.0$ А, $\lambda_{ш} = M_K/M_H = 2.8$) приводить в рух механізм з активним статичним моментом $M_c = 210$ Н·м.

Визначити величину опору додаткового резистора в колі ротора, за допомогою якого можна змінювати кутову швидкість двигуна від $\omega_{c1} = 22$ рад/с до $\omega_{c2} = 62$ рад/с.

3.1.3.9. Визначити, як змінився струм I_c у колі ротора асинхронного двигуна по відношенню до номінального $I_{рн}$, якщо статистичний момент на валу двигуна дорівнює номінальному, а напруга живлення зменшилась на 20 %. Перевантажувальна здатність двигуна $\lambda_m = M_k / M_H = 2$.

3.1.3.10. Для асинхронного з перевантажувальною здатністю $\lambda_m = M_k / M_H = 2$ визначити допустиме відносне значення моменту навантаження при умові, що струм у колі ротора не перевищуватиме номінального $I_{рн}$, якщо напруга живлення зменшиться на 20 %.

3.1.3.11. Асинхронний двигун з фазним ротором потужністю $P_H = 11$ кВт ($U_H = 380$ В, $I_H = 26$ А, $n_H = 953$ об/хв., $r_1 = 0,415$ Ом, $x_1 = 0,465$ Ом, $U_{2к} = 200$ В, $I_{2н} = 35,4$ А, $r_2 = 0,132$ Ом, $x_2 = 0,27$ Ом, $k_c = 1,84$, $\lambda = M_k / M_H = 3,1$) приводить в рух підймальний механізм. При підйманні вантажу двигун працює на природній характеристиці з номінальною швидкістю. Визначити, з якою кутовою швидкістю буде працювати двигун у рекуперативному режимі при опусканні вантажу, якщо ККД передач $\eta_{п} = 0,91$.

3.1.3.12. Асинхронний двигун з фазним ротором типу МТН713-10 ($P_H = 200$ кВт, $n_H = 578$ об/хв., $U_{2к} = 408$ В, $I_{2н} = 305$ А, $\lambda = M_k / M_H = 2,5$) приводить в рух підймальний механізм і працює, опускаючи вантаж, у режимі проти вмикання з активним статистичним моментом на валу $M_c = 0,78 M_H$, розвиваючи кутову швидкість $\omega_c = -0,4 \omega_H$. Визначити величину опору додаткового резистора, введеного при цьому в коло ротора, а також розрахувати, як зміниться кутова швидкість двигуна, якщо напруга мережі живлення зменшиться на 25 %. Механічні характеристики двигуна на робочих ділянках вважати прямолінійними.

3.1.3.13. Асинхронний двигун з номінальною напругою $U_n = 500$ В та з номінальною частотою $f_n = 60$ Гц, у якого перевантажувальна здатність $\lambda = M_k / M_n = 2,0$, ввімкнений до мережі з напругою $U_m = 380$ В, $f_m = 50$ Гц. Визначити, чи цей двигун можна довго-тривало завантажити статистичним моментом $M_c = M_n$. При розв'язуванні вважати, що критичне ковзання і критичний момент при зміні частоти з достатньою точністю визначаються співвідношеннями: $s_{kf} = s_k / s_f$, $M_{kuf} = M_k k_u^2 / k_f^2$, де k_u , k_f – коефіцієнти зменшення напруги та частоти. Прийняти, що двигун можна навантажити номінальним моментом, якщо струм ротора не буде перевищувати номінального значення.

3.1.3.14. Розрахувати опір резистора, який треба ввімкнути додатково в коло ротора асинхронного двигуна, щоб припуску від пониженої напруги $U = 0,7 U_n$ пусковий момент залишився рівний пусковому моменту на природній характеристиці. Активний опір обмотки однієї фази ротора $r_2 = 0,12$ Ом; критичне ковзання на природній механічній характеристиці $s_k = 0,21$.

3.1.3.15. Визначити, з якою кутовою швидкістю буде обертатись асинхронний двигун, завантажений статичним моментом $M_c = 0,83 M_n$, при зменшенні напруги мережі живлення до $U_m = 0,7 U_n$ та частоти в мережі до $f_m = 0,6 f_n$. Розрахувати також, як при цьому зміниться струм у колі ротора привідного двигуна. Номінальна швидкість обертання двигуна $n_n = 1450$ об/хв., перевантажувальна здатність – $\lambda = M_k / M_n = 2,2$.

3.1.3.16. Підіймальний механізм приводиться в рух асинхронним короткозамкненим двигуном типу МТК11- 6 ($P_n = 2,2$ кВт, $U_n = 380$ В, $I_n = 6,4$ А, $n_n = 883$ об/хв., $M_k / M_n = 2,6$, $I_n / I_k = 3,3$). Приведений до валу

двигуна статичний момент механізму $M_c = 18,2$ Н. м. ККД передач $\eta = 0,81$.

Визначити:

- номінальний момент двигуна;
- кутову швидкість двигуна при підйманні вантажу;
- момент, який розвиватиме двигун при переведенні його в режим проти-вмикання;
- кутову швидкість двигуна в режимі рекуперативного гальмування при опусканні вантажу.

3.1.3.17. Підймальний механізм з асинхронним електроприводом опускає вантаж зі швидкістю $v_2 = 1,1$ м/с. Привідний асинхронний двигун з фазним ротором працює при цьому в режимі проти вмикання зі статичним моментом на валу $M_c = M_H$. Розрахувати, як зміниться швидкість опускання вантажу при зменшенні напруги в мережі живлення двигуна на 25 % , а також визначити на скільки треба змінити опір у колі ротора, щоб швидкість опускання вантажу залишилась заданою.

При підйманні механізмом вантажу зі швидкістю $v_1 = 3,2$ м/с привідний двигун працював на природній механічній характеристиці і розвивав номінальний момент. Номінальне ковзання двигуна $s_H = 0,04$; перевантажувальна здатність двигуна $\lambda_m = M_K / M_H = 2,3$; активний опір обмотки однієї фази ротора $r_2 = 0,2$ Ом.

3.1.3.18. Розрахувати величину опору резистора, який треба ввімкнути додатково в коло ротора асинхронного двигуна з фазним ротором типу 4АК250М4 ($P_H = 71,0$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 136,7$ А, $n_H = 1462$ об/хв., $U_{2K} = 250$ В, $I_{2H} = 170$ А, $\lambda_m = M_K / M_F = 3,0$), щоб при його запуску від мережі з пониженою напругою на 20 % середній пусковий момент дорівнював $1,8 M_H$.

3.1.3.19. В асинхронному двигуні типу МТКВ512-8 ($P_H = 37$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 91$ А, $n_H = 705$ об/хв., $r_1 = 0,081$ Ом, $x_1 = 0,17$ Ом, $r'_2 = 0,19$ Ом, $x'_2 = 0,16$ Ом, $I'_{2H} = 63$ А, $M_K / M_H = 3,6$, $I_{п} / I_H = 5,8$) для обмеження пускового струму до $I_{п} = 2,1 I_H$ у всі три фази статора вводяться додаткові резистори. Визначити величину опорів цих резисторів і пусковий момент, який при цьому розвиватиме двигун. При розрахунку струмом намагнічування знехтувати.

3.1.3.20. Асинхронний двигун з фазним опором типу МТФ412-8 ($P_H = 22$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 58$ А, $n_H = 720$ об/хв., $M_K / M_H = 2,8$) працює на штучній механічній характеристиці з кутовою швидкістю $\omega_c = 36$ рад/с при статичному навантаженні $M_c = 205$ Н. м. Для зупинки двигун переводиться у режим гальмування противмиканням зміною двох фаз. Визначити, у скільки разів треба збільшити опір додаткового резистора у колі ротора, щоб початковий гальмівний момент двигуна становив $M_{пр} = 0,85 M_K$.

3.1.3.21. Асинхронний двигун з фазним ротором типу МТМ713-10 ($P_H = 125$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 275$ А, $n_H = 587$ об/хв., $r_1 = 0,0183$ Ом, $x_1 = 0,081$ Ом, $U_{2к} = 372$ В, $I_{2H} = 196,5$ А, $r_2 = 0,02$ Ом, $x_2 = 0,098$ Ом, $M_K / M_H = 2,9$) приводить в рух механізм зі змінним статичним моментом. Визначити аналітичним і графоаналітичним методами величину опорів додаткових резисторів, які треба ввімкнути в коло ротора для забезпечення таких режимів: $M_{c1} = 3200$ Н. м, $\omega_{c1} = 41$ рад/с; $M_{c2} = 6100$ Н. м, $\omega_{c2} = 32$ рад/с; $M_{c3} = 5100$ Н. м, $\omega_{c3} = 32$ рад/с. Статичні моменти M_{c1} , M_{c2} , M_{c3} приведені до валу двигуна.

3.1.3.22. В асинхронному приводі з двигуном типу 4АНК200L6 ($P_H = 30$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 62,6$ А, $n_0 = 1000$ об/хв., $s_H = 0,04$, $s_K = 0,235$,

$r_1 = 0,112 \text{ Ом}$, $x_1 = 0,256 \text{ Ом}$, $U_{2к} = 375 \text{ В}$, $I_{2н} = 46 \text{ А}$, $r'_2 = 0,147 \text{ Ом}$, $x'_2 = 0,42 \text{ Ом}$, $I_k = M_k / M_n = 2,4$), що працює на природній механічній характеристиці зі статичним активним моментом $M_c = 262 \text{ Н. м}$, застосовано динамічне гальмування. Критичний момент при динамічному гальмуванні $M_{кд} = M_k$; відносна критична швидкість $v_k = 0,35$.

Визначити величину кутової швидкості, з якою буде працювати електропривод під час динамічного гальмування, а також величину опору додаткових резисторів, які треба ввімкнути симетрично в коло ротора, щоб привід зміг працювати зі швидкістю -28 рад/с , якщо навантаження на валу двигуна не зміниться.

3.1.3.23. Асинхронний короткозамкнений двигун типу МТКФ312-6 ($P_n = 11 \text{ кВт}$, $U_n = 380 \text{ В}$, $I_n = 26 \text{ А}$, $n_n = 935 \text{ об/хв.}$, $M_k / M_n = 30$, $M_{п} / M_n = 2,8$, $I_{п} / I_k = 5,3$, $r_1 = 0,595 \text{ Ом}$, $x_1 = 0,485 \text{ Ом}$) приводить в рух вентилятор з механічною характеристикою $M = M_n (0,16 + 0,84 \cdot (n / n_n)^2)$. Розрахувати, з якою кутовою швидкістю буде працювати цей двигун, якщо його ввімкнути до мережі з напругою $U_m = 220 \text{ В}$, а також визначити, чому дорівнюватиме при цьому його пусковий момент.

3.1.3.24. Вентилятор з механічною характеристикою, яка описується рівнянням $M = 2,2 + 0,35 \cdot 10^{-5} n^2 \text{ (Н. м)}$, приводиться в рух асинхронним двигуном з фазним ротором потужністю $P_n = 1,4 \text{ кВт}$ ($U_n = 380 \text{ В}$, $I_n = 3,31 \text{ А}$, $n_n = 1425 \text{ об/хв.}$, $U_{2к} = 105 \text{ В}$, $I_{2н} = 8,5 \text{ А}$, $\lambda = M_k / M_n = 2,3$). Визначити опір резистора, який потрібно ввести додатково в коло ротора привідного двигуна, щоб вентилятор обертався з кутовою швидкістю $\omega_c = 70 \text{ рад/с}$.

3.1.3.25. Розрахувати величини опорів резисторів, які треба ввести додатково в коло ротора асинхронного двигуна з фазним ротором потужністю $P_n = 400 \text{ кВт}$ ($U_n = 380 \text{ В}$, $I_n = 734 \text{ А}$, $n_n = 970 \text{ об/хв.}$, $U_{2к} = 535 \text{ В}$, $I_{2н} = 475 \text{ А}$, $\lambda = M_k / M_n = 2,3$), що приводить в рух підймальний механізм козлового крана, щоб забезпечити опускання вантажу масою $m_b =$

13500 кг зі швидкістю $v_{\text{мех}} = 0,5$ м/с та піднімання цього вантажу з такою ж швидкістю. Радіус приведення передавальних пристроїв $\rho = 0,025$, а їх коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,81$.

3.1.3.26. Асинхронний двигун з номінальною напругою $U_{\text{н}} = 500$ В, номінальною частотою $f_{\text{н}} = 60$ Гц та перевантажувальною здатністю $\lambda_{\text{м}} = M_{\text{к}} / M_{\text{н}} = 2,3$ вмикається у мережу з напругою $U_{\text{м}} = 380$ В та частотою $f_{\text{м}} = 50$ Гц. Визначити, чи можна довго-тривало завантажити двигун номінальним моментом, та розрахувати його відносний допустимий момент навантаження.

3.1.3.27. Визначити опір резистора, який треба ввімкнути в коло ротора асинхронного двигуна з фазним ротором потужністю $P_{\text{н}} = 16$ кВт ($U_{\text{н}} = 380$ В, $I_{\text{н}} = 30,3$ А, $n_{\text{н}} = 720$ об/хв., $U_{2\text{к}} = 220$ В, $I_{2\text{н}} = 46$ А, $\lambda = M_{\text{к}} / M_{\text{н}} = 3,1$), щоб пусковий момент був максимальним.

3.1.3.28. Розрахувати й накреслити залежність пускового моменту асинхронного двигуна з фазним ротором типу 4АК160S4 ($P_{\text{н}} = 16$ кВт, $U_{\text{н}} = 380$ В, $I_{\text{н}} = 27$ А, $n_{\text{н}} = 1445$ об/хв., $U_{2\text{к}} = 340$ В, $I_{2\text{н}} = 45$ А, $\lambda_{\text{м}} = M_{\text{к}} / M_{\text{н}} = 4,0$) від величини опору додаткового резистора в колі ротора. Визначити опір додаткового резистора в колі ротора, при якому величина пускового моменту дорівнюватиме 0,7 від максимального моменту двигуна.

3.1.3.29. Асинхронний двигун типу 4АК200L4 ($P_{\text{н}} = 30$ кВт, $U_{\text{н}} = 380$ В, $I_{\text{н}} = 57,7$ А, $n_{\text{н}} = 1460$ об/хв., $U_{2\text{к}} = 350$ В, $I_{2\text{н}} = 55$ А, $\lambda = M_{\text{к}} / M_{\text{н}} = 4,0$) працює на природній механічній характеристиці з номінальним моментом навантаження. Визначити, як зміниться кутова швидкість двигуна та струм у колі його ротора в порівнянні з номінальними їх значеннями, якщо напруга в мережі, від якої двигун одержує живлення, зменшиться на 20 %.

3.1.3.30. Асинхронний двигун з фазним ротором типу 4АНК355S8 ($P_{\text{н}} = 160$ кВт, $U_{\text{н}} = 380$ В, $I_{\text{н}} = 304,7$ А, $n_0 = 750$ об/хв., $s_{\text{н}} = 0,027$, $s_{\text{к}} = 0,096$, $r_1 =$

0,017 Ом, $x_1 = 0,137$ Ом, $U_{2к} = 285$ В, $I_{2н} = 353$ А, $r'_2 = 0,0188$ Ом, $x'_2 = 0,0108$ Ом, $M_k / M_n = 1,7$) приводить в рух механізм з постійним статичним моментом на валу $M_c = 2800$ Н. м. Двигун працює в рушійному режимі на природній механічній характеристиці.

Визначити кутову швидкість електроприводу, якщо в усі три фази ротора ввести додаткові резистори з опором $R_{д1} = 0,66$ Ом, а також опір додаткових резисторів, які треба ввімкнути послідовно в коло ротора для переведення двигуна зі штучної механічної характеристики в режим проти вмикання з початковим моментом $M_{пр} = 0,85 M_k$.

Визначити також кутову швидкість двигуна, якщо після зміни напрямку його обертання статичний момент на валу зменшиться до $M_c = 720$ Н. м.

3.1.3.31. Асинхронний двигун з фазним ротором типу 4АНК280S4 ($P_n = 132$ кВт, $U_n = 380$ В, $I_n = 247$ А, $n_0 = 1500$ об/хв., $r_1 = 0,0249$ Ом, $x_1 = 0,116$ Ом, $U_{2к} = 251$ В, $I_{2н} = 330$ А, $r'_2 = 0,0276$ Ом, $x_2 = 0,125$ Ом, $k_c = 2,04$, $M_k / M_n = 2,0$) Приводить в рух механізм, що створює на його валу статичний момент $M_c = 805$ Н·м. У коло ротора двигуна симетрично в усі три фази ввімкнені додаткові резистори з опором $R_{д} = 0,908$ Ом.

Визначити величину кутової швидкості приводу при заданому статичному навантаженні, а також величину опору додаткових резисторів, які треба ввести послідовно в коло ротора при переведенні двигуна з цієї швидкості в режим проти-вмикання. Максимально допустимий момент двигуна $M_{доп} = 0,85 M_k$.

3.1.3.32. Для асинхронного двигуна з фазним ротором типу МТН511-8 ($P_n = 34$ кВт, $U_n = 380$ В, $I_n = 82$ А, $n_n = 695$ об/хв., $r_1 = 0,164$ Ом, $x_1 = 0,232$ Ом, $U_{2к} = 294$ В, $I_{2н} = 81$ А, $r_2 = 0,124$ Ом, $x_2 = 0,448$ Ом, $k_e = 1,645$, $\lambda_m = M_k / M_n = 2,3$) розрахувати-графоаналітичним методом опору резисторів, які треба ввімкнути додатково в коло ротора, щоб запустити його в чотири

ступені з середнім пусковим моментом $M_{\text{п}} = 1.5 M_{\text{н}}$. Момент статичного навантаження на валу двигуна $M_{\text{с}} = 320 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

3.1.3.33. Для асинхронного двигуна з фазним ротором типу МТН412-8 ($P_{\text{н}} = 26 \text{ кВт}$, $U_{\text{н}} = 380 \text{ В}$, $I_{\text{н}} = 72 \text{ А}$, $n_{\text{н}} = 710 \text{ об/хв.}$, $U_{2\text{к}} = 266 \text{ В}$, $I_{2\text{н}} = 68 \text{ А}$, $\lambda_{\text{м}} = M_{\text{к}} / M_{\text{н}} = 2.5$) розрахувати графоаналітичним методом опори резисторів, які треба ввімкнути додатково в коло ротора, щоб запустити його в чотири ступені. Вважати, що природна механічна характеристика є прямою лінією, що проходить через точки з координатами $M = 0$, $s = 0$ та $M = M_{\text{н}}$, $s = s_{\text{н}}$. Момент статичного навантаження на валу двигуна $M_{\text{с}} = 200 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Мінімальний момент перемикання $M_2 = 1.2 M_{\text{с}}$

3.1.3.34. Розрахувати аналітичним методом опори резисторів, які треба ввімкнути додатково в коло ротора, для пуску в п'ять ступенів при забезпеченні середнього пускового моменту $M_{\text{п сер}} = 1.5 M_{\text{н}}$ асинхронного двигуна типу МТФ112-6 ($P_{\text{н}} = 5.8 \text{ кВт}$, $U_{\text{н}} = 380 \text{ В}$, $I_{\text{н}} = 16 \text{ А}$, $n_{\text{н}} = 915 \text{ об/хв.}$, $r_1 = 1.26 \text{ Ом}$, $x_1 = 1.26 \text{ Ом}$, $U_{2\text{к}} = 217 \text{ В}$, $I_{2\text{н}} = 19.0 \text{ А}$, $r_2 = 0.5 \text{ Ом}$, $x_2 = 0.648 \text{ Ом}$, $k_{\text{е}} = 3.1$, $I_{\text{м}} = M_{\text{к}} / M_{\text{н}} = 2.4$). Момент статичного навантаження на валу двигуна $M_{\text{с}} = 13 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Механічні характеристики двигуна на робочих ділянках вважати прямолінійними.

3.1.3.35. Аналітичним методом розрахувати опори резисторів, які треба ввімкнути послідовно в коло ротора для запуску асинхронного двигуна типу МТФ712-10 ($P_{\text{н}} = 125 \text{ кВт}$, $U_{\text{н}} = 380 \text{ В}$, $I_{\text{н}} = 320 \text{ А}$, $n_{\text{н}} = 587 \text{ об/хв.}$, $r_1 = 0.016 \text{ Ом}$, $x_1 = 0.081 \text{ Ом}$, $U_{2\text{к}} = 395 \text{ В}$, $I_{2\text{н}} = 225 \text{ А}$, $r_2 = 0.02 \text{ Ом}$, $x_2 = 0.082 \text{ Ом}$, $k_{\text{е}} = 1.01$, $\lambda_{\text{м}} = M_{\text{к}} / M_{\text{н}} = 2.8$). Максимальний момент перемикання $M_1 = 4160 \text{ Н}\cdot\text{м}$; мінімальний момент перемикання $M_2 = 1900 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Статичний момент навантаження на валу двигуна $M_{\text{с}} = 0.4 M_{\text{н}}$. Механічні характеристики двигуна на робочих ділянках вважати прямолінійними.

3.1.3.36. Асинхронний двигун з фазним ротором типу МТН712-10 ($P_{\text{н}} = 155 \text{ кВт}$, $U_{\text{н}} = 380 \text{ В}$, $I_{\text{н}} = 355 \text{ А}$, $n_{\text{н}} = 580 \text{ об/хв.}$, $r_1 = 0.0202 \text{ Ом}$, $x_1 = 0.0643 \text{ Ом}$,

$U_{2к} = 345$ В, $I_{2н} = 285$ А, $r_2 = 0.0189$ Ом, $x_2 = 0.091$ Ом, $k_e = 1.21$, $\lambda_m = M_k / M_n = 2.3$) працює зі статичним реактивним навантаженням $M_c = 2380$ Н·м. Для зупинки двигуна послідовно в коло його ротора вводиться додатковий резистор. Визначити мінімальну величину опору додаткового резистора, при якому двигун зупиниться, а також величину середнього моменту, який при цьому розвиватиме двигун.

3.1.3.37. Металургійний асинхронний двигун з фазним ротором типу МТМ511-8 ($P_n = 22$ кВт, $U_n = 380$ В, $I_n = 55$ А, $n_n = 715$ об/хв., $r_1 = 0.0205$ Ом, $x_1 = 0.284$ Ом, $U_{2к} = 237$ В, $I_{2н} = 58.5$ А, $r_2 = 0.0106$ Ом, $x_2 = 0.231$ Ом, $k_e = 1.53$, $\lambda_m = M_k / M_n = 2.8$) працює зі статичним навантаженням $M_n = 0.98 M_n$. Визначити кількість ступенів резисторів і величину їх опорів, які потрібно ввімкнути додатково в коло ротора для зупинки двигуна з середнім рушійним моментом $M_{сеп} = M_n$.

3.1.3.38. Визначити кількість і величину опорів ступенів резисторів, які потрібно ввімкнути додатково послідовно в колі ротора асинхронного двигуна типу МТН 612-10 ($P_n = 70$ кВт, $U_n = 380$ В, $I_n = 165$ А, $n_n = 71560$ об/хв., $r_1 = 0.06$ Ом, $x_1 = 0.136$ Ом, $U_{2к} = 263$ В, $I_{2н} = 181$ А, $r_2 = 0.093$ Ом, $x_2 = 0.133$ Ом, $k_e = 2.1$, $M_k / M_n = 2.6$) для його зупинки від $\omega = \omega_c$ з середнім рушійним моментом $M_{сеп} = 0.55 M_n$.

3.1.3.39. Визначити кількість та величину опорів резисторів, які потрібно ввімкнути послідовно в коло ротора асинхронної двигуна з фазним ротором потужністю $P_n = 75$ кВт ($U_n = 380$ В, $n_n = 720$ об/хв., $U_{2к} = 213$ В, $I_{2н} = 220$ А, $\lambda_m = M_k / M_n = 2.42$) для його пуску з максимальним пусковим моментом $M_1 = 2000$ Н·м. Мінімальний момент перемикання повинен бути не меншим ніж $1.2 M_n$. Механічні характеристики двигуна на робочих ділянках вважати прямолінійними.

3.1.3.40. Визначити середнє значення моменту при розгоні та реверсуванні асинхронного короткозамкненого двигуна типу 4АН160М4 ($P_H = 22$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 42$ А, $n_0 = 1500$ об/хв., $s_H = 0.022$, $s_K = 0.16$, $M_{II} / M_H = 1.4$, $M_M / M_H = 1.0$, $M_K / M_H = 2.3$). Статичний момент на валу двигуна $M_c = 200$ Н·м. Механічну характеристику на робочій ділянці вважати прямолінійною.

3.1.3.41. Асинхронний двигун з фазним ротором типу МТФ211-6 ($P_H = 6.0$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 18.5$ А, $n_H = 945$ об/хв., $U_{2K} = 256$ В, $I_{2H} = 15.5$ А, $\lambda_M = M_K / M_H = 3.2$) запускається в рух з ввімкненим в коло ротора додатковим резистором, опір якого $R_d = 1.2$ Ом. Статичний момент на валу двигуна $M_c = 0.91 M_H$. Визначити середній момент за час розгону двигуна.

3.1.3.42. Визначити середнє значення моменту при гальмуванні противмиканням асинхронного двигуна типу АЗ-315S-2УЗ ($P_H = 160$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 287$ А, $n_0 = 3000$ об/хв., $s_H = 0.0166$, $M_{II} / M_H = 1.0$, $M_K / M_H = 2.1$, $I_{II} / I_H = 6$, $\cos \varphi = 0.9$). Двигун приводить в рух транспортер зі статичним моментом на валу двигуна $M_c = 0.84 M_H$.

3.1.3.43. Визначити середнє значення моменту при реверсуванні асинхронного короткозамкненого двигуна типу АЗ-315S-6УЗ ($P_H = 110$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 205.8$ А, $n_0 = 1000$ об/хв., $s_H = 0.025$, $M_{II} / M_H = 1.1$, $M_K / M_H = 2$, $I_{II} / I_H = 5.5$, $\eta_H = 0.92$, $\cos \varphi = 0.9$). Статичний момент на валу двигуна $M_c = 0.82 M_H$.

3.1.3.44. Визначити середнє значення моменту при динамічному гальмуванні асинхронного короткозамкненого двигуна типу 4АМС132М2 ($P_H = 11.8$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 24$ А, $n_0 = 1000$ об/хв., $s_H = 0.025$, $M_{II} / M_H = 1.1$, $M_K / M_H = 2.4$, $I_{II} / I_H = 7.5$, $\eta_H = 0.844$, $\cos \varphi = 0.89$). Критичний момент при динамічному гальмуванні $M_{Kd} = 1.8 M_H$. Статичний момент на валу двигуна $M_c = 0.82 M_H$ Н·м.

3.1.3.45. При зупинці асинхронного двигуна з фазним ротором типу МТН 611-10 ($P_H = 33$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 105$ А, $n_H = 695$ об/хв., $U_{2к} = 222$ В, $I_H = 91$ А, $M_K / M_H = 3.1$) застосовується гальмування противмиканням з початковим гальмівним моментом $M_{пр} = 900$ Н·м. Статичний момент на валу двигуна $M_c = 321$ Н·м. Визначити середнє значення моменту двигуна за час сповільнення швидкості до повної зупинки електроприводу.

3.1.3.46. При зупинці асинхронного короткозамкненого двигуна типу 4AP180S4 ($P_H = 22$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 42.6$ А, $n_0 = 1500$ об/хв., $s_H = 0.018$, $s_K = 0.16$, $r_1 = 0.181$ Ом, $x_1 = 0.341$ Ом, $r'_2 = 0.114$ Ом, $x'_2 = 0.671$ Ом, $M_H / M_H = 2.0$, $M_K / M_H = 2.2$) застосовується динамічне гальмування з вмиканням статорної обмотки за схемою, зображеною на рис.2.10. Двигун приводить в рух механізм, який створює на його валу статичний момент $M_c = 105$ Н·м.

Розрахувати й накреслити векторну діаграму струмів у статорній обмотці та заступну схему двигуна, якщо в обмотку статора подати постійний струм I_H / I_H .

3.1.3.47. Механізм переміщення крана приводиться в рух асинхронним двигуном з фазним ротором типу 4AK250M6 ($P_H = 45$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 86.6$ А, $n_H = 975$ об/хв., $r_1 = 0.0737$ Ом, $x_1 = 0.157$ Ом, $U_{2к} = 180$ В, $I_{2H} = 160$ А, $r'_2 = 0.061$ Ом, $x'_2 = 0.234$ Ом, $M_K / M_H = 2.5$). Статичний момент на валу двигуна $M_c = 402$ Н·м. При зупинці приводу застосовується динамічне гальмування перемиканням обмотки статора до джерела постійного струму за схемою, зображеною на рис. 2.9. й введенням додаткових резисторів у коло ротора.

Визначити величину постійного струму, який треба подати в коло статора, й опір додаткових резисторів у колі ротора для забезпечення максимальної потужності гальмування при допустимих параметрах двигуна.

3.1.3.48. Розрахувати й побудувати механічну характеристику електроприводу змінного струму при живленні обмотки статора асинхронного двигуна від джерела постійного струму. Обмотка статора ввімкнена за схемою, зображеною на рис. ПЗ.4. Паспортні дані асинхронного двигуна: $P_H = 11$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 28.4$ А, $n_H = 953$ об/хв., $r_1 = 0.415$ Ом, $x_1 = 0.465$ Ом, $U_{2к} = 200$ В, $I_{2н} = 35.4$ А, $r_2 = 0.132$ Ом, $x_2 = 0.27$ Ом, $M_K / M_H = 3.1$. В коло статора подається постійний струм $I_H = 19$ А. Опір додаткового резистора в колі ротора $R_d = 0.1 R_H$.

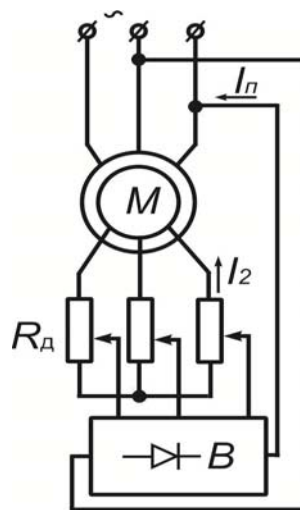


Рисунок ПЗ.4 - Електропривод змінного струму при живленні обмотки статора асинхронного двигуна від джерела постійного струму

3.1.3.49. Розрахувати, з якою швидкістю буде опускатись вантаж, що створює на валу привідного двигуна момент статичного опору $M_c = M_H$. Підіймальний механізм приводиться в рух асинхронним двигуном з фазним ротором типу 4AK180M6 ($P_H = 13$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 28.8$ А, $n_H = 956$ об/хв., $r_1 = 0.267$ Ом, $x_1 = 0.497$ Ом, $U_{2к} = 325$ В, $I_{2н} = 25$ А, $r'_2 = 0.435$ Ом, $x'_2 = 0.84$ Ом, $k_c = 1.11$, $M_K / M_H = 4.0$). Двигун працює в режимі динамічного гальмування з самозбудженням (рис. Рис. 2.11). Радіус приведення $r = 0.025$; в коло ротора введений додатковий резистор з опором $R_d = 3r_2$; коефіцієнт співвідношення постійного струму, який

подається в обмотку статора при , динамічному гальмуванні, та струму в колі ротора $k_c = I_{\pi} / I_{pH} = 1.2$.

3.1.3.50. В табл. ПЗ.2 наведені паспортні дані асинхронного двошвидкісного двигуна типу 4AI60S 6/4, де: p - кількість пар полюсів

Таблиця ПЗ.2 – Паспортні дані асинхронного двошвидкісного двигуна типу 4AI60S 6/4

2p	P_H	U_H	s_H	s_K	M_K/M_H	M_{π}/M_H	I_{π}/I_H	ККД	$\cos\varphi$
-	кВт	В	-	-	-	-	-	-	-
6	11	380	0.032	0.15	1.8	1.3	7.5	0.8	0.68
4	13	380	0.021	0.15	1.8	1.3	7.5	0.79	0.85

Визначити для обох механічних характеристик цього двигуна:

- кутові швидкості при номінальному навантаженні;
- номінальні струми в обмотці статора;
- номінальні моменти на валу двигуна;
- значення критичних та пускових моментів.

3.1.3.51. Розрахувати й побудувати механічні $\omega = f_1 (M_1)$ та електромеханічні $\omega = f_2 (I_2)$ характеристики асинхронного двошвидкісного двигуна типу 4A132S4/2, паспортні дані якого наведені в табл.3.3, де p - кількість пар полюсів.

Таблиця ПЗ.3 - Паспортні дані асинхронного двошвидкісного двигуна типу 4A132S4/2

2p	P_H	U_H	I_H	n_H	r_1	x_1	r'_2	x'_2
-	кВт	В	А	об/хв.	Ом	Ом	Ом	Ом
4	6	380	12.4	1469	1.947	3	0.956	3.7
2	6.7	380	14.5	2919	0.819	1.214	0.5	1.244

3.1.3.52. В табл. ПЗ.4 наведені паспортні дані асинхронного тришвидкісного двигуна типу 4AI60S 6/4/2 при номінальному навантаженні, де: p - кількість пар полюсів. Синхронні швидкості

обертання двигуна: 1000 / 1500 / 3000 об/хв..

Визначити для всіх трьох механічних характеристик цього двигуна:

- кутові швидкості при номінальному навантаженні;*
- номінальні струми в обмотці статора;
- номінальні моменти на валу двигуна;
- критичні моменти;
- пускові моменти.

Таблиця ПЗ.4 - Паспортні дані асинхронного тришвидкісного двигуна типу 4AI60S 6/4/2

$2p$	P_H	U_H	s_H	s_K	M_K/M_H	M_{II}/M_H	I_{II}/I_H	ККД	$\cos\varphi$
-	кВт	В	-	-	-	-	-	-	-
6	4.8	380	0.027	0.175	2	1.3	6	0.8	0.815
4	5.3	380	0.015	0.13	2	1.3	7	0.86	0.83
2	7.5	380	0.025	0.185	2	1.1	7	0.93	0.785

3.1.3.53. В табл.ПЗ.5 наведені паспортні дані асинхронною чотиришвидкісного двигуна типу 4A200L 12/8/6/4 при номінальному навантаженні, де: p - кількість пар полюсів. Синхронні швидкості обертання двигуна: 1000/ 1500/3000 об/хв.. Визначити для всіх чотирьох механічних характеристик цього двигуна:

- кутові швидкості при номінальному навантаженні;
- номінальні струми в обмотці статора;
- номінальні моменти на валу двигуна;
- критичні моменти;
- пускові моменти.

Таблиця ПЗ.5 - Паспортні дані асинхронною чотиришвидкісного двигуна типу 4A200L 12/8/6/4

2р	P_H	U_H	s_H	s_K	M_K/M_H	M_{II}/M_H	I_{II}/I_H	ККД	$\cos\varphi$
-	кВт	В	-	-	-	-	-	-	-
6	4.8	380	0.027	0.175	2	1.3	6	0.8	0.815
4	5.3	380	0.015	0.13	2	1.3	7	0.86	0.83
2	7.5	380	0.025	0.185	2	1.1	7	0.93	0.785

3.1.3.54. Асинхронний двигун типу 4A225M 4/2. паспортні дані якого в номінальному режимі роботи наведені в табл. ПЗ.6, схемно дає можливість перемикаєти його з трикутника в подвійну зірку.

Визначити для обох схем ввімкнення цього двигуна:

- синхронні кутові швидкості та кутові швидкості при номінальному навантаженні;
- потужності, які споживає двигун з мережі при номінальному навантаженні;
- номінальні потужності;
- номінальні моменти;
- пускові моменти.

Таблиця ПЗ.6 - Паспортні дані асинхронного двигуна типу 4A225M 4/2

2р	U_H	I_H	s_H	s_K	ККД	$\cos\varphi$
-	В	А	-	-	-	-
4	380	47.7	0.012	0.065	0.92	0.85
	380	45.6	0.012	0.09	0.86	0.87

3.1.3.55. Асинхронний двигун з фазним ротором потужністю $P_H = 28$ кВт ($U_H = 380$ В, $n_H = 953$ об/хв., $U_{2K} = 197$ В, $r_1 = 0.18$ Ом, $x_1 = 0.297$ Ом, $r_2 = 0.0496$ Ом, $x_2 = 0.136$ Ом, $\lambda_K = M_K / M_H = 2.2$) працює за схемою

однофазного вмикання, зображеною на рис. 2.12, з введеними послідовно в коло ротора додатковими резисторами з опором $R_d = 2.1 r_2$.

Розрахувати й побудувати для цього режиму роботи двигуна механічну характеристику.

Особливими для цієї характеристики будуть ковзання при моменті двигуна $M = 0$. Значення цих ковзань можна визначити з рівняння моменту для несиметричного режиму роботи двигуна, прирівнявши його до нуля.

$$M = \frac{2 \cdot \lambda_k \cdot M_k \cdot}{3(s/s_{кш} + s_{кш}/s)} - \frac{2 \cdot \lambda_k \cdot M_k \cdot}{3((2-s)/s_{кш} + s_{кш}/(2-s))} = 0;$$

де $s_{кш}$ - критичне ковзання на штучній характеристиці при симетричному живленні статора від мережі з номінальною напругою та з введеним у коло ротора додатковим резистором $R_{2д}$; $s_{кш} = s_k(r_2 + R_{2д}) / r_2$.

Розв'язавши рівняння моменту відносно ковзання s , отримаємо

$$s^3 - 3 \cdot s^2 + (2 + s_{кш}^2) \cdot s - s_{кш}^2 = 0.$$

Його можна записати ще в такій формі

$$(s - s_1) \cdot (s - s_2) \cdot (s - s_3) = 0.$$

Корені цього рівняння дають значення ковзань при $M=0$:

$$s_1 = 1.0; s_2 = 1 - \sqrt{1 - s_{кш}^2}; s_3 = 1 + \sqrt{1 - s_{кш}^2}.$$

3.1.3.56. Асинхронний двигун з фазним ротором типу 4АК200М4 УЗ ($P_H = 28$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 42.6$ А, $n_H = 1462$ об/хв., $U_{2к} = 340$ В, $r_1 = 0.12$ Ом, $x_1 = 0.26$ Ом, $r_2 = 0.133$ Ом, $x_2 = 0.38$ Ом, $\lambda_k = M_k / M_H = 4.0$) працює за схемою однофазного несиметричного вмикання (рис. ПЗ.4) з закороченими в колі ротора резисторами.

Розрахувати й побудувати для такої схеми вмикання двигуна штучну механічну характеристику та визначити кутові швидкості неробочого ходу $\pm \omega_{0ш}$ і кутові швидкості $\pm \omega_{кш}$, при яких момент двигуна при такому вмиканні має максимальне значення

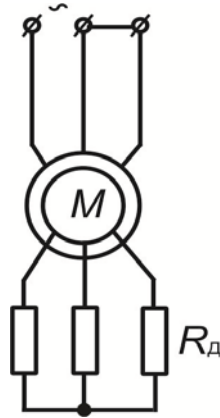


Рисунок ПЗ.4 - Схема однофазного несиметричного вмикання

3.1.3.57. Підіймальний механізм приводиться в рух асинхронним двигуном з фазним ротором потужністю $P_H = 16$ кВт ($U_H = 380$ В, $n_H = 955$ об/хв., $U_{2к} = 208$ В, $r_1 = 0.33$ Ом, $x_1 = 0.413$ Ом, $r_2 = 0.11$ Ом, $x_2 = 0.25$ Ом, $\lambda_k = M_k / M_H = 3.0$). Двигун одержує живлення за схемою однофазного вмикання, зображеною на рис. ПЗ.4.

Визначити, з якою кутовою швидкістю буде працювати двигун при опусканні механізмом вантажу, якщо приведений до валу двигуна статичний момент $M_c = 0.48 M_k$, а в усі три фази кола ротора введені додаткові резистори, що забезпечують на штучній характеристиці критичне ковзання $s_{кш} = 2.0$. Визначити також величину опору цих додаткових резисторів.

Прийняти, що механічна характеристика при однофазному вмиканні з додатковими резисторами в колі ротора прямолінійна.

3.1.3.58. Визначити, з якою кутовою швидкістю буде працювати асинхронний двигун з фазним ротором типу 4АК160М6УЗ ($P_H = 10$ кВт, $U_H = 380$ В, $I_H = 23.6$ А, $n_H = 957$ об/хв., $r_1 = 0.4$ Ом, $x_1 = 0.66$ Ом, $r'_2 = 0.54$ Ом, $x'_2 = 1.21$ Ом, $\lambda_k = M_k / M_H = 3.5$). ввімкнений за однофазною схемою (рис. 2.12), якщо він навантажений активним статичним моментом $M_k = 0.5 M_H$, а симетрично в усі три фази ротора введено додаткові резистори з опором $R_{2д} = 1.1$ Ом.

3.1.3.59. Асинхронний короткозамкнений двигун типу 4А280S4 У3 ($P_n = 110$ кВт, $U_n = 380$ В, $I_n = 201$ А, $n_n = 1470$ об/хв., $r_1 = 0.025$ Ом, $x_1 = 0.13$ Ом, $r'_2 = 0.021$ Ом, $x'_2 = 0.18$ Ом, $M_k / M_n = 2$), одержує живлення від мережі, в якій з певних причин величини фазних напруг різні. В результаті розкладення цієї несиметричної системи напруг одержані: трифазна система лінійних напруг прямої послідовності $U_{пр\ л} = 320$ В та трифазна система лінійних напруг зворотної послідовності $U_{зв\ л} = 205$ В. Розрахувати й побудувати механічну характеристику цього двигуна при

3.1.3.60. Асинхронний короткозамкнений двигун типу 4А200М2 У3 ($P_n = 37$ кВт, $U_n = 380$ В, $I_n = 70$ А, $n_n = 2495$ об/хв., $r_1 = 0.09$ Ом, $x_1 = 0.3$ Ом, $r'_2 = 0.07$ Ом, $x'_2 = 0.38$ Ом, $M_k / M_n = 2.5$) працює зі статичним моментом на валу $M_c = 048$ Н·м. В процесі роботи на одній із фаз вийшов з ладу запобіжник (рис. ПЗ.5). Визначити, величину кутової швидкості двигуна й значення струму в обмотках статора при такому режимі роботи.

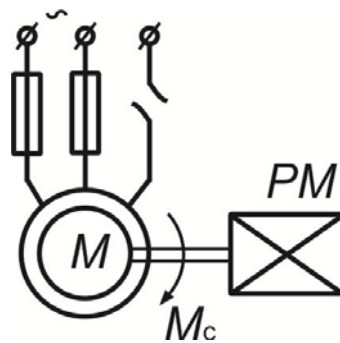


Рисунок ПЗ.5 - Асинхронний короткозамкнений двигун коли на одній із фаз вийшов з ладу запобіжник

ПЗ.2. Властивості і характеристики електроприводів з синхронними двигунами

ПЗ.2.1 Основні розрахункові формули та співвідношення

Кутова (моментна) характеристика:

$$M = \frac{3 \cdot U_1 \cdot E \cdot \sin \Theta_{\text{ЕЛ}}}{\omega_0 \cdot x_{1d}} + \frac{U_1^2}{2 \cdot \omega_0} \cdot \left(\frac{1}{x_{1q}} - \frac{1}{x_{1d}} \right) \cdot \sin 2\Theta_{\text{ЕЛ}};$$

де U_1, E - діючі значення фазної напруги статора і ЕРС ротора; x_{1d} - синхронний реактивний опір по поздовжній осі; x_{1q} - синхронний реактивний опір по поперечній осі; $\Theta_{\text{ЕЛ}}$ - кут навантаження (кут між векторами напруги і ЕРС).

ПЗ.2.2 Приклади розв'язування задач

3.2.2.1. Визначити величину активного опору додаткових резисторів, які потрібно ввімкнути послідовно в коло обмоток статора синхронного двигуна типу ДСЗ-2121-16 ($S_{\text{н}} = 17000$ кВ·А, $P_{\text{н}} = 14070$ кВт, $U_{\text{н}} = 10$ кВ, $I_{\text{н}} = 983$ А, $n_0 = 375$ об/хв., $\cos \varphi_{\text{н}} = 0.85$, $\cos \varphi_{\text{к}} = 0.1$, $M_{\text{макс}} / M_{\text{н}} = 2.1$, $M_{\text{вх}} / M_{\text{н}} = 1.88$, $i_{\text{п}} = I_{\text{п}} / I_{\text{н}} = 6.1$), для зменшення його пускового струму при запуску від мережі обмеженої потужності в два рази; ($I_{\text{пш}} / I_{\text{п}} = 0.5$). Додаткові резистори при досягненні двигуном кутової швидкості $\omega = 0.6 \omega_0$ закорочуються.

Розв'язок:

Пусковий струм на природній пусковій характеристиці:

$$I_{\text{п}} = i_{\text{п}} \cdot I_{\text{н}}; I_{\text{п}} = 6.1 \cdot 983 = 5996 \text{ А.}$$

Повний внутрішній опір кола статора при пуску:

$$Z_{\text{к}} = \frac{U_{\text{н}}}{1.734 \cdot I_{\text{п}}}; Z_{\text{к}} = \frac{10000}{1.734 \cdot 5996} = 0.962 \text{ Ом.}$$

Активний внутрішній опір кола статора при пуску:

$$r_k = Z_k \cdot \cos\varphi_k; \quad r_k = 0.962 \cdot 0.1 = 0.0962 \text{ Ом.}$$

Індуктивний внутрішній опір кола статора при пуску:

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}; \quad X_k = \sqrt{0.962^2 - 0.0962^2} = 0.913$$

Величина опору додаткових резисторів:

$$R_{1д} = \sqrt{(Z_k/a)^2 - x_k^2} - r_k$$
$$R_{1д} = \sqrt{(0.962/0.5)^2 - 0.913^2} - 0.0962 = 1.6 \text{ Ом}$$

ПЗ.2.3 Задачі для самостійного розв'язку

3.2.3.1. Розрахувати та побудувати кутову характеристику $M_0 = f(\theta)$ синхронного явнополюсного двигуна типу МС321-6/ 6 ($S_H = 850 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, $P_H = 640 \text{ кВт}$, $U_H = 3.0 \text{ кВ}$, $I_H = 164 \text{ А}$, $n_0 = 1000 \text{ об/хв.}$, $r_1 = 0.141 \text{ Ом}$, $x_1 = 1.215 \text{ Ом}$, $\cos\varphi_H = 0.8$, $x_d = 12.7 \text{ Ом}$, $x_q = 7.72 \text{ Ом}$, $I_{PH} = \text{А}$, $r_p = 0.062 \text{ Ом}$).

3.2.3.2. Розрахувати та побудувати пускову механічну характеристику $M = f(\omega)$ синхронного явнополюсного двигуна типу СДВ-15-39-10 УЗ ($P_H = 800 \text{ кВт}$, $U_H = 6.0 \text{ кВ}$, $I_H = 91/5 \text{ А}$, $n_0 = 600 \text{ об/хв.}$, $\text{ККД} = 0.934$, $\cos\varphi_H = 0.8$, $M_{\text{макс}} / M_H = 2.2$, $M_{\text{п}} / M_H = 1.5$, $I_{\text{п}} / I_H = 6.5$), а також визначити величину "вхідного моменту" $M_{\text{вх}}$ при умові, що струм збудження буде подаватись при досягненні двигуном кутової швидкості $\omega_{\text{вх}} = 0.95 \omega_0$.

3.2.3.3. Розрахувати графоаналітичним і аналітичним методами величину індуктивного опору додаткових резисторів, які потрібно ввімкнути послідовно в коло обмоток статора синхронного двигуна типу ДС-2121-16 ($S_H = 17000 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, $P_H = 14070 \text{ кВт}$, $U_H = 10 \text{ кВ}$, $I_H = 983 \text{ А}$, $n_0 = 375 \text{ об/хв.}$, $M_{\text{макс}} / M_H = 2.1$, $M_{3H} / M_H = 1.88$, $I_{\text{п}} / I_H = 6.1$) для зменшення на 35 % його

пускового струму при запуску від мережі живлення з обмеженою потужністю; ($I_{\text{пш}}/I_{\text{н}} = a = 0.65$). При досягненні двигуном підсинхронної швидкості додаткові резистори треба закортити.

3.2.3.4. Розрахувати графоаналітичним і аналітичним методами величину активного опору додаткових резисторів, які потрібно ввімкнути послідовно в коло обмоток статора синхронного двигуна типу МС-325-12 ($S_{\text{н}}=8000$ кВ·А, $P_{\text{н}} = 6150$ кВт, $U_{\text{н}} = 6.0$ кВ, $I_{\text{н}} = 770$ А, $n_0 = 550$ об/хв., $M_{\text{макс}}/M_{\text{н}} = 1.85$, $M_{\text{вх}}/M_{\text{н}} = 1,29$, $M_{\text{п}}/M_{\text{н}} = 0.7$, $I_{\text{п}}/I_{\text{н}} = 6.1$) для зменшення на 20% його пускового моменту при запуску від мережі живлення з обмеженою потужністю; ($M_{\text{пш}}/M_{\text{п}} = \mu = 0.65$). При досягненні двигуном підсинхронної швидкості додаткові резистори треба закортити.

3.2.3.5. Розрахувати графоаналітичним і аналітичним методами величину індуктивного опору додаткових резисторів, які потрібно ввімкнути послідовно в коло обмоток статора синхронного двигуна типу МС-323-14/8 ($S_{\text{н}} = 3850$ кВ·А, $P_{\text{н}} = 3300$ кВт, $U_{\text{н}} = 3.0$ кВ, $I_{\text{н}} = 740$ А, $n_0 = 750$ об/хв., $M_{\text{макс}} / M_{\text{н}} = 2.25$, $M_{\text{вх}}/M_{\text{н}} = 0.8$, $M_{\text{п}} / M_{\text{н}} = 0.8$, $I_{\text{п}} / I_{\text{н}} = 6.0$) для зменшення на 30% його пускового моменту при запуску від мережі живлення з обмеженою потужністю; ($M_{\text{пш}} / M_{\text{п}} = \mu = 0.65$). При досягненні двигуном підсинхронної швидкості додаткові резистори закортуються.

3.2.3.6. Розрахувати та побудувати механічну характеристику при динамічному гальмуванні синхронного двигуна типу СДВ-16-12-УЗ ($P_{\text{н}} = 1250$ кВт, $U_{\text{н}} = 6.0$ кВ, $I_{\text{н}} = 144$ А, $n_0 = 500$ об/хв., $\cos\varphi_{\text{н}} = 0.9$, $\cos\varphi_{\text{к}} = 0.12$, $M_{\text{макс}} / M_{\text{н}} = 2.2$, $M_{\text{вх}} / M_{\text{н}} = 0.9$, $M_{\text{п}} / M_{\text{н}} = 1.5$, $I_{\text{п}} / I_{\text{н}} = 6.5$). Критичний момент при динамічному гальмуванні $M_{\text{кдг}} = 0.85 M_{\text{макс}}$, відносна швидкість при критичному моменті $V = 0.42$. Визначити також величину опору резисторів, які потрібно ввести послідовно з обмотками статора двигуна для забезпечення цієї механічної характеристики й розрахувати середній гальмівний момент за час гальмування.

Необхідно відмітити, що механічна характеристика динамічного гальмування цього двигуна без додаткових резисторів у колі статора проходить через точки з координатами: $M = 0$, $V = 0$ та $M = -M_n$, $v = 0.079$.

3.2.3.7. Розрахувати графоаналітичним і аналітичним методами величину індуктивного опору додаткових резисторів, які потрібно ввімкнути послідовно в коло обмоток статора синхронного двигуна типу ДС-2121-16 ($S_n = 17000$ кВ·А, $P_n = 14070$ кВт, $U_n = 10$ кВ, $I_n = 983$ А, $n_0 = 375$ об/хв., $M_{\max} / M_n = 2.1$, $M_{zn} / M_n = 1.88$, $I_n / I_n = 6.1$) для зменшення на 35 % його пускового струму при запуску від мережі живлення з обмеженою потужністю; ($I_{пш} / I_n = a = 0.65$). При досягненні двигуном підсинхронної швидкості додаткові резистори треба за-коротити.

3.2.3.8. Розрахувати графоаналітичним і аналітичним методами величину активного опору додаткових резисторів, які потрібно ввімкнути послідовно в коло обмоток статора синхронного двигуна типу МС-325-12 ($S_n=8000$ кВ·А, $P_n=6150$ кВт, $U_n = 6.0$ кВ, $I_n = 770$ А, $n_0 = 550$ об/хв., $M_{\max}/M_n = 1.85$, $M_{вх}/M_n = 1,29$, $M_n/M_n = 0.7$, $I_n/I_n = 6.1$) для зменшення на 20% його пускового моменту при запуску від мережі живлення з обмеженою потужністю; ($M_{пш}/M_n = \mu = 0.65$). При досягненні двигуном під-синхронної швидкості додаткові резистори треба за-коротити.

3.2.3.9. Розрахувати графоаналітичним і аналітичним методами величину індуктивного опору додаткових резисторів, які потрібно ввімкнути послідовно в коло обмоток статора синхронного двигуна типу МС-323-14/8 ($S_n = 3850$ кВ·А, $P_n = 3300$ кВт, $U_n = 3.0$ кВ, $I_n = 740$ А, $n_0 = 750$ об/хв., $M_{\max} / M_n = 2.25$, $M_{вх} / M_n = 0.8$, $M_n / M_n = 0.8$, $I_n / I_n = 6.0$) для зменшення на 30% його пускового моменту при запуску від мережі живлення з обмеженою потужністю; ($M_{пш} / M_n = \mu = 0.65$). При досягненні двигуном підсинхронної швидкості додаткові резистори закорочуються.

ЛІТЕРАТУРА

1. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 722 с.
2. Васильев Н.Н. Дробязко С.Ф. Сборник задач по основам электропривода. – К.: Гостехиздат УССР, 1962, – 224.
3. Видмиш А.А. Теорія електропривода. Курсове та дипломне проектування. Самостійна та індивідуальна робота студентів: навчальний посібник / А. А. Видмиш, С. М. Бабій, В. В. Петрусь. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 96 с.
4. Видмиш А.А., Трошин О.А. Теорія електропривода. Лабораторний практикум/ Навчальний посібник. Видмиш А.А., Трошин О.А – Вінниця: ВДТУ, 2003. – 135 с.
5. Гейлер Л.Б. Электропривод в тяжелом машиностроении. – М.: ГНТИМСЛ, 1958. – 587 с.
6. Епифанов А.П. Основы электропривода. – СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 192 с.
7. Есаков В.П., Торопов В.И. Сборник задач по теории электропривода. – “Высшая школа”, 1968, – 264.
8. Зеленов А.Б. Теория электропривода. Часть №1. – Алчевск, ИПЦ “Ладо”, ДонГТУ, 2005. – 394с.
9. Зеленов А.Б. Теория электропривода. Часть №2. – Алчевск, ИПЦ “Ладо”, ДонГТУ, 2005. – 512с.
10. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 543с.
11. Г.М. Калетнік, С.Т. Олійнічук, О.П. Скорук, О.В. Климчук, В.І. Яцковський, Д.М. Токарчук, І.А. Здор Альтернативна енергетика України: особливості функціонування і перспективи розвитку: Колективна монографія / [за ред. проф. Г.М. Калетніка]. – Вінниця: «Едельвейс і К», 2012. – 250 с.

- 12.Ключев В.И. Теория электропривода. - М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
- 13.Матвійчук В.А., Стаднік М.І., Рубаненко О.О. Електропривод виробничих машин і механізмів. Навчальний посібник з виконання курсової роботи. – Вінниця: ВНАУ, 2016. – с.
- 14.Миллер Е.В. Основы теории электропривода. – М.: Росвузиздат, 1963. –1963. – 344 с.
- 15.Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
- 16.Москаленко В.В. Электрический привод. – М.: Издательский центр “Академия”, 2005. – 368 с.
- 17.Піцан Р.М., Бардачевський В.Т., Бойчук Б.Г. Збірник задач до курсу “Електропривод”. / Навчальний посібник. – Львів, Видавництво Державного університету “Львівська політехніка”, 1999. – 426 с.
- 18.Попович М.Г. Теорія електропривода. - К.: Вища шк., 1993 – 496 с.
- 19.Фираго Б.И. Теория электропривода : учебное пособие / Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. - Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с
- 20.Фролов Ю.М., Шелякин В.П. Основы электрического привода. – М.: Колос, 2007. – 252 с.
- 21.Хализев Г.П. Электропривод и основы управления. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 384 с.
- 22.Чиликин М.Г. Общий курс электропривода. - М.: Энергия, 1971. – 432 с.
- 23.Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
- 24.Чиликин М.Г., Соколов М.М., Терехов В.М., Шинянский А.В. Основы автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1974. – 568 с.
- 25.Ярошенко Л.В. Лабораторний практикум з електропривода та електрообладнання: Навчальний посібник. – Вінниця: РВВ ВНАУ, 2010. – 192 с.

ДОДАТКИ. Довідкові дані електричних машин

Таблиця Д.1 - Технічні дані двигунів типу 4ПО та 4ПБ з висотою осі обертання 80-112 мм

Типорозмір двигуна	P_n		U_n	I_n		n_n	$n_{макс}$	J_D
	кВт			А				
	УХЛ4	04	В	УХЛ4	04	об/хв	об/хв	кг·м ²
4ПО80А1	0.18	0.16	110 220	3.5 1.6	3.2 1.3	1000	2000	0.017
	0.25	0.225	110 220	4.1 1.7	3.6 1.5	1500	3000	
	0.55	0.5	110 220	7.9 3.8	7.1 3.4	3000	4000	
4ПО80А2	0.25	0.225	110 220	4.0 1.8	3.6 1.6	1000	2000	0.027
	0.37	0.33	110 220	5.8 2.1	6.2 1.9	1500	4000	
	0.55	0.5	110 220	8.0 3.5	7.2 3.2	2200	4000	
	0.75	0.67	110 220	10.7 4.9	9.6 4.4	3000	4000	
4ПО80В1	0.37	0.33	110 220	4.8 2.4	4.3 2.1	1000	4000 2000	0.039
	0.55	0.5	50	14.5	13.0	1500	4000 4000	
			75	10.2	9.2			
			110	7.7	6.9			
			220	3.0	2.9			
0.75	0.675	110 220	10.2 5.0	9.2 4.5	2200	4000		
1.1	1.0	50	31.2	28.1	3000	4000		
		75	21.1	19.9				
		110 220	15.2 7.1	13.7 6.4				
4ПО100S1	0.37	0.330	110 220	5.7 2.7	5.1 2.4	750	3000 1500	0.054
	0.55	0.500	110 220	8.4 3.9	7.6 3.5	1000	4000 2000	
			110 220	10.4 5.1	9.4 4.6	1500	4000	
	1.10	1.000	110 220	14.0 6.7	12.6 6.1	2200	4000	
	1.50	1.350	110 220	20.0 9.7	18.0 8.7	3000	4000	
4ПО100S2	0.55	0.500	110 220	8.6 3.8	7.7 3.4	750	3000 1500	0.054
	0.75	0.675	110 220	10.4 4.8	9.4 4.3	1000	4000 2000	
	0.55	0.500	75	11.9	10.7	1000	-	
	1.10	1.000	110 220	13.8 6.1	12.4 5.5	1500	4000	
			110 220	19.3 9.5	17.3 8.6	2200	4000	
	2.20	2.000	110 220	26.2 13.4	23.6 12.0	3000	4000	
4ПО100L1	0.75	0.675	110 220	11.0 5.2	9.9 4.7	750	3000 1500	0.100
	1.10	1.000	110	15.4	13.9	1000	4000	

Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1

	1.50	1.350	220 110 220	7.2 19.0 9.3	6.5 17.2 8.4	1500	2000 4000	
	2.20	2.000	110 220	28.0 13.9	25.4 12.5	2200	4000	
	3.00	2.700	110 220	37.2 18.4	22.7 16.6	3000	4000	
4ПО112М1	1.50	1.360	110 220	19.0 9.0	17.3 8.4	1000	2000	0.140
	2.20	2.000	110 220	26.0 12.8	23.6 11.5	1500	3000	
	3.00	2.700	110 220	34.7 17.0	31.2 15.3	2200	4000	
	4.00	3.600	110 220	44.8 22.0	40.3 19.8	3000	4000	
4ПО112М2	1.50	1.350	110 220	19.1 9.6	18.0 8.6	750	1500	0.180
	2.20	2.000	110 220	27.9 13.6	25.0 12.2	1000	2000	
	3.00	2.700	110 220	33.8 16.6	30.4 15.0	1500	3000	
	4.00	3.600	110 220	45.0 22.0	40.0 20.0	2200	4000	
	5.50	5.000	110 220	60.0 30.0	54.0 27.0	3000	4000	
4ПБ80А1	0.14	0.126	110 220	2.8 1.2	2.5 1.0	1000	2500	0.017
	0.18	0.160	110 220	2.9 1.3	2.6 1.1	1500	4000	
	0.37	0.330	110 220	5.9 2.8	5.3 2.5	3000	4000	
4ПБ80А2	0.18	0.160	110 220	2.9 1.3	2.6 1.1	1000	4000 2500	0.027
	0.25	0.225	110 220	3.7 1.6	3.3 1.5	1500	4000	
	0.37	0.330	110 220	5.0 2.4	4.5 2.2	2200	4000	
	0.55	0.500	110 220	8.1 3.8	7.2 3.4	3000	4000	
4ПБ80В1	0.25	0.225	110 220	3.8 1.8	3.4 1.6	1000	4000 2500	0.039
	0.37	0.330	110 220	5.1 2.4	4.6 2.1	1500	4000	
	0.55	0.500	110 220	7.3 3.5	6.6 3.2	2200	4000	
	0.75	0.675	110 220	9.3 4.5	3.2 8.4	3000	4000	
4ПБ100S1	0.25	0.225	110 220	4.2 1.9	4.0 3.8	750	3000 2000	0.054
	0.40	0.360	110 220	6.1 2.8	1.7 5.5	1000	4000 2500	
	0.55	0.500	110 220	7.7 3.6	2.5 6.9	1500	4000	
	0.75	0.675	110 220	9.6 4.6	3.2 8.6	2200	4000	
	1.10	1.000	110 220	13.9 6.7	4.1 12.5	3000	4000	
4ПБ100S2	0.37	0.330	110	5.4	6.0	750	3000	0.054

Додатки

	0.75	0.675	220 220 110 220	2.6 3.3 9.3 4.5	4.9 2.3 3.0 8.4	1500	2000 4000	
	1.10	1.000	110 220	13.3 6.5	412.0 5.8	2200	4000	
	1.50	1.350	110 220	17.8 8.7	16.0 78	3000	4000	
4ПБ100L1	0.40	0.340	110 220	6.0 3.1	5.4 2.8	750	3000 2000	0.104
	0.60	0.540	110 220	8.0 3.8	7.2 3.4	1000	4000 2500	
	0.90	0.810	110 220	10.6 5.2	9.5 4.7	1500	4000	0.104
	1.30	1.170	110 220	15.3 7.4	13.8 6.7	2200	4000	
	1.80	1.620	110 220	20.7 10.0	18.6 9.0	3000	4000	
4ПБ112M1	0.50	0.500	110 220	8.0 3.9	7.2 3.5	750	2500 2000	0.140
	0.75	0.675	110 220	10.5 5.0	9.5 4.5	1000	3000 2500	
	1.10	1.000	110 220	14.0 6.7	12.6 6.0	1500	4000	
	1.50	1.350	110 220	18.3 9.1	16.5 8.2	2200	4000	
	2.20	2.000	110 220	25.6 12.5	23.0 11.3	3000	4000	
4ПБП2M2	1.00	0.900	110 220	13.0 6.4	11.7 5.8	1000	2500	0.180
	1.50	1.350	110 220	17.6 8.8	15.8 7.9	1500	4000	
	2.20	2.000	110 220	25.3 12.1	22.8 11.1	2200	4000	

Таблиця Д.2 - Технічні дані двигунів типу 4ПФ з висотою осі обертання 112 мм.

Типорозмір двигуна	P_n	U_n	I_n	ККД	n_n	n_{\max}	J_d кг*м ²
	кВт	В	А		об/хв	об/хв	
4ПФ112S	2.0	220	14.5	0.576	450	5000	0.047
	3.2		19.8	0.693	750		
	4.0		24.0	0.723	990		
4ПФ112M	3.0	220	20.0	0.603	475	5000	0.056
	4.3		26.4	0.680	730		
4ПФ112L	3.6	220	24.5	0.603	425	5000	0.063
4ПФ132S	4.3	220	26.9	0.650	580	4500	0.095
	6.0		32.7	0.740	875		
	7.5		43.6	0.760	1000		
	15.0		85.4	0.779	1400		
4ПФ132M	8.0	220	47.3	0.680	600	4500	0.116
	8.5		48.6	0.760	785		
	11.0		61.5	0.785	1060		
4ПФ132L	8.5	220	54.4	0.680	515	4500	0.135
	11.0		62.8	0.760	800		
4ПФ160S	11.0	220	66.2	0.705	530	4000	0.250
	15.0		79.6	0.807	850		
4ПФ160M	15.0	220	85.6	0.753	580	4000	0.290
4ПФ180S	17.0	220	99.4	0.730	500	3800	0.442

Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1

4ПФ180М	20.0	220	114.5	0.750	475	3800	0.578
4ПФ112S	3.1	440	9.9	0.690	730	5000	0.047
	4.3		12.6	0.740	975		
	5.5		14.9	0.814	1450		
	7.5		19.2	0.871	2120		
4ПФ112М	4.3	440	13.3	0.674	690	5000	0.056
	5.5		16.6	0.741	900		
	7.5		19.6	0.825	1450		
4ПФ112L	5.5	440	17.0	0.708	690	5000	0.063
	7.5		21.5	0.810	975		
	10.0		26.3	0.812	1320		
4ПФ132S	5.5	440	15.7	0.730	800	4500	0.095
	15.0		41.7	0.800	1400		
	18.5		47.8	0.850	2180		
	30.0		76.7	0.871	3070		
4ПФ132М	8.5	440	24.8	0.750	800	4500	0.116
	11.0		30.0	0.800	1090		
	22.0		59.3	0.830	1600		
	30.0		78.9	0.863	2300		
4ПФ132L	11.0	440	30.7	0.780	825	5000	0.135
	15.0		40.8	0.810	1030		
	23.6		64.8	0.830	1400		
4ПФ160S	15.0	440	42.5	0.761	730	4500	0.250
	18.5		48.6	0.820	1090		
	30.0		78.5	0.840	1450		
4ПФ160М	18.5	440	49.6	0.808	775	4500	0.290
	22.0		56.8	0.845	1090		
4ПФ160L	22.0	440	58.7	0.813	775	4500	0.325
	30.0		77.0	0.855	1030		
4ПФ180S	26.5	440	72.8	0.780	775	4500	0.442
	37.0		95.7	0.850	1150		
	45.0		114.0	0.880	1450		
4ПФ180М	37.0	440	97.6	0.830	825 1060	4500	0.578
	45.0		115.6	0.860			
4ПФ200М	55.0	440	144.0	0.849	1000	4000	0.355
4ПФ200L	75.0	440	1.9	0.873	1060	4000	0.440
4ПФ225М	90.0	440	23.0	0.900	1000	4000	0.600
4ПФ225L	110.0	440	282.0	0.870	1000	4000	0.680
4ПФ250М	132.0	440	336.0	0.870	1000	3500	1.110
4ПФ250L	160.0	440	402.0	0.890	1000	3500	1.210
4ПФ200М	27.0	440	78.0	0.762	500	2500	0.355
	45.0		121.0	0.822	750	3600	
	90.0		226.0	0.886	1500	3600	
4ПФ200L	37.0	440	104.0	0.786	500	2500	0.440
	55.0		147.0	0.833	750	3600	
	110.0		275.0	0.891	1500	3600	
4ПФ225М	45.0	440	125.0	0.790	500	2500	0.600
	132.0		230.0	0.891	1500	3000	
4ПФ225L	50.0	440	142.0	0.776	500	2500	0.680
	75.0		199.0	0.840	750	3000	
	160.0		400.0	0.897	1500	3000	
4ПФ250М	90.0	440	236.0	0.853	750	3000	1.100
	200.0		497.0	0.903	1500		
4ПФ250L	75.0	440	203.0	0.822	500	2500	1.220
	110.0		284.0	0.867	750	3000	
	250.0		614.0	0.910	1500	3000	

Додатки

Таблиця Д.3 - Технічні дані двигунів постійного струму з незалежним збудженням серії
2П з висотою вісі обертання 90 - 200 мм (до центру вала)

Тип двигуна	P_n	U_n	I_n	n_n	n_{max}	η_n	$R_{оя}$	$R_{оп}$	$R_{оз}$	L_y	J_D		
	кВт	В	А	об/хв	об/хв	-	Ом	Ом	Ом	мГн	кг·м ²		
2ПН90М, 2ПН90МГ	0.17	110	3.250	705	3000	0.475	5.840	4.400	610.00	128.00	0.004		
		220	1.590	750	1500	0.485	27.200	16.200	162.00	514.00			
	0.25	110	4.060	1000	4000	0.560	3.990	2.550	610.00	78.70			
		220	1.990	1120	2000	0.570	15.470	11.200	162.00	297.00			
	0.37	110	5.470	1500	3000	0.615	2.520	1.470	610.00	48.00			
		220	2.730	1500	2250	0.615	10.610	6.660	162.00	190.00			
	0.71	110	9.290	2360	4000	0.695	1.000	0.540	470.00	18.00			
		220	4.610	2360	3540	0.700	3.990	2.550	123.00	79.00			
	1.00	110	12.710	3000	4000	0.715	0.600	0.350	365.00	12.00			
		220	6.270	3000	4000	0.725	2.520	1.470	92.00	48.00			
	2ПН90L, 2ПН90ЛГ	0.20	110	3.370	750	3000	0.540	4.510	2.990	555.00		106.00	0.004
			220	1.670	800	1500	0.545	17.500	13.130	145.00		430.00	
0.34		110	5.150	1060	4000	0.600	2.850	1.731	555.00	64.50			
		220	2.580	1000	2000	0.600	12.200	7.960	145.00	264.00			
0.55		110	7.410	1500	4000	0.675	1.300	0.942	432.00	33.00			
		220	3.700	1500	4300	0.675	5.440	3.830	112.00	132.00			
0.90		110	11.210	2000	4000	0.730	0.644	0.400	340.00	14.60			
		220	5.600	2120	4000	0.730	2.850	1.731	87.00	64.00			
1.30		110	15.550	3150	4000	0.760	0.355	0.257	340.00	8.20			
		220	7.580	3150	4000	0.780	1.300	0.932	87.00	33.00			
2ПН90М, 2ПН90МГ		0.13	110	2.390	800	3000	0.495	7.480	4.790	810.00	173.00	0.005	
			220	1.240	750	1500	0.475	34.000	20.370	222.00	694.00		
	0.18	110	3.000	1000	4000	0.545	5.410	3.470	810.00	122.00			
		220	1.470	1000	2000	0.555	21.770	13.310	222.00	490.00			
	0.28	110	4.000	1600	4000	0.635	2.690	1.850	810.00	62.00			
		220	2.000	1500	3000	0.635	11.700	7.350	222.00	267.00			
	0.40	110	5.230	2360	4000	0.695	1.460	0.870	810.00	34.00			
		220	3.110	2220	4000	0.585	6.840	4.400	222.00	147.00			
	0.55	110	7.040	3000	4000	0.710	1.000	0.580	810.00	21.00			
		220	3.520	3000	4000	0.710	3.990	2.550	222.00	82.00			
	2ПБ90L, 2ПБ90ЛГ	0.18	110	3.090	750	3000	0.530	5.440	3.890	720.00	150.00		0.005
			220	1.540	750	1500	0.530	23.550	15.000	192.00	610.00		
0.25		110	3.890	1000	4000	0.585	4.010	2.300	720.00	96.00			
		220	1.850	1120	2000	0.615	13.250	8.650	192.00	360.00			
0.37		110	5.100	1500	4000	0.660	2.100	1.297	720.00	54.00			
		220	2.490	1500	3000	0.675	7.740	5.170	192.00	199.00			
0.53		110	6.700	2200	4000	0.720	1.130	0.687	720.00	28.00			
		220	3.300	2240	4000	0.730	4.260	2.840	192.00	108.00			
0.75		110	8.690	3000	4000	0.785	0.644	0.400	720.00	17.00			
		220	4.430	3150	4000	0.770	2.280	1.609	192.00	63.00			
2ПН100М, 2ПН100МГ		0.37	110	5.600	750	3000	0.600	2.690	1.620	470.00	89.00	0.011	
			220	2.830	750	1500	0.595	11.780	6.700	120.00	343.00		
	0.50	110	6.990	1000	4000	0.650	1.790	0.930	470.00	53.00			
		220	3.440	1000	2000	0.660	7.050	4.620	120.00	222.00			
	0.75	110	9.600	1500	4000	0.710	0.805	0.570	359.00	26.00			
		220	4.770	1500	4300	0.715	3.400	2.050	103.00	104.00			
	1.20	110	14.550	2120	4000	0.750	0.436	0.353	359.00	14.00			
		220	7.130	2200	4000	0.765	1.792	0.930	103.00	53.00			
	2.00	110	23.160	3000	4000	0.785	0.201	0.135	265.00	6.60			
		220	11.500	3000	4000	0.790	0.805	0.570	73.00	26.00			
	2ПН100L, 2ПН100ЛГ	0.42	110	6.310	750	3000	0.605	2.050	1.280	397.00	71.00		0.011
			220	3.100	750	1500	0.615	7.870	6.200	114.00	286.00		

Додатки

2ПН132М, 2ПН132МГ	1.60	110	21.390	750	3000	0.680	0.472	0.308	134.00	9.70	0.038
		220	10.620	750	2500	0.685	1.880	1.390	35.00	38.60	
		440	7.780	1000	2500	0.720	0.271	0.204	134.00	5.70	
	2.50	110	31.570	1000	4000	0.735	1.080	0.763	35.00	22.90	
		220	15.460	1000	3000	0.730	4.540	3.260		91.50	
		440	7.780	1000	2500	0.775	0.140	0.094	134.00	2.80	
	4.00	110	46.920	1500	4000	0.790	0.564	0.336	35.00	11.00	
		220	23.010	1500	4000	0.790	2.280	1.440		42.00	
		440	11.510	1500	3750	0.810	0.067	0.049	111.00	1.40	
	7.00	110	78.560	2200	4000	0.830	0.226	0.166	25.60	4.60	
		220	38.340	2240	4000	0.830	0.906	0.692		18.00	
		440	19.170	2240	4000	0.840	0.140	0.094	111.00	2.80	
10.50	110	56.820	3000	4000	0.850	0.564	0.336	25.60	11.00		
	220	28.070	3000	4000							
	440										
2ПН132Л, 2ПН132МЛ	1.90	110	24.330	750	3000	0.710	0.322	0.270	138.00	7.10	0.048
		220	11.990	750	2500	0.720	1.280	1.000	37.50	28.30	
		440	6.130	750	1850	0.705	6.420	4.450		119.00	
	3.00	110	36.610	950	4000	0.745	0.220	0.196	138.00	4.50	
		220	18.060	1000	4000	0.755	0.880	0.640	37.50	18.10	
		440	8.910	1000	3750	0.765	2.160	2.160		68.00	
	5.50	110	62.500	1500	4000	0.800	0.080	0.066	101.00	1.80	
		220	31.060	1500	4000	0.805	0.322	0.270	27.80	7.00	
		440	15.430	1600	3750	0.810	1.280	1.000		28.00	
	8.50	110	46.000	2200	4000	0.840	0.167	0.124	89.00	3.50	
		220	22.860	2240	4000	0.845	0.670	0.445	25.00	14.00	
		440	11.430	2240	4000	0.860	0.080	0.066	76.00	1.80	
14.00	110	74.000	3150	4000	0.865	0.322	0.270	20.60	7.00		
	220	36.780	3150	4000							
	440										
2ПБ132М, 2ПБ132МГ	1.10	110	15.630	750	3000	0.640	0.364	0.336	202.00	13.00	0.038
		220	7.460	800	2500	0.670	2.440	1.530	54.50	55.00	
		440	3.760	800	1850	0.665	10.450	6.480		227.00	
	1.60	110	20.490	1000	4000	0.710	0.346	0.224	202.00	7.90	
		220	10.320	1000	3000	0.705	1.380	1.000	54.50	12.00	
		440	5.090	1060	2500	0.715	5.920	3.680		132.00	
	2.40	110	28.520	1600	4000	0.765	0.185	0.148	202.00	4.20	
		220	14.170	1600	4000	0.770	0.740	0.486	54.20	16.70	
		440	7.130	1600	3750	0.765	2.850	1.640		62.00	
	3.70	110	42.310	2200	4000	0.795	0.104	0.059	202.00	2.40	
		220	20.760	2360	4000	0.810	0.346	0.224	54.50		
		440	10.450	2120	4000	0.805	1.380	1.000		32.00	
4.50	110	50.510	3150	4000	0.810	0.046	0.029	202.00	1.00		
	220	25.100	3150	4000	0.815	0.185	0.148	54.50	4.20		
	440	12.470	3150	4000	0.820	0.740	0.486		16.70		
2ПБ132Л, 2ПБ132МЛ	1.30	110	16.190	800	3000	0.730	0.412	0.296	216.00	9.80	0.048
		220	8.210	800	2500	0.720	1.980	1.380	50.00	43.00	
		440	4.020	800	1850	0.735	7.050	4.860		163.00	
	1.90	110	22.730	1060	4000	0.760	0.269	0.220	216.00	6.50	
		220	11.290	1060	3000	0.765	1.080	0.915	50.00	26.00	
		440	5.540	1120	2500	0.780	4.050	2.820		99.00	
	3.20	110	35.480	1600	4000	0.820	0.120	0.089	216.00	2.90	
		220	17.630	1600	4000	0.825	0.518	0.323	50.00	11.60	
		440	8.820	1600	3750	0.825	2.020	1.670		46.00	
	4.50	110	48.700	2360	4000	0.840	0.055	0.039	189.00	1.30	
		220	24.350	2200	4000	0.840	0.269	0.220	43.00	6.50	
		440	12.030	2360	4000	0.850	0.880	0.640		21.00	
5.30	110	28.800	3000	4000	0.855	0.167	0.124	216.00	4.00		
	220	14.090	3150	4000	0.855	0.562	0.407	50.00	13.60		
	440										
2ПО132М, 2ПО132МГ	1.30	110	18.040	800	3000	0.655	0.472	0.308	175.00	11.00	0.038
		220	8.890	800	2500	0.665	1.880	1.390	46.50	44.00	

Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1

	1.80	440	4.440	800	1850	0.665	9.100	5.300		205.00	
		110	23.380	1000	4000	0.700	0.346	0.224	175.00	7.90	
		220	12.680	1000	3000	0.645	1.380	1.000	46.50	32.00	
	2.80	110	33.710	1500	4000	0.755	0.140	0.094	175.00	4.20	
		220	16.040	1500	4000	0.765	0.601	0.454	46.50	15.00	
		440	8.260	1500	3750	0.770	2.530	1.580		59.00	
	4.50	110	50.820	2200	4000	0.805	0.067	0.049	175.00	1.60	
		220	25.410	2240	4000	0.810	0.271	0.204	46.50	6.50	
		440	12.630	2240	4000	0.810	1.080	0.763		26.00	
5.50	220	30.120	3000	4000	0.830	0.185	0.148	175.00	4.20		
	440	15.060	3000	4000	0.830	0.740	0.486	46.50	16.70		
2ПО132L, 2ПО132ЛГ	1.60	110	20.490	800	3000	0.710	0.322	0.270	138.00	8.10	0.048
		220	10.240	750	2500	0.710	1.570	1.060	37.40	36.00	
		440	5.160	750	1850	0.705	6.420	44.500		136.00	
	2.20	110	27.030	1000	4000	0.740	0.220	0.196	138.00	5.20	
		220	13.250	1000	3000	0.755	0.880	0.640	37.40	21.00	
		440	6.620	1000	2500	0.755	3.840	2.660		88.00	
	3.40	110	39.130	1500	4000	0.790	0.120	0.089	138.00	2.90	
		220	19.080	1600	4000	0.810	0.412	0.296	37.40	9.80	
		440	9.660	1500	3750	0.800	1.980	1.380		43.00	
	5.30	110	57.700	2200	4000	0.835	0.055	0.039	138.00	1.30	
		220	28.850	2200	4000	0.835	0.220	0.196	37.40	5.20	
		440	14.250	2240	4000	0.845	0.880	0.640		21.00	
	6.70	220	35.410	3000	4000	0.860	0.120	0.089	138.00	2.90	
		440	17.600	3000	4000	0.865	0.518	0.323	37.40	11.60	
2ПФ132М, 2ПФ132МГ	2.00	110	26.740	750	3750	0.680	0.435	0.024	134.00	8.20	0.038
		220	13.570	750	2500	0.670	1.693	1.260	35.00	33.00	
		440	6.360	800	1850	0.715	6.280	3.940		132.00	
	3.00	110	37.110	1060	4000	0.735	0.226	0.166	134.00	4.60	
		220	18.430	1060	300	0.740	0.906	0.692	35.00	18.50	
		440	9.340	1060	2500	0.730	4.060	2.970		74.00	
	4.00	110	46.920	1500	4200	0.775	0.140	0.094	111.00	2.80	
		220	22.590	1500	4200	0.805	0.472	0.308	25.60	9.70	
		440	11.020	1500	3750	0.825	1.880	1.390		38.60	
	6.00	110	65.720	2200	4000	0.830	0.067	0.049	175.00	1.40	
		220	32.660	2360	4000	0.835	0.226	0.166	111.00	1.60	
		440	16.040	2360	4000	0.850	0.906	0.692	25.60	18.50	
	7.50	220	40.110	3000	4000	0.850	0.140	0.094	111.00	2.90	
		440	20.050	3000	4000	0.850	0.546	0.336	25.60	11.00	
2ПФ132L, 2ПФ132ЛГ	2.80	110	38.230	750	3750	0.665	0.265	0.220	89.00	5.70	0.048
		220	19.000	750	2500	0.670	1.080	0.915	25.00	23.00	
		440	9.220	750	1850	0.690	4.050	2.920	76.00	86.00	
	4.20	110	53.030	950	4000	0.720	0.167	0.124	76.00	3.50	
		220	25.160	1000	3000	0.730	0.670	0.445	20.60	14.00	
		440	13.080	1000	2500	0.730	2.800	1.960		55.00	
	5.50	110	63.290	1500	4200	0.790	0.080	0.066	76.00	1.80	
		220	31.060	1600	4200	0.805	0.269	0.220	20.60	5.70	
		440	15.530	1600	3750	0.805	1.080	0.915		23.00	
	7.50	110	82.150	2200	4000	0.830	0.055	0.039	167.00	1.10	
									43.00		
		220	40.830	2120	4000	0.835	0.167	0.124	76.00	3.50	
	11.00	440	19.820	2200	4000	0.860	0.670	0.445	20.60	13.80	
		220	58.480	3000	4000	0.885	0.080	0.066	76.00	1.80	
		440	28.900	3150	4000	0.865	0.322	0.270	20.60	7.10	
2ПН160М, 2ПН160МГ	3.00	110	36.120	750	3000	0.755	0.138	0.135	128.00	5.40	0.083
		220	17.830	750	2500	0.765	0.732	0.485	34.30	20.20	
		440	8.970	750	1850	0.760	3.150	2.210		85.00	
	4.50	110	52.110	950	4000	0.785	0.110	0.078	108.00	3.10	

Додатки

	7.50	220	25.730	1000	3000	0.795	0.411	0.304	26.80	10.50	
		440	12.950	950	2500	0.790	1.780	1.440		48.80	
		110	82.150	1600	4000	0.830	0.037	0.024	82.00	1.00	
	13.00	220	41.070	1500	4000	0.830	0.183	0.135	21.90	5.00	
		440	20.290	1500	3750	0.840	0.732	0.485		20.00	
		220	69.110	2120	4000	0.855	0.081	0.056	61.50	2.20	
	18.00	440	34.160	2360	4000	0.865	0.279	0.175	16.40	7.50	
		220	94.040	3150	4000	0.870	0.037	0.024	53.10	1.00	
		440	46.750	3150	4000	0.875	0.145	0.101	12.60	4.00	
2ПН160L, 2ПН160ЛГ	4.00	110	46.920	750	3000	0.775	0.130	0.102	117.00	4.25	0.100
		220	23.160	800	2500	0.785	0.486	0.389	32.80	14.70	
		440	11.590	800	1850	0.785	2.020	1.800		63.00	
	6.30	110	71.150	1000	4000	0.805	0.069	0.049	86.50	2.20	
		220	35.140	1000	3000	0.815	0.278	0.196	23.60	8.70	
		440	17.460	1060	2500	0.820	0.485	0.842		31.00	
	11.00	220	58.480	1500	4000	0.855	0.096	0.073	65.30	3.10	
		440	29.240	1600	3750	0.885	0.385	0.364	17.70	12.50	
		220	844.08	2300	4000	0.865	0.044	0.031	49.40	1.40	
	16.00	440	41.560	2360	4000	0.875	0.171	0.131	13.40	5.20	
		220	123.97	3150	4000	0.880	0.024	0.017	49.40	0.80	
		440	61.290	3150	4000	0.890	0.096	0.073	13.40	3.00	
2ПБ160М, 2ПБ160МГ	2.10	110	24.790	800	800	0.770	0.235	0.151	177.00	7.10	0.083
		220	12.480	750	750	0.765	0.990	0.720	46.40	31.00	
		440	6.200	800	800	0.770	3.940	2.770		114.00	
	2.50	110	28.230	1000	4000	0.805	0.145	0.101	171.00	4.60	
		220	14.200	1000	3000	0.800	0.590	0.430	46.40	18.00	
		440	7.010	1120	2500	0.810	2.060	1.785		64.00	
	4.20	110	45.730	1500	1500	0.835	0.081	0.056	177.00	2.60	
		220	22.590	1500	1500	0.845	0.326	0.208	46.40	10.00	
		440	11.160	1600	1600	0.855	0.990	0.720	201.00	31.00	
	6.00	220	31.530	2120	2120	0.865	0.145	0.101	177.00	4.50	
		440	15.670	2200	2200	0.870	0.590	0.430	46.40	18.00	
		220	37.750	3000	4000	0.855	0.081	0.056	177.00	2.60	
7.10	440	18.650	3000	4000	0.865	0.326	0.208	46.40	10.20		
	2.50	110	28.950	750	3000	0.785	0.171	0.131	181.00	6.30	0.100
		220	14.290	800	2500	0.795	0.609	0.526	49.40	22.00	
440		7.190	800	2000	0.790	2.710	2.400		95.00		
3.20	110	35.480	1060	4000	0.820	0.096	0.073	181.00	3.60		
	220	17.630	1060	3000	0.825	0.385	0.364	49.40	14.00		
	440	8.760	1060	2500	0.830	1.540	1.380		57.00		
5.30	220	28.180	1500	4000	0.855	0.216	0.175	181.00	8.00		
	440	13.930	1500	3750	0.865	0.816	0.600	49.40	29.00		
	220	38.740	2240	4000	0.880	0.096	0.073	181.00	3.60		
7.50	440	19.370	2240	4000	0.880	0.385	0.364	49.40	14.00		
	220	42.560	3350	4000	0.865	0.044	0.031	181.00	1.60		
	440	20.920	3000	4000	0.880	0.216	0.175	49.40	8.00		
2ПО160М, 2ПО160МГ	2.50	110	30.300	750	3000	0.750	0.235	0.151	148.00	7.10	0.083
		220	14.850	750	2500	0.650	0.836	0.647	40.70	26.00	
		440	7.330	800	1850	0.775	3.150	2.210		97.00	
	3.20	110	36.140	1120	4000	0.805	0.110	0.078	148.00	3.50	
		220	18.300	1000	3000	0.795	0.516	0.407	40.70	16.00	
		440	8.980	1120	2500	0.810	1.780	1.440		56.00	
	6.00	220	32.280	1600	4000	0.845	0.235	0.151	148.00	7.10	
		440	16.140	1500	3750	0.845	0.990	0.720	40.70	31.00	
		220	84.570	2240	4000	0.860	0.037	0.024	201.00	1.10	
8.00	110						53.00				

Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1

	9.50	220 440 110	42.040 21.020 100.420	2240 2200 3000	4000 4000 4000	0.865 0.865 0.860	0.145 0.510 0.020	0.101 0.407 0.018	148.00 40.70 201.00	4.60 16.00 0.64	
		220 24 540	49.350 3000	3000 4000	4000 4000	0.875 0 880	0.081 0 278	0.056 0.175	148.00 40.70	2.60 8.60	
2ПО160L, 2ПО160ЛГ	3.20	110	37.300	750	3000	0.780	0.130	0.120	117.00	4.90	0.100
		220	18.410	750	2500	0.790	0.525	0.414	32.80	19.00	
		440	9.260	750	1850	0.785	2.270	1.870		78.00	
	4.00	110	45.170	950	4000	0.805	0.096	0.073	130.00	3.60	
									32.70		
		220	22.170	1000	3000	0.820	0.328	0.227	117.00	12.00	
	7.10	440	11.090	1000	2500	0.820	1.310	1.400	32.80	48.00	
		110	75.940	1500	4000	0.850	0.044	0.031	130.00	1.60	
		220	37.750	1500	4000	0.855	0.171	0.131	32.70	6.30	
	10.00	440	18.760	1500	3750	0.860	0.609	0.526	117.00	22.00	
									32.80		
		220	51.360	2360	4000	0.885	0.069	0.049	117.00	2.50	
12.00	440	25.680	2120	4000	0.885	0.328	0.227	32.80	12.00		
	220	61.290	3000	4000	0.890	0.044	0.031	117.00	1.60		
	440	30.470	3000	4000	0.895	0.171	0.131	32.80	6.30		
2ПФ160M, 2ПФ160МГ	4.20	110	51.250	800	3750	0.745	0.110	0.080	53.10	3.10	0.100
		220	26.150	750	2500	0.730	0.516	0.407	12.60	14.00	
		440	13.080	750	1850	0.730	2.060	1.785		56 00	
	6.00	110	69.930	1000	4000	0.780	0.081	0.056	82.00	202.00	
		220	34.520	1000	3000	0.790	0.326	0.208	21.90	9.00	
		440	17.260	1000	2500	0.790	1.304	1.050		46 00	
	7.50	220	41.070	1500	4200	0.830	0.145	0.101	53.10	4.00	
		440	20.410	1600	3750	0.835	0.516	0.407	12.60	14.00	
		220	67.920	2240	4000	0.870	0.081	0.056	82.00	2.20	
	13.00								21 90		
		440	33.960	2240	4000	0.870	0.278	0.175	53.10	7.50	
									12.60		
16.00	220	83.590	3150	4000	0.870	0.037	0.024	53.10	0.99		
	440	41.320	3150	4000	0.880	0.145	0.101	12.60	4.00		
2ПФ160L, 2ПФ160ЛГ	5.60	110	66.990	750	3750	0.760	0.096	0.073	65.30	3.10	0.100
									17.10		
		220	32.840	800	2500	0.755	0.328	0.227	49.40	10.50	
	8.00	440	16.640	800	1850	0.765	1.310	1.450	13.40	42.00	
		220	45.450	1000	3000	0.800	0.216	0.175	49.40	7.00	
		440	22.450	1060	2500	0.810	0.816	0.600	13.40	25.00	
	11.00	110	119.040	1500	4200	0.840	0.024	0.017	49.40	0.78	
		220	59.170	1500	4200	0.845	0.096	0.073	13.40	3.10	
		440	29.599	1500	3750	0.845	0.385	0.364		12.50	
	16.00	220	83.590	2360	4000	0.870	0.044	0.031	49.40	1.40	
		440	41.090	2360	4000	0.885	0.171	0.131	13.40	5.60	
		220	96.100	3150	4000	0.885	0.096	0.073	13.40	3.10	
	5.60	110	64.850	750	3000	0.785	0.084	0.056	74.80	2.73	0.200
	8.00	110	89.240	1000	3500	0.815	0.058	0.037	98.00	1.90	
		220	43.810	1060	3000	0.830	0.181	0.122	74.80	6.10	
	15.00	110	159.490	1500	3500	0.855	-	-	-	-	
		220	79.740	1500	4000	0.855	0.084	0.056	55.50	2.70	
		440	39.640	1500	3500	0.860	0.338	0.221	15.00	11.00	
	26.00	220	134.000	2240	3500	0.880	0.038	0.025	49.20	1.20	
		440	66.390	2240	3500	0.890	0.150	0.092	12.80	4.90	
		220	197.91	3000	3500	0.895	0.022	0.015	55.50	0.68	
37.00								12.80			

Додатки

		440	93.960	3150	3500	0.795	0.084	0.056	64.00 12.80	2.70			
2ПН180L, 2ПН180ЛГ	7.10	110	80.680	750	3000	0.800	0.065	0.044	64.00	2.25	0.230		
		220	40.090	750	2500	0.805	0.260	0.183	17.30	9.00			
			440.00	20	750	0.825	0.825	1.060	0.67	36.00			
	10.00	110	110.19	1000	3500	0.825	0.042	0.030	72.50	1.40			
		220	55.100	1000	3000	0.825	0.168	0.110	20.10	5.60			
		440	27.220	1000	2500	0.835	0.585	0.482	64.00 17.00	20.00			
	18.50	220	96.660	1500	3500	0.870	0.065	0.044	64.00	2.20			
		440	48.050	1600	3500	0.875	0.260	0.183	17.00	9.00			
	30.00	440	76.610	2200	3500	0.890	0.136	0.084	46.70	4.40			
									13.00				
42.00	440	105.47	3000	3500	0.905	0.065	0.044	46.70	2.20				
								13.00					
2ПБ180М, 2ПБ180МГ	3.40	110	38.400	800	3000	0.805	0.121	0.071	150.00	4.20	0.200		
		220	19.080	800	2500	0.810	0.486	0.296	40.90	17.00			
		440	9.480	800	1850	0.815	1.950	1.170		68.00			
	4.50	110	49.590	1000	3500	0.825	0.084	0.056	177.00	3.10			
		220	24.500	1000	3000	0.835	0.338	0.221	49.20	12.50			
		440	12.180	950	2500	0.840	1.500	0.825		54.00			
	7.10	110	75.050	1500	3500	0.860	0.038	0.025	177.00	1.40			
		220	37.310	1500	3500	0.865	0.150	0.092	49.20	5.50			
		440	18.760	1500	3500	0.860	0.688	0.482		25.00			
	9.50	110	99.270	2120	3500	0.870	0.022	0.015	197.00	0.78			
		220	49.070	2200	3500	0.880	0.084	0.056	49.20	3.10			
		440	24.400	2200	3500	0.885	0.338	0.221		12.00			
	12.00	220	62.240	3350	3500	0.875	0.038	0.025	197.00	1.40			
		440	30.820	3000	3500	0.885	0.181	0.122	49.20	7.00			
2ПБ180L, 2ПБ180ЛГ	4.20	110	47.14	750	3000	0.81	0.094	0.067	131.00	3.7	0.23		
		220	23.42	750	2500	0.815	0.375	0.263	34.7	15.00			
		440	11.64	750	1850	0.82	1.69	0.981		64.00			
	5.6	110	60.97	1000	3500	0.835	0.065	0.044	152.00	2.60			
		220	30.30	1000	3500	0.84	0.26	0.183	40.2	10.20			
		440	15.06	1000	3500	0.845	0.99	0.644	131.00 34.00	37.00			
	8.5	110	89.33	1600	3500	0.865	0.025	0.018	131.00	0.92			
		220	44.16	1600	3500	0.875	0.094	0.067	34.7	3.7			
		440	22.08	1500	3500	0.875	0.44	0.26		17.00			
	11.0	220	56.18	2200	3500	0.89	0.065	0.044	174.00	2.6			
		440	27.93	2200	3500	0.895	26.000	0.183	40.2	10.2			
	2ПО180М, 2ПО180МГ	4.50	110	51.780	750	3000	0.79	0.121	0.071	114.00		4.20	0.200
			220	25.730	750	2500	0.795	0.486	0.292	34.70		17.00	
			440	12.780	750	1850	0.8	1.950	1.170			68.00	
6.30		110	69.840	1000	3500	0.82	0.058	0.037	85.9	2.2			
		220	34.710	1000	3000	0.825	0.232	0.154	23.1	8.7			
		440	17.90	1060	2500	0.835	0.902	0.54		31.00			
10.0		110	106.33	1500	3500	0.855	0.038	0.025	150.00	1.4			
		220	52.55	1500	3500	0.865	0.121	0.071	23.1	4.2			
		440	25.68	1500	3500	0.885	0.486	0.296		17.00			
14.0		220	71.50	2120	3500	0.89	0.058	0.037	98.00	2.2			
		440	35.75	2120	3500	0.89	0.232	0.154	23.1	8.7			
17.0		220	86.82	3000	3500	0.89	0.038	0.025	132.00	1.4			
		440	42.93	3000	3500	0.9	0.015	0.092	35.00	5.6			
2ПО180L, 2ПО180ЛГ		5.2	110	58.72	800	3000	0.805	0.065	0.044	72.5	2.6	0.2	
			220	29.00	800	2500	0.815	0.26	0.183	20.1	10.3		

Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1

	7.5	440	14.41	800	1850	0.82	1.06	0.67		4.1	
		110	82.15	1000	3500	0.83	0.042	0.03	72.5	1.6	
		220	40.58	1000	3000	0.84	0.168	0.11	20.1	6.6	
		440	20.17	1120	2500	0.845	0.585	0.462		23.00	
	16.00	220	81.17	2120	3500	0.89	0.042	0.03	72.5	1.6	
		440	40.53	2120	3500	0.895	0.168	0.11	20.1	6.6	
	20.00	220	101.01	3000	3500	0.9	0.025	0.018	98.5	0.92	
		440	49.95	3150	3500	0.91	0.094	0.067	26.6	3.7	
2ПФ180М, 2ПФ180МГ	9.00	110	106.260	800	3300	0.770	0.058	0.370	41.00 11.00	1.90	0.200
		220	53.480	750	2500	0.765	0.286	0.206	49.20	22.00	
		440	26.290	750	1850	0.775	1.150	0.720	12.80	37.00	
	12.00	110	134.680	1060	3500	0.810	0.038	0.025	49.20	22.00	
		220	66.520	1060	3300	0.820	0.150	0.092	12.80	4.90	
		440	33.670	1000	2500	0.810	0.688	0.482		22.00	
	15.00	110	162.340	1500	3500	0.840	0.220	0.015	49.20	0.68	
		220	79.740	1500	3500	0.855	0.084	0.065	12.81	2.70	
		440	39.870	1500	3500	0.855	0.338	0.221		10.90	
	26.00	220	132.790	3150	3500	0.890	0.220	0.015	49.20	0.68	
		440	66.020	3150	3500	0.895	0.084	0.056	12.80	2.70	
2ПФ180L, 2ПФ180L	10.00	110	117.300	750	3300	0.775	0.068	0.044	72.00 20.00	2.20	0.230
		220	57.540	750	2500	0.790	0.203	0.145	46.70	7.30	
		440	20.140	750	1850	0.780	0.990	0.644	13.00	32.00	
	14.00	220	77.610	1000	3300	0.820	0.136	0.084	46.00 13.00	4.40	
		440	38.340	1000	2500	0.830	0.585	0.462	72.00 20.00	20.00	
	18.50	220	96.660	1500	3500	0.870	0.065	0.044	46.70	2.20	
		440	48.330	1500	3500	0.870	0.260	0.183	13.00	9.00	
	25.00	220	127.680	2120	3500	0.890	0.042	0.030	86.00 23.00	0.81	
		440	63.480	2200	3500	0.895	0.136	0.084	46.00 13.00	4.40	
	32.00	440	8.360	3150	3500	0.905	0.065	0.044	46.70 13.00	2.20	
2ПН200М, 2ПН200МГ	8.50	110	95.400	800	3000	0.810	0.047	0.029	61.60	1.59	0.250
		220	47.120	800	2500	0.820	0.188	0.116	17.10	6.40	
		440	23.560	800	1850	0.820	0.796	0.506		25.50	
	13.00	110	140.690	1120	3500	0.840	0.026	0.016	61.60	0.90	
		220	69.520	1120	3000	0.850	0.106	0.610	17.10	3.60	
		440	34.970	1000	2500	0.845	0.485	0.303		16.80	
	22.00	220	114.290	1500	3500	0.875	0.047	0.029	53.00 15.00	1.60	
		440	57.140	1500	3500	0.875	0.246	0.130	61.00 17.00	8.10	
	36.00	220	185.00	2200	3500	0.885	0.026	0.016	46.00	0.90	
		440	91.420	2200	3500	0.895	0.106	0.061	13.10	3.60	
	60.00	440	150.68	3150	3500	0.905	0.047	0.029	35.00 8.80	1.6	
2ПН200L, 2ПН200LГ	11.00	110	120.48	800	3000	0.83	0.031	0.02	55.00	1.16	0.3
		220	59.52	800	2500	0.84	0.125	0.08	15.90	4.6	
		440	29.94	750	1850	0.845	0.565	0.393		21.8	
	16.00	220	84.57	1000	3000	0.86	0.083	0.053	55.00	3.2	
		440	42.28	1000	2500	0.86	0.343	0.224	15.90	12.9	
	30.00	220	153.39	1500	3500	0.889	0.031	0.02	42.00	1.15	
		440	76.18	1600	3500	0.895	0.185	0.08	10.60	4.6	

Додатки

	53.00	440	133.10	2360	3500	0.905	0.055	0.037	31.7	2.1	
	75.00	440	186.29	3150	3500	0.915	0.031	0.02	31.7	1.2	
2ПБ200L, 2ПБ200LG	6.00	110	65.32	800	3000	0.835	0.055	0.037	137.00	2.4	0,3
		220	32.28	800	2500	0.845	0.22	0.15	37.10	9.4	
		440	16.14	800	1850	0.845	0.925	0.652		38.00	
	8.00	220	41.56	950	3000	0.87	0.125	0.08	137.00	5.3	
		440	20.90	1060	2500	0.875	0.565	0.393	37.10	25.00	
	11.00	220	56.50	1500	3500	0.885	0.083	0.053	180.00	3.7	
									42.00		
		440	28.0	1500	3500	0.89	0.268	0.168	137.00	12.00	
15.00	220	76.18	2360	3500	0.895	0.031	0.02	137.00	1.3		
	440	37.88	2360	3500	0.90	0.125	0.08	37.10	5.3		
2ПН200М, 2ПН200MG	6.00	110	66.93	750	3000	0.815	0.071	0.041	96.00	2.8	0.25
		220	32.66	750	2500	0.835	0.294	0.1	26.60	11.00	
		440	15.86	750	1850	0.86	1.09	0.594		41.00	
	9.00	220	47.57	1060	3000	0.86	0.143	0.073	96.00	5.6	
		440	23.78	1060	2500	0.86	0.57	0.325	26.60	22.00	
	14.00	220	72.31	1500	3500	0.88	0.071	0.041	96.00	2.8	
		440	36.16	1500	3500	0.88	0.294	0.172	26.60	11.00	
		20.00	220	101.57	2300	3500	0.895	0.026	0.016	74.00	
	440	50.50	2200	3500	0.90	0.143	0.073	8.00			
								96.00	2.6		
								26.00			
2ПФ200L, 2ПФ200LG	7.1	110	78.24	750	3000	0.825	0.055	0.037	102.00	2.4	0.3
		220	38.65	750	2500	0.835	0.22	0.15	23.70	9.4	
		440	19.32	750	1850	0.835	0.925	0.652		36.00	
	11.00	220	57.80	1000	3000	0.865	0.125	0.08	102.00	5.3	
		440	28.74	1000	2500	0.87	0.5	0.264	23.70	21.00	
	17.00	220	86.82	1500	3500	0.89	0.055	0.037	102.00	2.4	
		440	43.41	1500	3500	0.89	0.22	0.15	23.70	9.4	
		24.00	220	121.21	2360	3500	0.90	0.031	0.037	102.00	
	440	60.27	2120	3500	0.905	0.125	0.15	2.70	5.3		
2ПФ200М, 2ПФ200MG	22.00	220	114.29	1600	3500	0.875	0.047	0.029	46.00	1.6	0.250
		440	56.82	1600	3500	0.88	0.188	0.116	13.10	6.4	
	30.00	440	75.75	2200	3500	0.90	0.106	0.061	46.00	3.6	
									13.10		
40.00	440	100.450	3000	3500	0.905	0.071	0.041	96.00	2.50		
								22.80			
2ПФ200L, 2ПФ200LG	15.00	110	166.300	750	3300	0.820	0.031	0.020	42.00	1.20	0.300
		220	82.640	750	2500	0.825	0.125	0.080	10.60	4.60	
		440	40.830	800	1850	0.835	0.500	0.264		18.60	
	20.00	220	106.330	1000	3300	0.855	0.083	0.053	55.00	3.20	
		440	53.160	100	2500	0.855	0.286	0.163	15.00		
								31.00	10.00		
	30.00	220	154.080	1500	3500	0.885	0.031	0.020	7.00		
		440	77.040	1500	3500	0.885	0.125	0.080	31.70	1.20	
440		105.470	2360	3500	0.905	0.055	0.037	31.70	4.60		
42.00	440	137.360	3150	3500	0.910	0.031	0.020	31.70	i 10		
55.00	440							31.70	1.20		

Примітки:

1. Опори обмоток збудження наведені для кожного типорозміру: зверху при номінальній напрузі 220 В, внизу – 110 В;
2. Значення індуктивності кола якоря подано при номінальному потоці;
3. Опір обмоток – при 15°C.

Таблиця Д.4 - Технічні дані двигунів постійного струму з незалежним збудженням серії 2П з висотою осі обертання 225 - 315 мм (до центру вала)

Тип двигуна	P_n	U_n	I_n	n_n	n_{max}	η_n	$R_{оя}$	$R_{дп}$	$R_{оз}$	$L_я$	J_D	
	кВт	В	А	об/хв	об/хв	-	Ом	Ом	Ом	мГн	кг·м ²	
2ПН225М, 2ПН225МГ	7.5	220	44.3	1500	1800	0.770	0.330	0.1010	82.4	-	0.534	
	11.0	220	62.9	600	2100	0.795	0.202	0.0678	62.3	-		
	15.0	220	84.7	750	2500	0.805	0.146	0.0637	62.3	-		
	22.0	220	15.0	1000	2500	0.820	0.086	0.0429	62.6	-		
	37.0	220	194.4	1500	3000	0.865	0.037	0.0159	45.8	-		
		440	97.2	1500	1850	0.865	0.168	0.0679	43.0	-		
2ПН225Л, 2ПН225ЛГ	15.0	220	86.3	600	2100	0.790	0.160	0.0742	52.3	-	0.600	
	18.5	220	101.3	750	2500	0.830	0.095	0.0500	52.3	-		
		440	50.7	750	1500	0.830	0.473	0.2080	49.7	-		
	30.0	220	161.4	1060	2500	0.845	0.049	0.0197	38.6	-		
		440	80.7	1060	2250	0.845	0.196	0.0700	38.6	-		
	45.0	220	233.8	1500	3000	0.875	0.237	0.0125	38.6	-		
2ПФ225М, 2ПФ225МГ	10.0	220	61.0	500	1800	0.745	0.350	0.1010	62.3	-	0.460	
	15.0	220	85.8	600	2100	0.795	0.178	0.0678	43.0	-		0.470
	18.5	220	103.8	750	2500	0.810	0.146	0.0637	62.3	-		
	22.0	220	121.2	1000	2500	0.825	0.086	0.0430	62.6	-		
		340	78.4	1000	2500	0.825	0.178	0.0670	43.0	-		
		440	66.0	1000	1000	0.825	0.353	0.1 ПО	43.0	-		
	37.0	220	193.3	1500	3000	0.870	0.037	0.0159	43.0	-		
		340	125.1	1500	2000	0.870	0.087	0.0430	43.0	-		
	440	96.7	1500	2700	0.870	0.148	0.0640	43.0	-			
2ПФ225Л, 2ПФ225ЛГ	15.0	220	88.0	500	1800	0.775	0.196	0.0790	39.5	-	0.570	
	18.5	220	101.3	600	2100	0.830	0.161	0.0740	52.3	-		0.580
		440	50.7	750	1500	0.830	0.473	0.2080	49.1	-		
	22.0	220	120.2	750	2500	0.832	0.095	0.0500	52.3	-		
	30.0	220	160.4	1060	2500	0.850	0.049	0.0200	39.6	-		
		440	80.2	1060	2250	0.850	0.196	0.0800	39.6	-		
2ПН250М, 2ПН250МГ	15.0	220	85.2	530	1500	0.800	0.142	0.0780	37.9	-	1.067	
	18.0	220	101.6	630	2100	0.805	0.110	0.0540	37.9	-		
		440	50.8	600	1800	0.805	0.570	0.2500	37.9	-		
	22.0	220	123.5	750	2000	0.810	0.074	0.0390	37.9	-		
		440	61.7	850	2400	0.810	0.235	0.0960	28.7	-		
	37.0	220	197.7	1060	2500	0.850	0.035	0.0190	28.7	-		
		440	98.9	1060	2500	0.850	0.152	0.0780	28.7	-		
	50.0	440	130.6	1500	1800	0.870	0.110	0.0540	29.8	-		
	55.0	220	287.4	1500	2800	0.870	0.019	0.0098	26.8	-		
	440	143.7	1700	2800	0.870	0.059	0.0260	20.2	-			
2ПН250Л, 2ПН250ЛГ	22.0	220	122.0	600	2100	0.820	0.082	0.0470	34.4	-	1.310	
		340	78.9	630	2100	0.820	0.158	0.0930	34.4	-		
		440	61.0	600	1800	0.820	0.380	0.1900	34.4	-		
	28.0	440	76.7	750	1900	0.830	0.260	0.1100	34.4	-	1.310	
	30.0	220	162.3	750	2000	0.840	0.051	0.0310	34.4	-		
	45.0	220	239.2	1000	2500	0.855	0.030	0.0160	25.1	-		
		440	119.6	1000	1500	0.855	0.122	0.0640	33.4	-		
	71.0	440	182.3	1500	2800	0.855	0.065	0.0310	31.2	-		
	75.0	220	383.0	1500	2800	0.900	0.013	0.0077	23.5	-		
2ПФ250М, 2ПФ250МГ	18.5	220	110.7	MX)	1500	0.760	0.142	0.0780	37.9	-	0.970	
	22.0	220	125.0	600	2100	0.800	0.110	0.0540	37.9	-		1.220
		440	62.5	600	1800	0.800	0.568	0.2520	38.0	-		
	30.0	220	160.4	750	2000	0.810	0.074	0.0390	37.9	-		
	440	84.2	850	2100	0.810	0.235	0.0630	26.8	-			

Додатки

	37.0	220	197.9	1060	2500	0.850	0.035	0.0190	28.7	-	
		440	98.9	1060	2500	0.850	0.152	0.0780	28.7	-	
	50.0	440	130.6	1500	1800	0.870	0.110	0.0540	29.8	-	
	55.0	220	287.4	1500	2800	0.870	0.018	0.0098	26.8	-	
		440	143.7	1700	2800	0.870	0.590	0.0260	20.2	-	
2ПФ250L, 2ПФ250ЛГ	22.0	220	128.2	500	1500	0.780	0.122	0.0640	33.4	-	1.220
	26.5	440	73.9	600	1800	0.815	0.380	0.1950	34.7	-	
	28.0	220	154.8	600	2100	0.822	0.082	0.0470	33.4	-	
	30.0	220	161.8	750	1500	0.843	0.050	0.0310	33.4	-	
		440	80.9	750	2000	0.843	0.261	0.1150	33.4	-	
	37.0	220	199.5	750	2000	0.832	0.051	0.0310	33.4	-	
		440	99.8	750	2000	0.832	0.122	0.0640	25.1	-	
	45.0	220	237.8	1000	2500	0.860	0.030	0.0160	25.1	-	1.220
		340	153.9	1180	2500	0.860	0.065	0.0310	33.4	-	
		440	118.9	1000	1500	0.860	0.122	0.0640	33.4	-	
	71.0	440	182.3	1500	2800	0.885	0.065	0.0310	31.2	-	
	75.0	220	380.9	1500	2800	0.895	0.013	0.0077 0	23.5	-	
	2ПН280М, 2ПН280МГ	22.0	220	120.5	530	1250	0.830	0.062	0.0330	39.6	-
30.0		220	161.4	600	1500	0.845	0.046	0.0220	23.0	-	2.210
		440	807	600	1500	0.845	0.185	0.081	30.0	-	
45.0		220	237.8	750	2000	0.860	0.034	0.0150	28.0	-	
		440	118.2	750	1200	0.865	0.137	0.0618	30.0	-	
75 0		220	385.2	1000	2250	0.885	0.016	0.0083	22.8	-	
		440	192.6	1180	2400	0.885	0.046	0.0220	25.0	-	
90.0		440	229.8	1500	1500	0.890	-	-	-	-	
110.0		220	558.7	1500	2600	0.895	0.008	0.0038	22.8	-	
	440	279.3	1500	2250	0.895	0.034	0.0154	30.0	-		
2ПН280L, 2ПН280ЛГ	30.0	220	136.3	500	1250	0.835	0.050	0.0250	26.7	-	2.340
		440	81.7	500	1250	0.835	0.200	0.0920	26.7	-	
	37.0	220	195.6	600	1500	0.860	0.037	0.0170	25.2	-	
		440	97.8	600	1500	0.860	0.147	0.0690	26.6	-	
	55.0	220	285.7	750	2000	0.875	0.025	0.0120	25.2	-	
	85.0	440	218.5	1000	2250	0.884	0.050	0.0250	19.7	-	
	90.0	220	462.3	1060	2000	0.884	0.012	0.0053	19.7	-	
	132.0	220	662.3	1500	2600	0.906	0.006	0.0034	25.2	-	
		440	331.1	1500	1900	0.906	0.025	0.0120	25.2	-	
2ПФ280М, 2ПФ280МГ	30.0	220	161.5	500	1200	0.845	0.062	0.0330	29.0	-	2.120 2.130
	37.0	220	199.0	600	1500	0.845	0.046	0.0220	29.0	-	
		440	99.5	600	1500	0.845	0.185	0.0820	24.0	-	
	45.0	220	235.1	750	2000	0.870	0.034	0.0150	28.0	-	
		440	117.6	750	1200	0.870	0.136	0.0620	30.0	-	
	75.0	220	685.1	1000	2250	0.885	0.016	0.0083	22.8	-	
		440	192.6	1180	2250	0.885	0.046	0.0220	24.1	-	
	110.0	220	561.8	1500	2600	0.890	0.008	0.0038	22.8	-	
		440	280.9	1500	2250	0.890	0.034	0.0150	30.0	-	
2ПФ280L, 2ПФ280ЛГ	37.0	220	202.1	500	1250	0.832	0.050	0.0250	26.7	-	2.300
		440	101.1	500	1250	0.832	0.200	0.0920	19.7	-	
	45.0	220	239.2	600	1500	0.855	0.037	0.0170	25.2	-	
		440	119.6	600	1200	0.855	0.150	0.0600	19.7	-	
	55.0	220	285.7	750	1900	0.855	0.025	0.0120	25.2	-	
		440	142.9	750	1000	0.855	0.099	0.0520	26.7	-	
	85.0	440	217.8	1000	2250	0.887	0.050	0.0250	19.7	-	
	132.0	220	659.3	1500	2600	0.910	0.006	0.0340	25.2	-	
	440	329.7	1500	1900	0.910	0.025	0.0120	25.2	-		
2ПН315М,	45.0	220	239.2	600	1500	0.855	0.030	0.0140	34.1	-	4.530

Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1

2ПН315МГ	55.0	400	119.6	600	1500	0.885	0.120	0.0580	25.6	-	
	100.0	440	143.7	750	1800	0.870	0.068	0.0280	18.8	-	
	110.0	440	258.3	1000	2250	0.880	0.040	0.0240	25.6	-	
	160.0	220	561.8	1000	2250	0.890	0.008	0.0450	18.8	-	
		440	808.1	1500	2400	0.900	0.004	0.0025	25.6	-	
		440	404.0	1900	2400	0.900	0.012	0.0071	25.6	-	
2ПН315L, 2ПН315ЛГ	45.0	220	235.4	500	1250	0.869	0.032	0.0160	28.6	-	4.530
		440	117.7	500	1250	0.869	0.128	0.0650	21.0	-	
	55.0	220	284.1	600	1500	0.880	0.022	0.0120	27.9	-	
		440	142.0	630	1500	0.880	0.074	0.0320	14.8	-	
	75.0	220	387.4	750	1800	0.880	0.013	0.0081	21.1	-	
		440	193.7	800	1800	0.880	0.044	0.0270	15.5	-	
	118.0	440	301.3	1000	2000	0.890	0.032	0.0160	21.0	-	
	132.0	220	666.7	1060	2200	0.900	0.006	0.0043	21.1	-	
200.0	220	999.0	1500	2400	0.910	0.003	0.0017	21.0	-		
	440	499.0	1500	2400	0.910	0.013	0.0081	14.8	-		
2ПФ315М, 2ПФ315МГ	45.0	440	118.9	500	1250	0.860	0.162	0.0730	25.0	-	4.090 4.100
	55.0	220	287.4	600	1500	0.870	0.029	0.0040	34.0	-	
		440	143.7	600	1500	0.870	0.120	0.0570	25.6	-	
	75.0	220	385.2	750	1700	0.885	0.014	0.0083	18.8	-	
		440	192.6	750	1800	0.885	0.068	0.0280	18.8	-	
	100.0	440	258.3	1000	2200	0.880	0.040	0.0240	25.6	-	
	110.0	220	561.8	1000	2250	0.850	0.008	0.0045	18.8	-	
	160.0	220	808.1	1500	2400	0.900	0.004	0.0025	25.6	-	
	440	404.1	1900	2400	0.900	0.012	0.0071	25.6	-		
2ПФ315L, 2ПФ315ЛГ	55.0	220	290.7	500	1250	0.860	0.032	0.0160	28.6	-	4.440
		440	145.3	500	1250	0.860	0.128	0.6500	21	-	
	75.0	220	389.6	630	1500	0.875	0.015	0.0094	15.5	-	
		440	194.8	630	1500	0.875	0.074	0.0320	15.5	-	
	90.0	220	464.9	750	1800	0.880	0.013	0.0081	21.0	-	
		440	232.4	750	1800	0.880	0.043	0.0270	15.5	-	
	118.0	440	301.3	1000	2000	0.890	0.032	0.0160	21.0	-	
	220.0	220	1098.9	1500	2400	0.910	0.003	0.0017	21.0	-	
	400	549.5	1500	2000	0.910	0.013	0.0810	14.3	-		

Примітки:

1. Опори обмотки збудження наведені для кожного типорозміру: зверху при номінальній напрузі збудження 220 В. При номінальній напрузі збудження 110 В значення опору обмотки буде в чотири рази менше.

2. Опір обмоток дається при 15°С

Таблиця Д.5 - Технічні дані двигунів постійного струму з незалежним збудженням серії П, тривалого режиму роботи, захищені, $U_H=110$ В

Тип	P_H	n_H	I_H	$R_{яд}$	N	2а	2р	$w_{пар}$	$R_{оз}$	$I_{зн}$	$\Phi_{пол}$	$n_{макс}$	J_d
	кВт	об/хв	А	Ом	вит	-	-	вит	Ом	А	мВб	об/хв	кг*м ²
П11	0.13	1000	2.00	11.2500	-	2	2	-	-	-	-	2000	0.0041
	0.30	1500	4.20	4.9400	1652	2	2	2700	200	0.257	1.85	3000	
	0.70	3000	8.70	1.2600	840	2	2	2100	176	0.446	2.12	3450	
П12	0.20	1000	2.75	6.1400	1680	2	2	2100	208	0.362	2.77	2000	0.0037
	0.45	1500	5.80	2.9200	1148	2	2	2100	208	0.362	2.77	3000	
	1.00	3000	11.90	0.8580	616	2	2	1850	158	0.497	3	3450	
П21	0.20	750	2.80	6.6500	-	2	2	-	-	-	-	1500	0.0105
	0.30	1000	3.80	3.5900	1692	2	2	2400	146	0.538	3.02	2000	
	0.70	1500	8.50	1.9800	1224	2	2	2400	148	0.530	3.01	3000	
	1.50	3000	18.00	0.4760	612	2	2	2000	104	0.703	3.1	3450	

Додатки

П22	0.30	750	3.90	3.4300	1620	2	2	2400	175	0.449	3.75	1500	0.0130
	0.45	1000	5.55	2.2400	1224	2	2	2400	175	0.449	3.75	2000	
	1.00	1500	12.00	1.6300	862	2	2	2400	175	0.449	3.75	3000	
	2.20	3000	25.00	0.2490	432	2	2	2050	127	0.619	4.1	3000	
П31	0.45	750	5.60	2.2300	1404	2	2	5000	200	0.393	5.2	1500	0.0225
	0.70	1000	8.60	1.5200	1116	2	2	4600	130	0.604	5.3	2000	
	1.50	1500	17.40	0.6420	720	2	2	4600	109	0.721	5.1	3000	
	3.20	3000	35.00	0.1620	360	2	2	3600	77	1.048	5.7	3000	
П32	0.70	750	8.3	1.4500	936	2	2	2600	155	0.507	7.6	1500	0.0290
	1.00	1000	11.00	0.8140	720	2	2	2100	120	0.665	7.7	2000	
	2.20	1500	24.00	0.390	468	2	2	1800	90	0.875	7.9	3000	
	4.50	3000	35.00	0.0980	252	2	2	1550	85	1.209	8.1	3000	
П41	1.00	750	13.00	1.2430	1026	2	4	1200	92	0.854	3.5	1500	0.0388
	1.50	1000	18.20	0.6810	756	2	4	1000	82	1.267	3.7	2000	
	3.20	1500	37.00	0.2630	486	2	4	900	52	1.510	3.8	3000	
	6.00	3000	68.50	0.1010	270	2	4	1200	92	0.854	3.8	3000	
П42	1.50	750	18.80	0.7290	702	2	4	950	62	1.267	5.1	1500	0.0450
	2.20	1000	26.00	0.4380	540	2	4	950	62	1.267	5.1	2000	
	4.50	1500	51.00	0.2630	378	2	4	1000	73.2	1.073	4.6	3000	
	8.00	3000	87.00	0.0760	216	2	4	1000	73.2	1.073	4.6	3000	
П51	2.20	750	27.00	0.4790	582	2	4	900	45.2	1.738	5.7	1500	0.0875
	3.20	1000	37.30	0.2490	496	2	4	900	45.2	1.738	5.7	2000	
	6.00	1500	65.50	0.1170	310	2	4	800	36	2.183	5.8	3000	
П52	3.20	750	37.30	0.2760	496	2	4	800	46	1.708	7.4	1500	0.1000
	4.50	1000	50.50	0.1130	372	2	4	800	46	1.708	7.4	2000	
	8.00	1500	86.00	0.0680	248	2	4	750	35	2.245	8	3000	
П61	4.50	750	38.00	0.1960	496	2	4	980	44	1.786	7.8	1500	0.1400
	6.00	1000	66.00	0.1150	372	2	4	980	44	1.786	7.9	2000	
	11.00	1500	118.00	0.0520	248	2	4	900	35	2.245	8	2250	
П62	6.00	750	67.50	0.1320	370	2	4	950	42.4	1.853	9.9	1500	0.1620
	8.00	1000	86.00	0.0900	310	2	4	950	42.4	1.853	9.9	2000	
	14.00	1500	147.00	0.0390	196	2	4	800	29.2	2.690	10.3	2250	
П71	7.00	750	84.00	0.0351	372	2	4	1300	20	3.930	8.7	1500	0.3500
	11.00	1000	123.50	0.0790	324	2	4	1450	25	3.140	8.6	2000	
	19.00	1500	210.00	0.0323	198	2	4	1250	19.2	4.090	8.7	2250	
П72	10.00	750	113.00	0.0278	324	2	4	1450	29.7	2.650	10	1500	0.4000
	12.50	1000	157.00	0.0615	270	2	4	1450	26.8	2.930	11	2000	
	25.00	1500	268.00	0.0226	162	2	4	1100	16.8	4.680	11.8	2250	
П81	14.00	750	159.00	0.0641	190	2	4	1550	23	3.420	12	1.500	0.6750
	19.00	1000	210.00	0.0327	210	2	4	1030	12.85	6.120	13.4	2000	
	32.00	1500	342.00	0.0195	162	2	4	1600	23.9	3.290	12.2	3000	
П82	19.00	750	187.00	0.0421	210	2	4	1300	19	4.120	16	1500	0.7780
	25.00	1000	268.00	0.0329	162	2	4	936	19	4.140	14	2000	
	42.00	1500	436.00	0.0123	124	2	4	1300	19.8	3.970	15.2	3000	
П91	19.00	600	222.00	0.0527	290	2	4	1000	11	7.140	17.9	1200	1.4750
	25.00	750	279.00	0.0267	110	2	4	870	8.95	8.780	18	1500	
	32.00	1000	347.00	0.0133	162	2	4	870	8.95	8.780	18	1800	
П92	25.00	600	273.00	0.0290	110	2	4	1000	12.1	6.490	21.8	1200	1.7500
	32.00	750	333.00	0.0148	162	2	4	830	7.95	9.880	23.5	1500	
	42.00	1000	445.00	0.0122	276	2	4	830	7.96	9.880	23.5	1800	
П101	32.00	600	346.00	0.0193	186	2	4	950	9.45	8.310	23.5	1200	2.5750
	42.00	750	446.00	0.0122	276	4	4	950	9.45	8.310	23.5	1500	
	55.00	1000	557.00	0.0079	222	4	4	950	9.45	8.310	23.5	1500	
П102	42.00	600	450.00	0.0132	276	4	4	840	8.13	9.660	33.5	1200	3.0000
	55.00	750	578.00	0.0086	228	4	4	840	8.13	9.660	33.5	1500	
П111	55.00	600	582.00	0.0101	232	4	4	850	7	11.220	37.5	1200	5.1000

Примітки: Опори обмок дані при температурі 20 °С

Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1

Таблиця Д.6 - Технічні дані двигунів постійного струму з незалежним збудженням серії П, тривалого режиму роботи захищені $U_n = 220$ В

Тип	R_n	n_n	I_n	$R_{яд}$	N	2а	2р	$w_{пар}$	$R_{оз}$	I_{zn}	$\Phi_{пол}$	$n_{макс}$	J_d
	кВт	об/хв	А	Ом	Вит	-	-	Вит	Ом	А	МВб	об/хв	кг*м ²
П11	0.13	1000	1.00	2.1000	-	2	2	-	-	-	-	2000	0.0041
	0.30	1500	2.10	22.6000	3304	2	2	4000	670	0.270	1.9	3000	
	0.70	3000	4.30	5.3000	1708	2	2	4000	670	0.270	2.2	3450	
П12	0.20	1000	1.40	26.8000	3360	2	2	4000	785	0.230	3.1	2000	0.0037
	0.45	1500	2.90	11.7600	2352	2	2	4000	785	0.230	3	3000	
	1.00	3000	6.0	3.2900	1288	2	2	4000	785	0.230	3	3450	
П21	0.20	750	1.35	26.6000	-	2	2	-	-	-	-	1500	0.0105
	0.30	1000	2.00	16.6000	3384	2	2	5300	740	0.240	3.1	2000	
	0.70	1500	4.30	6.7500	2376	2	2	4800	600	0.300	3.1	3000	
	1.50	3000	9.00	1.9960	1224	2	2	4800	600	0.300	3.2	3450	
П22	0.30	750	1.95	14.3000	3240	2	2	4800	712	0.250	4.5	1500	0.0130
	0.45	1000	2.75	9.6500	2484	2	2	4800	712	0.250	4.5	2000	
	1.00	1500	5.90	4.1700	1728	2	2	4800	712	0.250	4.3	3000	
	2.20	3000	12.50	1.0300	864	2	2	4800	712	0.250	4.7	3000	
П31	0.45	750	2.90	9.4800	2844	2	2	5000	605	0.290	5.2	1500	0.0225
	0.70	1000	4.25	5.4500	2160	2	2	4600	470	0.380	5.3	2000	
	1.50	1500	8.70	2.4550	1512	2	2	4600	470	0.380	5.1	3000	
	3.20	3000	17.50	0.6420	720	2	2	3600	288	0.620	5.7	3000	
П32	0.70	750	4.20	4.9800	1908	2	2	4600	564	0.310	8.1	1500	0.0290
	1.00	1000	5.70	3.1700	1440	2	2	3600	358	0.490	4.3	2000	
	2.20	1500	12.00	1.2050	936	2	2	3600	358	0.490	8.6	3000	
	4.50	3000	24.30	0.3520	504	2	2	3600	270	0.659	8.2	3000	
П41	1.00	750	6.80	5.3500	1890	2	4	2100	280	0.600	3.6	1500	0.0388
	1.50	1000	9.30	2.6000	1458	2	4	2100	280	0.600	3.8	2000	
	3.20	1500	18.40	1.0320	972	2	4	1750	198	0.840	4	3000	
	6.00	3000	33.00	0.3600	540	2	4	2100	280	0.600	3.7	3000	
П42	1.50	750	9.75	2.9200	1404	2	4	1800	242	0.690	5.1	1500	0.0450
	2.20	1000	13.30	1.7500	1080	2	4	1800	243	0.690	5.2	2000	
	4.50	1500	25.40	0.7800	756	2	4	1350	228	0.730	5.1	3000	
	7.40	3000	39.80	0.2050	378	2	4	1350	136	1.240	-	3000	
П51	2.20	750	13.60	1.9100	1364	2	4	1600	168	0.990	5.4	1500	0.0875
	3.20	1000	18.30	1.0510	1054	2	4	1600	168	0.990	5.5	2000	
	6.00	1500	33.20	0.4720	682	2	4	1500	132	1.270	5.8	3000	
	11.00	3000	58.50	0.1400	372	2	4	1600	168	1.010	-	3000	
П52	3.20	750	19.00	1.0730	992	2	4	1650	184	0.910	7.7	1500	0.1000
	4.50	1000	25.20	0.6320	744	2	4	1650	184	0.910	7.9	2000	
	8.00	1500	43.50	0.2690	496	2	4	1500	150	1.110	7.2	3000	
	14.00	3000	74.00	0.0271	248	2	4	1200	94.8	1.790	-	3000	
П61	4.50	750	26.00	0.7600	992	2	4	2200	216	0.770	7.7	1500	0.1400
	6.00	1000	32.60	0.4940	744	2	4	1950	158	1.050	7.9	2000	
	11.00	1500	59.50	0.1870	496	2	4	1800	133	1.250	8.2	2250	
	19.00	3000	100.40	0.0573	248	2	4	1600	104	1.630	-	3000	
П62	6.00	750	33.50	0.5310	744	2	4	1800	154	1.080	10.5	1500	0.1620
	8.00	1000	43.00	0.3280	558	2	4	1700	136	1.230	10.7	2000	
	14.00	1500	73.00	0.1275	370	2	4	1600	116	1.440	11.1	2250	
	25.00	3000	128.00	0.0464	186	2	4	1350	96	1.640	9.4	3000	
П71	7.00	750	42.00	0.5460	810	2	4	1500	106	1.490	9.2	1500	0.3500
	11.00	1000	63.00	0.3000	594	2	4	1400	8.5	1.850	9.7	2000	
	19.00	1500	103.00	0.1235	396	2	4	1250	76.8	2.040	10.1	2250	
	32.00	3000	168.00	0.0462	222	2	4	1150	60.5	2.600	9.4	3000	
П72	10.00	750	58.00	0.3570	594	2	4	1300	92.5	1.690	12.7	1500	0.4000
	12.50	1000	78.00	0.2370	590	2	4	1450	108	1.460	10.7	2000	
	25.00	1500	132.00	0.0828	324	2	4	1100	67	2.340	12.5	2250	
	42.00	3000	216.00	0.0322	286	2	4	1100	67	2.340	12.2	3000	

Додатки

П81	14.00	750	79.00	0.2440	580	2	4	1500	92.5	1.710	13.2	1500	0.6750
	19.00	1000	105.00	0.1440	444	2	4	1600	96.2	1.640	13.3	2000	
	32.00	1500	166.00	0.0750	324	2	4	1600	95.5	1.640	12.4	2250	
П82	19.00	750	93.00	0.1430	420	2	4	936	40.4	3.890	19.2	1500	0.7780
	25.00	1000	133.00	0.0810	324	2	4	936	40.4	3.890	18.8	2000	
	42.00	1500	218.00	0.0462	234	2	4	936	40.4	3.890	17.4	-	
П91	19.00	600	106.00	0.1980	580	2	4	1000	44	3.570	163	1200	1.4750
	25.00	750	136.00	0.1020	420	2	4	1000	44	3.570	18.9	1500	
	32.00	1000	171.00	0.0666	330	2	4	870	35.8	4.390	18.4	2000	
	55.00	1500	287.00	0.0257	210	2	4	870	35.8	4.390	19.8	2250	
П92	25.00	600	136.00	0.1110	420	2	4	1000	48.4	3.250	3.25	1200	1.750
	32.00	750	169.00	0.0040	324	2	4	830	31.8	4.940	26.8	1500	
	42.00	1000	219.00	0.0547	290	2	4	1000	48.4	3.250	20.8	2000	
	75.00	1500	381.00	0.0138	162	2	4	830	31.8	4.940	20.1	1900	
П101	32.00	600	172.00	0.0749	372	2	4	950	37.8	4.160	26.9	1200	2.5750
	42.00	750	222.00	0.0490	282	2	4	950	37.8	4.160	29.7	1500	
	55.00	1000	286.00	0.0292	222	2	4	950	37.8	4.160	27.9	1500	
	100.00	1500	508.00	0.0131	304	2	4	950	37.8	4.160	13.7	1800	
П102	42.00	600	223.00	0.0225	282	2	4	840	32.5	4.840	37.4	1200	3.0000
	55.00	750	286.00	0.0311	222	2	4	840	32.5	4.840	37	1500	
	75.00	1000	385.00	0.0199	186	2	4	840	32.5	4.840	33.4	1500	
	125.00	1500	632.00	0.0790	228	4	4	840	32.5	4.840	13	1800	
П111	55.00	600	287.00	0.0362	246	2	4	850	28	5.610	41.4	1200	5.1000
	75.00	750	387.00	0.0236	210	2	4	850	28	5.610	39.1	1500	
	100.00	1000	511.00	0.0153	334	4	4	850	28	5.610	18.6	1500	
	160.00	1500	809.00	0.0638	216	4	4	850	28	5.610	13.5	1800	
П112	70.00	600	361.00	0.0262	210	2	4	750	24	6.550	48.8	1200	5.7500
	85.00	750	436.00	0.0192	336	4	4	750	24	6.550	24.6	1500	
	125.00	1000	632.00	0.0102	252	4	4	750	24	6.550	24.9	1500	
	200.00	1500	1000.00	0.0495	184	4	4	750	24	6.550	16.2	1500	

Примітки: Опори обмок дані при температурі 20 °С

Таблиця Д. 7 - Технічні дані двигунів постійного струму з незалежним збудженням серії П, тривалого режиму роботи, захищені, $U_H = 440$ В, $U_{ЭН} = 440$ В

Тип	P_H	n_H	I_H	$R_{яд}$	N	2а	2р	$W_{пар}$	$R_{оз}$	$I_{ЭН}$	$\Phi_{пол}$	$n_{макс}$	Jд
	кВт	об/хв	А	Ом	вит	-	-	вит	Ом	А	мВб	об/хв	
П81	19	1000	52	0.6300	870	2	4	2000	208.4	1.62	14.00	1500	0.675
	32	1500	83	0.2500	580	2	4	2000	208.4	1.62	14.40	2000	
П82	25	1000	66	0.3730	630	2	4	1525	137.6	2.46	19.80	1500	0.778
	42	1500	107	0.1750	420	2	4	1525	137.6	2.46	20.00	2000	
П91	25	750	69	0.4890	870	2	4	1615	129.2	2.62	18.10	1250	1.475
	32	1000	85	0.2960	660	2	4	1615	129.2	2.62	18.40	1500	
	55	1500	143	0.1430	420	2	4	1615	129.2	2.62	19.60	1800	
П92	32	750	85	0.3200	660	2	4	1715	162.2	2.09	24.40	1500	1.750
	42	1000	110	0.2200	580	2	4	1715	162.2	2.09	21.00	1500	
	75	1500	192	0.0790	330	2	4	1715	162.2	2.09	25.40	2200	
П101	42	750	107	0.2060	564	2	4	1660	130.0	2.60	29.00	1400	2.575
	55	1000	143	0.1300	444	2	4	1660	130.0	2.60	27.80	1500	
	100	1500	256	0.0510	282	2	4	1660	130.0	2.60	29.90	2000	
П102	55	750	142	0.1380	444	2	4	1450	101.5	3.33	37.80	1000	3.000
	75	1000	192	0.0830	372	2	4	1450	101.5	3.33	33.70	1500	
	125	1500	316	0.0340	222	4	4	1450	101.5	3.33	38.30	2000	
П111	75	750	194	0.1015	420	2	4	1460	87.0	3.89	39.80	-	5.100
	95	1000	240	0.0665	660	4	4	1460	87.0	3.89	19.00	1500	
	160	1500	400	0.0247	420	4	4	1460	87.0	3.89	20.30	-	
П112	85	750	220	0.0745	660	2	4	1310	82.0	4.13	25.30	1500	5.750
	125	1000	316	0.0421	492	2	4	1310	82.0	4.13	25.70	1500	
	180	1500	450	0.0225	736	2	4	1310	82.0	4.13	16.20	2000	

Примітки: Опори обмок дані при температурі 20 °С

Таблиця Д. 8 - Технічні дані двигунів постійного струму з незалежним збудженням серії П, тривалого режиму роботи захищені $n = 440 \text{ В}$, $U_{\text{н}} = 220\text{В}$

Тип	P_n	n_n	I_n	$R_{\text{яд}}$	N	$2a$	$2p$	$W_{\text{пар}}$	$R_{\text{оз}}$	$I_{\text{зн}}$	$\Phi_{\text{пол}}$	$n_{\text{макс}}$	J_d
	кВт	об/хв	А	Ом	Вит	-	-	Вит	Ом	А	мВб	об/хв	кг*м ²
П81	19	1000	52	0.6300	870	2	4	1032	51.5	3.50	14.00	1500	0.675
	32	1500	83	0.2500	580	2	4	1032	51.5	3.50	14.40	2000	
П82	25	1000	66	0.3730	630	2	4	890	36.0	4.37	19.80	1500	0.778
	42	1500	107	0.1750	420	2	4	890	36.0	4.37	20.00	2000	
П91	25	750	69	0.4890	870	2	4	870	35.8	4.39	18.10	1250	1.475
	32	1000	85	0.2960	660	2	4	870	35.8	4.39	18.40	1500	
	55	1500	143	0.1430	420	2	4	870	35.8	4.39	19.60	1800	
П92	32	750	85	0.3200	660	2	4	1000	48.4	3.25	24.40	1500	1.750
	42	1000	110	0.2200	580	2	4	1000	48.4	3.25	21.00	1500	
	75	1500	192	0.0790	330	2	4	1000	48.4	3.25	25.40	2200	
П101	42	750	107	0.2060	564	2	4	950	37.8	4.16	29.00	1400	2.575
	55	1000	143	0.1300	444	2	4	950	37.8	4.16	27.80	1500	
	100	1500	256	0.0510	282	2	4	950	37.8	4.16	29.90	2000	
П102	55	750	143	0.1380	444	2	4	850	32.9	4.78	37.80	1000	3.000
	75	1000	192	0.0830	372	2	4	850	32.9	4.78	33.70	1500	
	125	1500	316	0.0340	222	4	4	850	32.9	4.78	38.30	1800	
П111	75	750	194	0.1015	420	2	4	850	27.9	5.63	39.80	-	5.100
	95	1000	240	0.0665	660	4	4	850	27.9	5.63	19.00	1500	
	160	1500	400	0.0247	420	4	4	850	27.9	5.63	20.30	-	
П112	85	750	220	0.0745	660	2	4	750	24.0	6.55	25.30	1500	5.750
	125	1000	316	0.0421	492	2	4	750	24.0	6.55	25.70	1500	
	180	1500	450	0.0225	736	2	4	750	24.0	6.55	16.20	2000	

Примітки: Опори обмок дані при температурі 20 °С

Таблиця Д.9 - Рекомендації щодо заміни двигунів серії П, ПБС і ПС двигунами серії 2П

Типорозмір серії П, ПБС і ПС	кВт	об/хв	110			440	Типорозмір серії 2П	кВт	об/хв	110	220	440
			110	220	440							
П-91	19.0	600	1200	1200	-	2ПФ225L	18.5	600	-	2100	-	
П-91	19.0	600	1200	1200	-	2ПФ250М	22.0	600	-	2100	-	
П-92	25.0	600	1200	1200	-	2ПФ250L	28.0	600	-	2100	-	
П-101	32.0	600	1200	1200	-	2ПФ280М	37.0	600	-	1500	1500	
П-102	42.0	600	1200	1200	-	2ПФ280L	45.0	600	-	1500	1200	
П-111	55.0	600	1200	1200	-	2ПФ315М	55.0	600	-	1500	1500	
П-112	70.0	600	-	1200	-	2ПФ315L	75.0	630	-	1500	1500	
П-62	4.5	600	-	2400	-	2ПН180М	5.6	750	3000	2500	1850	
П-72	6.0	600	-	2400	-	2ПН200М	8.5	800	3000	2500	1850	
П-81	8.0	600	2250	1200	-	2ПН225М	11.0	600	-	2100	-	
П-91	19.0	600	1200	1200	-	2ПН250М	18.5	600	-	1800	-	
П-91	19.0	600	1200	1200	-	2ПН250L	22.0	600	-	2100	1800	
П-92	25.0	600	1200	1200	-	2ПН280М	30.0	600	-	1500	1500	
П-101	32.0	600	1200	1200	-	2ПН280L	37.0	600	-	1500	1500	
П-102	42.0	600	1200	1200	-	2ПН315М	45.0	600	-	1500	1500	
П-111	55.0	600	1200	1200	-	2ПН315L	55.0	600	-	1500	1500	
П-81	14.0	750	1500	1500	-	2ПФ225М	18.5	750	-	2500	-	
П-82	19.0	750	1500	1500	-	2ПФ225L	22.0	750	-	2500	-	
П-92	32.0	750	1500	1500	1000	2ПФ250L	37.0	750	-	2000	-	
П-101	42.0	750	1500	1500	1000	2ПФ280М	45.0	750	-	2000	1200	
П-102	55.0	750	1500	1500	800	2ПФ280L	55.0	750	-	1900	1000	
П-111	75.0	750	-	1500	800	2ПФ315М	75.0	750	-	1700	1800	
П-102	85.0	750	-	1500	1000	2ПФ315L	90.0	750	-	1800	1800	
П-21	0.2	750	1500	1500	-	2ПН90L	0.2	750	3000	1500	-	
П-31	0.5	750	1500	1500	-	2ПН100L	0.4	750	3000	1500	-	
П-31	0.5	750	-	3000	-	2ПН112М	0.6	750	3000	2500	-	

Додатки

П-32	0.7	750	1500	1500	-	2ПН112L	0.8	800	3000	2500	-
П-32	0.7	750	-	3000	-	2ПН112L	0.8	750	3000	2500	-
П-41	1.0	750	1500	1500	-	2ПН132М	1.6	750	3000	2500	-
П-41	1.0	750	-	3000	-	2ПН132М	1.6	750	3000	2500	-
П-42	1.5	750	1500	1500	-	2ПН132М	1.6	750	3000	2500	-
П-42	1.5	750	-	3000	-	2ПН132М	1.6	750	3000	2500	-
П-51	2.2	750	1500	1500	-	2ПН132L	1.9	750	3000	2500	1850
П-51	2.2	750	-	3000	-	2ПН132L	1.9	750	3000	2500	1850
П-52	3.2	750	1500	1500	-	2ПН160М	3.0	750	3000	2500	1850
П-52	3.2	750	-	3000	-	2ПН160М	3.0	750	3000	2500	1850
П-61	4.5	750	1500	1500	-	2ПН160L	4.0	750	3000	2500	1850
П-62	6.0	750	1500	1500	-	2ПН180М	5.6	750	3000	2500	1850
П-71	7.0	750	1500	1500	-	2ПН180L	7.1	750	3000	2500	1850
П-72	10.0	750	1500	1500	-	2ПН200L	11.0	800	3000	2500	1850
П-81	14.0	750	1500	1500	-	2ПН225М	15.0	750	-	2500	-
П-82	19.0	750	1500	1500	-	2ПН225L	18.5	750	-	2500	1500
П-82	19.0	750	1500	1500	-	2ПН250М	22.0	750	-	2000	2400
П-91	25.0	750	1500	1500	-	2ПН250М	22.0	750	-	2000	2400
П-91	25.0	750	1500	1500	-	2ПН250L	30.0	750	-	2000	-
П-92	32.0	750	1500	1500	1000	2ПН280М	45.0	750	-	2000	1200
П-101	42.0	750	1500	1500	1000	2ПН280М	45.0	750	-	2000	1200
П-102	55.0	750	1500	1500	800	2ПН280L	55.0	750	-	2000	-
П-102	55.0	750	1500	1500	800	2ПН315М	55.0	750	-	-	1800
П-111	75.0	750	-	1500	800	2ПН315L	75.0	750	-	1800	1800
П-81	19.0	1000	2000	2000	1800	2ПФ225М	22.0	1000	-	1000	1000
П-82	25.0	1000	2000	2000	1000	2ПФ225L	30.0	1060	-	2500	2250
П-91	32.0	1000	1800	2000	1350	2ПФ250М	37.0	1060	-	2500	2500
П-92	42.0	1000	-	2000	1050	2ПФ250L	45.0	1000	-	2500	1500
П-101	55.0	1000	1500	1500	1000	2ПФ280М	75.0	1000	-	2500	2250
П-102	75.0	1000	-	1500	1250	2ПФ280М	75.0	1000	-	2250	2250
П-111	100.0	1000	-	1500	1250	2ПФ315М	110.0	1000	-	2250	-
П-112	125.0	1000	-	1500	1050	2ПФ315L	200.0	1500	-	2400	2000
П-11	0.1	1000	2000	2000	-	2ПН90М	0.3	1060	4000	2000	-
П-12	0.2	1000	2000	2000	-	2ПН90М	0.3	1060	4000	2000	-
П-21	0.3	1000	2000	2000	-	2ПН90L	0.3	1060	4000	2000	-
П-21	0.3	1000	-	3000	-	2ПН90L	0.3	1060	4000	2000	-
П-22	0.5	1000	2000	2000	-	2ПН100М	0.5	1000	4000	2000	-
П-22	0.5	1000	-	3000	-	2ПН100М	0.5	1000	4000	2000	-
П-31	0.7	1000	2000	2000	-	2ПН112М	0.9	1060	4000	3500	-
П-31	0.7	1000	-	3000	-	2ПН112М	0.9	1060	4000	3500	-
П-32	0.1	1000	2000	2000	-	2ПН112L	1.3	1060	4000	3500	-
П-32	0.1	1000	-	3000	-	2ПН112L	1.3	1060	4000	3500	-
П-41	1.5	1000	2000	2000	-	2ПН112L	1.3	1060	4000	3500	-
П-41	1.5	1000	-	3000	-	2ПН112L	1.3	1060	4000	3500	-
П-42	2.2	1000	2000	2000	1500	2ПН132М	2.5	1000	4000	3000	2500
П-42	2.2	1000	-	3000	-	2ПН132М	2.5	1000	4000	3000	2500
П-51	3.2	1000	2000	2000	1500	2ПН132L	3.0	1000	4000	4000	3750
П-51	3.0	1000	-	3000	-	2ПН132L	3.0	1000	4000	4000	3750
П-52	4.5	1000	2000	2000	-	2ПН160М	4.5	950	4000	3000	2500
П-52	4.5	1000	-	3000	-	2ПН160М	4.5	950	4000	3000	2500
П-61	6.0	1000	2000	2000	1500	2ПН160L	6.3	1000	4000	3000	2500
П-61	6.0	1000	-	2250	-	2ПН160L	6.3	1000	4000	3000	2500
П-61	6.0	1000	-	3000	-	2ПН160L	6.3	1000	4000	3000	2500
П-62	8.0	1000	2000	2000	-	2ПН180М	8.0	1000	350	3000	2500
П-62	8.0	1000	-	2250	-	2ПН180М	8.0	1000	350	3000	2500
П-71	11.0	1000	2000	2000	1000	2ПН180L	10.0	1000	350	3000	2500
П-72	14.0	1000	2000	2000	-	2ПН200L	16.0	1000	-	3000	2500
П-81	19.0	1000	2000	2000	1000	2ПН225М	22.0	1000	-	2500	-
П-82	25.0	1000	2000	2000	1000	2ПН225L	30.0	1060	-	2500	2250

Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1

П-91	32.0	1000	1800	2000	1350	2ПН250М	37.0	1060	-	2500	2500
П-92	42.0	1000	-	2000	1050	2ПН250L	45.0	1000	-	2500	1500
П-101	55.0	1000	1500	1500	1000	2ПН280М	75.0	1000	-	2250	2400
П-102	75.0	1000	-	1500	1250	2ПН280М	75.0	1000	-	2250	2400
П-102	75.0	1000	-	1500	1250	2ПН280L	90.0	1060	-	2000	-
П-111	100.0	1000	-	1500	1250	2ПН315М	110.0	1000	-	2250	-
П-81	32.0	1500	2250	2250	1500	2ПФ225М	37.0	1500	-	3000	2700
П-82	42.0	1500	-	2250	1500	2ПН225L	45.0	1500	-	3000	-
П-91	55.0	1500	-	2250	1500	2ПФ250М	55.0	1500	-	2800	2800
П-91	55.0	1500	-	2250	1500	2ПФ250М	50.0	1500	-	-	1800
П-92	75.0	1500	-	1900	1550	2ПФ250L	75.0	1500	-	2800	-
П-92	75.0	1500	-	1900	1550	2ПФ250L	71.0	1500	-	-	2800
П-101	100.0	1500	-	1800	1550	2ПФ280М	110.0	1500	-	2600	2250
П-102	125.0	1500	-	1800	1550	2ПФ280L	132.0	1500	-	2600	1900
П-111	160.0	1500	-	1800	1550	2ПФ315М	160.0	1500	-	2400	-
П-111	160.0	1500	-	1800	1550	2ПФ315М	160.0	1500	-	-	2400
П-111	160.0	1500	-	1800	1550	2ПФ315L	200.0	1500	-	2400	2000
П-112	200.0	1500	-	1500	1500	2ПФ315L	200.0	1500	-	2400	2000
П-11	0.3	1500	3000	3000	-	2ПН90М	0.4	1500	3000	2250	-
П-12	0.5	1500	3000	3000	-	2ПН90L	0.6	1500	4000	4300	-
П-21	0.7	1500	3000	3000	-	2ПН100М	0.8	1500	4000	4300	-
П-21	0.7	1500	-	3400	-	2ПН100М	0.8	1500	4000	4300	-
П-22	1.0	1500	3000	3000	-	2ПН100L	1.1	1500	4000	4300	-
П-22	1.0	1500	-	3400	-	2ПН100L	1.1	1500	4000	4300	-
П-31	1.5	1500	3000	3000	-	2ПН112М	1.5	1500	4000	4000	-
П-31	1.5	1500	-	3400	-	2ПН112М	1.5	1500	4000	4000	-
П-32	2.2	1500	3000	3000	-	2ПН112L	2.2	1500	4000	4000	-
П-32	2.2	1500	-	3400	-	2ПН112L	2.2	1500	4000	4000	-
П-41	3.2	1500	3000	3000	-	2ПН132М	4.0	1500	4000	4000	3750
П-41	3.2	1500	-	3400	-	2ПН132М	4.0	1500	4000	4000	3750
П-42	3.8	1500	3000	3000	-	2ПН132М	4.0	1500	4000	4000	3750
П-42	3.8	1500	-	3400	-	2ПН132М	4.0	1500	4000	4000	3750
П-51	6.0	1500	2250	2250	2000	2ПН132L	5.5	1500	4000	4000	3750
П-52	8.0	1500	2250	2250	-	2ПН160М	7.5	1500	4000	4000	3750
П-61	11.0	1500	2250	2250	2000	2ПН160L	11.0	1500	-	4000	3750
П-62	14.0	1500	2250	2250	2000	2ПН180М	15.0	1500	3500	4000	3500
П-71	19.0	1500	2000	2000	1000	2ПН180L	18.5	1500	-	3500	3500
П-72	25.0	1500	2250	2250	-	2ПН200L	30.0	1500	-	3500	3500
П-81	32.0	1500	2250	2250	1500	2ПН225М	37.0	1500	-	3000	1850
П-82	42.0	1500	-	2250	1500	2ПН250М	55.0	1500	-	2800	-
П-82	42.0	1500	-	2250	1500	2ПН250М	55.0	1700	-	-	2800
П-91	55.0	1500	-	2250	1500	2ПН250М	55.0	1500	-	2800	-
П-91	55.0	1500	-	2250	1500	2ПН250М	55.0	1700	-	-	2800
П-92	75.0	1500	-	1900	1550	2ПН250L	75.0	1500	-	2800	-
П-92	75.0	1500	-	1900	1550	2ПН250L	71.0	1500	-	-	2800
П-101	100.0	1500	-	1800	1550	2ПН280М	110.0	1500	-	2600	2250
П-102	125.0	1500	-	1800	1550	2ПН280L	132.0	1500	-	2600	1900
П-111	160.0	1500	-	1800	1550	2ПН315М	160.0	1500	-	2400	2400
П-112	200.0	1500	-	1500	1500	2ПН315L	200.0	1500	-	2400	2400
П-11	0.5	2200	3300	3300	-	2ПН90М	0.7	2360	4000	3540	-
П-12	0.7	2200	3300	3300	-	2ПН90М	0.7	2360	4000	3540	-
П-21	1.0	2200	3300	3300	-	2ПН90L	0.9	2000	4000	4000	-
П-22	1.5	2200	3300	3300	-	2ПН100М	1.2	2200	4000	4000	-
П-31	2.2	2200	3300	3000	-	2ПН112М	2.5	2200	4000	4000	-
П-32	3.2	2200	3000	3000	-	2ПН112L	3.4	2200	4000	4000	-
П-41	4.2	2200	3000	3000	-	2ПН132М	7.0	2200	4000	4000	4000
П-42	5.3	2200	3000	3000	-	2ПН132М	7.0	2200	4000	4000	4000
П-51	8.0	2200	-	2500	-	2ПН132L	8.5	2200	-	4000	4000
П-52	10.5	2200	2500	2500	-	2ПН160М	13.0	2120	-	4000	4000
П-61	14.0	2200	-	2500	-	2ПН160М	13.0	2120	-	4000	4000

Додатки

П-62	18.0	2200	-	2500	-	2ПН160L	16.0	2360	-	4000	4000
П-71	25.0	2200	2500	2500	-	2ПН180M	26.0	2240	-	3500	3500
П-11	0.7	3000	3450	3450	-	2ПН90M	1.0	3000	4000	4000	-
П-12	1.0	3000	3450	3450	-	2ПН90M	1.0	3000	4000	4000	-
П-21	1.5	3000	3450	3450	-	2ПН90L	1.3	3150	4000	4000	-
П-22	2.2	3000	3000	3000	-	2ПН100L	2.2	3000	4000	4000	-
П-31	3.2	3000	3000	3000	-	2ПН112M	3.6	3000	4000	4000	-
П-32	4.5	3000	3000	3000	-	2ПН112L	5.3	3000	4000	4000	-
П-41	6.0	3000	3000	3000	-	2ПН132M	10.5	3000	4000	4000	-
П-42	7.4	3000	3000	3000	-	2ПН132M	10.5	3000	4000	4000	-
П-51	11.0	3000	-	3000	-	2ПН132M	10.5	3000	4000	4000	-
П-52	14.0	3000	-	3000	-	2ПН132L	14.0	3150	-	4000	4000
П-61	19.0	3000	-	3000	-	2ПН160M	18.0	3150	-	4000	4000
П-62	25.0	3000	-	3000	-	2ПН160L	24.0	3150	-	4000	4000
П-71	32.0	3000	-	3000	-	2ПН180M	37.0	3000	-	3500	3500
П-72	42.0	3000	-	3000	-	2ПН180L	42.0	3000	-	-	3500
ПР-61	3.3	750	1250	1250	1000	2ПО160L	3.2	750	3000	2500	1850
ПР-62	4.7	750	1250	1250	1000	2ПО180M	4.5	750	3000	2500	1850
ПС-51	0.2	1000	2000	2000	-	2ПБ90M	0.2	1000	4000	2000	-
ПС-51	0.3	1000	2000	2000	-	2ПБ90L	0.3	1000	4000	2000	-
ПС-52	0.4	1000	2000	2000	-	2ПБ100M	0.4	1000	4000	2000	-
ПБС-22	0.4	1000	2500	2500	-	2ПБ112M	0.5	1060	4000	3500	-
ПБС-23	0.6	1000	2500	2500	-	2ПБ112L	0.6	1060	4000	3500	-
ПБ-41	0.7	1000	1400	1400	1150	2ПБ112L	0.6	1000	4000	3500	-
ПБС-32	0.8	1000	2500	2500	-	2ПБ132M	1.6	1060	4000	3000	2500
ПБ-42	1.0	1000	1400	1400	1150	2ПБ132M	1.6	1060	4000	3000	2500
ПЕС-33	1.0	1000	2500	2500	-	2ПБ132M	1.6	1060	4000	3000	2500
ПБ-51	1.2	1000	1400	1400	1150	2ПБ132M	1.6	1060	4000	3000	2500
ПБС-42	1.4	1000	2500	3000	-	2ПБ132M	1.6	1060	4000	3000	2500
ПБ-52	1.5	1000	-	1400	1150	2ПБ132M	1.6	1060	4000	3000	2500
ПБ-61	1.8	1000	1400	1400	1150	2ПБ132L	1.9	1060	4000	3000	2500
ПЕС-43	1.9	1000	2500	2500	-	2ПБ132L	1.9	1060	4000	3000	2500
ПБ-62	2.2	1000	1400	1400	1150	2ПБ160M	2.5	1000	4000	3000	2500
ПБС-52	2.5	1000	-	3000	-	2ПБ160M	2.5	1000	4000	3000	2500
ПБС-53	3.3	1000	-	3000	-	2ПБ160L	3.2	1060	4000	3000	2500
ПБС-62	4.7	1000	-	3000	-	2ПБ180M	4.5	1000	3500	3000	2500
ПБС-63	5.4	1000	-	3000	-	2ПБ180M	4.5	1000	3500	3000	2500
ПР-51	2.6	1000	1600	1600	1250	2ПО132Б	2.2	1000	4000	3000	2500
ПР-52	3.4	1000	1600	1600	1250	2ПО160M	3.2	1120	4000	3000	2500
ПР-61	4.3	1000	1600	1600	1250	2ПО160L	4.0	1000	4000	3000	2500
ПР-62	6.0	1000	1600	1600	1250	2ПО180L	7.5	1000	3500	3000	2500
ПС-41	0.1	1500	2000	-	-	2ПБ90M	0.3	1500	4000	3000	-
ПБ-11	0.2	1500	2000	2000	-	2ПБ90M	0.3	1500	4000	3000	-
ПС-41	0.2	1500	3000	3000	-	2ПБ90M	0.3	1500	4000	3000	-
ПБ-12	0.2	1500	2000	2000	-	2ПБ90M	0.3	1500	4000	3000	-
ПБ-21	0.4	1500	2000	2000	-	2ПБ90L	0.4	1500	4000	3000	-
ПС-51	0.4	1500	3000	3000	-	2ПБ90L	0.4	1500	4000	3000	-
ПБ-22	0.5	1500	2000	2000	-	2ПБ100M	0.6	1500	4000	3000	-
ПС-52	0.6	1500	3000	3000	-	2ПБ100M	0.6	1500	4000	3000	-
ПБ-31	0.7	1500	2000	2000	-	2ПБ112M	0.8	1500	4000	4000	-
ПБ-32	1.0	1500	2000	2000	-	2ПБ112L	1.0	1500	4000	4000	-
ПБ-41	1.2	1500	2000	2000	1650	2ПБ112L	1.0	1500	4000	4000	-
ПБ-42	1.5	1500	2000	2000	1650	2ПБ132M	2.4	1600	4000	4000	3750
ПБ-51	1.9	1500	2000	-	1650	2ПБ132M	2.4	1600	4000	4000	3750
ПБ-52	2.4	1500	2000	2000	1650	2ПБ132M	2.4	1600	4000	4000	3750
ПБ-61	3.2	1500	2000	2000	1650	2ГБ132L	3.2	1600	4000	4000	3750
ПБ-62	4.0	1500	2000	2000	1650	2ПБ160M	4.2	1600	4000	4000	3750
ПБС-22	0.6	1500	3750	2000	-	2ПБ112M	0.8	1500	4000	4000	-
ПБС-23	0.9	1500	3750	3750	-	2ПБ112M	0.8	1500	4000	4000	-

Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1

ПБС-32	1.2	1500	3750	3750	-	2ПБ112L	1.0	1500	4000	4000	-
ПБС-33	1.6	1500	3750	3750	-	2ПБ132М	2.4	1600	4000	4000	3750
ПБС-42	2.1	1500	3750	3750	-	2ПБ132М	2.4	1600	4000	4000	3750
ПБС-43	2.8	1500	-	3750	-	2ПБ132L	3.2	1600	4000	4000	3750
ПБС-52	4.2	1500	-	3750	-	2ПБ160М	4.2	1600	4000	4000	3750
ПБС-53	4.8	1500	-	3600	-	2ПБ160L	5.3	1500	-	4000	3750
ПБС-62	7.2	1500	-	3600	-	2ПБ180М	7.1	1500	3500	3500	3500
ПБС-63	7.8	1500	-	3600	-	2ПБ180L	8.5	1600	3500	3500	3500
ПР-51	4.2	1500	2200	3600	-	2ПО160М	6.0	1600	-	4000	3750
ПР-52	5.1	1500	2200	2200	-	2ПО160М	6.0	1600	-	4000	3750
ПР-61	7.0	1500	2200	2200	1800	2ПО160L	7.1	1500	4000	4000	3750
ПР-62	9.5	1500	2200	2200	1800	2ПО180М	10.0	1500	3500	3500	3500
ПС-31	0.2	2200	4000	2200	1800	2ПБ90М	0.4	2200	4000	4000	-
ПБ-11	0.2	2200	2600	2600	1800	2ПБ90М	0.4	2200	4000	4000	-
ПС-41	0.3	2200	4000	-	-	2ПБ90М	0.4	2200	4000	4000	-
ПБ-12	0.3	2200	2600	2600	-	2ПБ90М	0.4	2200	4000	4000	-
ПБ-21	0.5	2200	2600	2600	-	2ПБ90L	0.5	2200	4000	4000	-
ПС-51	0.6	2200	4000	4000	-	2ПБ90L	0.5	2200	4000	4000	-
ПБ-22	0.7	2200	2600	2600	-	2ПБ100М	0.9	2300	4000	4000	-
ПС-52	0.8	2200	4000	4000	-	2ПБ100М	0.9	2300	4000	4000	-
ПС-53	0.9	2200	4000	4000	-	2ПБ100М	0.9	2300	4000	4000	-
ПБ-31	1.0	2200	2600	2600	-	2ПБ112М	1.1	2200	4000	4000	-
ПБ-32	1.5	2200	2600	2600	-	2ПБ112L	1.5	2240	4000	4000	-
Г1Б-41	1.7	2200	2600	2600	-	2ПБ112L	1.5	2240	4000	4000	-
ПБ-42	2.2	2200	4000	2600	-	2ПБ132М	3.7	2200	4000	4000	4000
ПБ-51	2.8	2200	2600	2600	-	2ПБ132М	3.7	2200	4000	4000	4000
ПБ-52	3.5	2200	2600	2600	-	2ПБ132М	3.7	2200	4000	4000	4000
ПБС-22	0.9	2200	4000	4000	-	2ПБ100М	0.9	2300	4000	4000	-
ПБС-23	1.2	2200	4000	4000	-	2ПБ112М	1.1	2200	4000	4000	-
ПБС-32	1.5	2200	4000	4000	-	2ПБП2L	1.5	2240	4000	4000	-
ПБС-33	2.1	2200	-	4000	-	2ПБ132М	3.7	2200	4000	4000	4000
ПБС-42	2.9	2200	4000	4000	-	2ПБ132М	3.7	2200	4000	4000	4000
ПБС-43	3.8	2200	-	4000	-	2ПБ132М	3.7	2200	4000	4000	4000
ПБС-52	5.5	2200	-	3600	-	2ПБ160М	6.0	2200	4000	4000	-
ПБС-53	6.3	2200	-	3600	-	2ПБ160L	7.5	2240	4000	4000	-
ПБС-62	10.0	2200	-	3600	-	2ПБ180М	9.5	2200	4000	3500	3500
ПБС-63	11.0	2200	-	3600	-	2ПБ180L	11.0	2200	-	4000	3500
ПР-51	5.9	2200	2900	2900	-	2ПО132L	5.3	2200	4000	4000	4000
ПР-52	7.7	2200	2900	2900	-	2ПО160М	8.0	2240	4000	4000	4000
ПР-61	9.8	2200	2900	2900	-	2ПО160L	10.0	2360	-	4000	4000
ПР-62	13.5	2200	2900	2900	-	2ПО180М	14.0	2120	-	4000	3500
ПС-31	0.3	3000	4000	-	-	2ПБ90М	0.6	3000	4000	4000	-
ПБ-11	0.3	3000	3000	3000	-	2ПБ90М	0.6	3000	4000	4000	-
ПС-41	0.4	3000	4000	-	-	2ПВ90М	0.6	3000	4000	4000	-
ПБ-12	0.5	3000	3000	3000	-	2ПБ90М	0.6	3000	4000	4000	-
ПБ-21	0.8	3000	3000	3000	-	2ПБ90L	0.8	3000	4000	4000	-
ПБ-22	1.0	3000	3000	3000	-	2ПБ100М	1.2	3150	4000	4000	-
ПБ-31	1.3	3000	3000	3000	-	2ПБ112М	1.4	3000	4000	4000	-
ПБ-32	1.9	3000	3000	3000	-	2ПБ112L	2.0	3000	4000	4000	-
ПБ-41	2.3	3000	3000	3000	-	2ПБ132М	4.5	3150	4000	4000	4000
ПБ-42	3.0	3000	3000	3000	-	2ПБ132М	4.5	3150	4000	4000	4000
ПР-51	7.3	3000	3000	3000	-	2ПБ160М	9.5	3000	4000	4000	4000
ПР-52	9.5	3000	-	3000	-	2ПБ160М	9.5	3000	4000	4000	4000
ПР-61	12.0	3000	-	3000	-	2ПБ160L	12.0	3000	-	4000	4000
ПБС-22	1.0	3000	4000	4000	-	2ПБ112М	1.4	3000	4000	4000	-
ПБС-23	1.3	3000	4000	4000	-	2ПБ112М	1.4	3000	4000	4000	-
ПБС-32	1.8	3000	-	4000	-	2ПБ112L	2.0	3000	4000	4000	-
ПБС-33	2.4	3000	-	4000	-	2ПБ132М	4.5	3150	4000	4000	4000
ПБС-42	3.4	3000	-	4000	-	2ПБ132М	4.5	3150	4000	4000	4000
ПБС-43	4.3	3000	-	4000	-	2ПБ132М	4.5	3150	4000	4000	4000

Додатки

ПБС-52	6.5	3000	-	3600	-	2ПБ160М	7.1	3000	4000	4000	-
ПБС-53	8.0	3000	-	3600	-	2ПБ160L	8.1	3000	-	4000	4000
ПБС-62	11.3	3000	-	3600	-	2ПБ180М	12.0	3000	-	3500	3500

Таблиця Д.10 - Основні технічні дані асинхронних короткозамкнених двигунів серії 4А;
U_н = 380 В; ступінь захисту ІР4

Типорозмір двигуна	P _н	n _н	I _н	кКД _н	cosφ _н	I _п /I _н	M _п / M _н	M _к / M _н	r ₁	x ₁	r' ₂	x' ₂	J _д
	кВт	об/хв	А	%	-	-	-	-	Ом	Ом	Ом	Ом	
синхронна швидкість обертання 3000 об/хв													
4AA50A2	0.09	2742	0.32	60.0	0.70	3.5	2.0	2.2	103.100	63.300	96.300	110.00	0.00003
4AA50B2	0.12	2709	0.41	63.0	0.70	3.5	2.0	2.2	59.0000	40.800	64.400	75.100	0.00003
4AA56A2	0.18	2760	0.54	66.0	0.76	4.0	2.0	2.2	69.3000	21.200	38.300	27.300	0.00042
4AA56B2	0.25	2775	0.72	68.0	0.77	4.0	2.0	2.2	48.9000	16.200	33.600	24.100	0.00047
4AA63A2	0.37	2751	0.93	70.0	0.86	4.5	2.0	2.2	33.1000	12.300	22.700	18.900	0.00076
4AA63B2	0.56	2745	1.35	73.0	0.86	4.5	2.0	2.2	21.2000	7.9900	15.600	13.530	0.00090
4A71A2	0.75	2823	1.70	77.0	0.87	5.5	2.0	2.2	15.5000	6.7000	8.3000	10.000	0.00097
4A71B2	1.10	2811	2.50	77.5	0.87	5.5	2.0	2.2	11.4000	4.7000	6.1000	7.4000	0.00110
4A80A2	1.60	2874	3.30	81.0	0.85	6.5	2.1	2.6	5.6000	3.4000	3.3000	5.4000	0.00180
4A80B2	2.20	2871	4.70	83.0	0.87	6.5	2.1	2.6	3.6000	2.3000	2.2000	4.1000	0.00210
4A90L2	3.00	2871	6.10	84.5	0.88	6.5	2.1	2.5	2.6000	2.0500	1.7000	3.6000	0.00350
4A100S2	4.00	2901	7.80	86.5	0.89	7.5	2.0	2.5	1.5000	1.5500	1.0000	2.7000	0.00590
4A100L2	5.50	2898	10.50	87.5	0.91	7.5	2.0	2.5	1.0000	1.1000	0.7500	2.3000	0.00750
4A112M2	7.50	2925	14.80	87.5	0.88	7.5	2.0	2.8	0.6800	0.8500	0.4100	2.1000	0.01000
4A132M2	11.0	2931	21.20	88.0	0.90	7.5	1.7	2.8	0.4100	0.6300	0.2600	1.2400	0.02300
4A160S2	15.0	2937	28.50	88.0	0.91	7.0	1.4	2.2	0.4000	0.7000	0.1700	0.9300	0.04800
4A160M2	18.0	2937	34.50	88.5	0.92	7.0	1.4	2.2	0.3100	0.8900	0.1400	0.7400	0.05300
4A180S2	22.0	2943	41.60	88.5	0.91	7.5	1.4	2.5	0.2100	0.4800	0.1200	0.5800	0.07000
4A180M2	30.0	2946	56.00	90.5	0.90	7.5	1.4	2.5	0.1170	0.2870	0.0710	0.4320	0.08500
4A200M2	37.0	2943	70.00	90.0	0.89	7.5	1.4	2.5	0.0900	0.3000	0.0700	0.3800	0.15000
4A200L2	45.0	2946	83.80	91.0	0.90	7.5	1.4	2.5	0.0700	0.2300	0.0520	0.3400	0.17000
4A225M2	55.0	2946	100.0	91.0	0.92	7.5	1.4	2.5	0.0570	0.2000	0.0420	0.2700	0.25000
4A250S2	75.00	2958	140.0	91.0	0.89	7.5	1.2	2.5	0.0260	0.1000	0.0210	0.1700	0.52000
4A250M2	90.00	2958	165.0	92.0	0.90	7.5	1.2	2.5	0.0180	0.1000	0.0140	0.1100	1.10000
4A280S2	110.0	2940	206.0	91.0	0.89	7.0	1.2	2.5	0.0150	0.0850	0.0110	0.0900	1.20000
4A280M2	132.0	2940	247.0	91.5	0.89	7.0	1.0	2.5	0.0110	0.0700	0.0090	0.0900	1.40000
4A315S2	160.0	2943	294.0	92.0	0.90	6.5	1.0	1.9	0.0070	0.0500	0.0070	0.0800	1.60000
4A315M2	200.0	2943	365.0	92.5	0.90	7.0	1.0	1.9	0.0060	0.0400	0.0050	0.0600	2.90000
4A355S2	250.0	2943	459.0	92.5	0.90	7.0	1.0	1.9	0.0050	0.0350	0.0040	0.0400	3.20000
4A355M2	315.0	2940	564.0	93.0	0.91	7.0	1.0	1.9	0.0330	0.1300	0.0024	0.2100	0.4700
синхронна швидкість обертання 1500 об/хв													
4AA50A4	0.06	1379	0.30	50.0	0.60	2.5	2.0	2.2	116.200	123.00	159.70	123.00	0.00030
4AA50B4	0.09	1371	0.41	55.0	0.60	2.5	2.0	2.2	90.6000	43.600	75.500	75.500	0.00070
4AA56A4	0.12	1377	0.44	63.0	0.66	3.5	2.1	2.2	59.5000	29.700	52.900	56.200	0.00079
4AA56B2	0.18	1367	0.67	64.0	0.64	3.5	2.1	2.2	38.5000	21.100	35.900	43.600	0.00120
4AA63A4	0.25	1380	0.86	68.0	0.65	4.0	2.0	2.2	31.3000	15.800	25.700	33.100	0.00140
4AA63B4	0.37	1365	1.19	68.0	0.69	4.0	2.0	2.2	16.9000	11.200	14.300	26.100	0.00130
4A71A4	0.55	1391	1.69	70.5	0.70	4.5	2.0	2.2	11.2000	8.5000	11.200	20.400	0.00140
4A71B4	0.75	1388	2.16	72.0	0.73	4.5	2.0	2.2	9.6000	6.2500	5.4500	9.6200	0.00320
4A80A4	1.10	1419	2.74	75.0	0.81	5.0	2.0	2.2	7.4200	4.8200	3.7100	7.4200	0.00330
4A80B4	1.50	1413	3.56	77.0	0.83	5.0	2.0	2.2	4.2900	3.3300	2.6300	5.7000	0.00560
4A90L4	2.20	1424	5.02	80.0	0.83	6.0	2.1	2.2	2.5700	2.6000	1.7400	4.2800	0.00870
4A100S4	3.00	1434	6.68	82.0	0.83	6.0	2.0	2.4	2.3000	2.5300	1.5800	3.7800	0.00925
4A100L4	4.00	1431	8.59	84.0	0.84	6.0	2.0	2.4	1.7200	2.0000	1.3600	3.5900	0.01100
4A112M4	5.50	1446	11.47	85.5	0.85	7.0	2.0	2.2	1.2300	1.5000	0.7870	2.4900	0.01700
4A132S4	7.50	1457	15.10	87.5	0.86	7.5	2.2	3.0	0.7000	1.2300	0.4810	1.8900	0.02800
4A132M4	11.0	1458	22.00	87.5	0.87	7.5	2.2	3.0	0.4300	0.8500	0.3200	1.3000	0.04000

Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1

4A160S4	15.0	1466	29.20	88.5	0.88	7.0	1.4	2.3	0.3500	0.6300	0.1880	0.9800	0.10000
4A160M4	18.5	1467	35.60	89.5	0.88	7.0	1.4	2.3	0.2600	0.5250	0.1480	0.8040	0.13000
4A180S4	22.0	1470	41.20	90.0	0.90	6.5	1.4	2.3	0.2200	0.4280	0.1120	0.6420	0.19000
4A180M4	30.0	1472	62.40	91.0	0.89	6.5	1.4	2.3	0.1200	0.2400	0.0630	0.4230	0.23000
4A200M4	37.0	1475	68.80	91.0	0.90	7.0	1.4	2.5	0.1250	0.2730	0.0580	0.4500	0.37000
4A200L4	45.0	1476	82.60	92.0	0.90	7.0	1.4	2.5	0.0908	0.2190	0.0454	0.3740	0.45000
4A225M4	55.0	1479	100.0	92.5	0.90	7.0	1.3	2.5	0.0593	0.1890	0.0330	0.3080	0.64000
4A250S4	75.0	1482	136.0	93.0	0.90	7.0	1.2	2.3	0.0405	0.1440	0.0227	0.1780	1.00000
4A250M4	90.0	1481	162.0	93.0	0.91	7.0	1.2	2.3	0.0328	0.1270	0.0191	0.1640	1.20000
4A280S4	110.	1496	201.0	92.5	0.90	6.0	1.2	2.0	0.0253	0.1340	0.0209	0.1760	2.30000
4A280M4	132.	1466	239.0	93.0	0.90	6.0	1.3	2.0	0.0193	0.1060	0.0166	0.1680	2.50000
4A315S4	160.	1479	285.0	93.5	0.91	6.5	1.3	2.2	0.0139	0.0826	0.0131	0.1158	3.10000
4A315M4	200.	1481	351.0	94.0	0.92	6.5	1.3	2.2	0.0088	0.0540	0.0088	0.0753	3.60000
4A355S4	250.0	1485	438.0	94.5	0.92	7.0	1.2	2.0	0.0066	0.0454	0.0066	0.0656	6.00000
4A355M4	315.0	1485	548.0	94.5	0.92	7.0	1.2	2.0	0.0048	0.0397	0.0056	0.0561	7.00000
синхронна швидкість обертання 1000 об/хв													
4AA63A6	0.18	885	0.79	66.0	0.62	3.0	2.2	2.2	66.8000	41.8000	61.3000	50.1000	0.00180
4AA63B6	0.25	892	1.04	59.0	0.62	3.0	2.2	2.2	38.1000	27.5000	44.4000	44.4000	0.00220
4A71A6	0.37	908	1.26	64.5	0.69	4.0	2.0	2.2	29.7000	21.0000	26.2000	27.9000	0.00170
4A71B6	0.55	900	1.74	67.5	0.71	4.0	2.0	2.2	20.2000	13.9000	19.0000	21.5000	0.00200
4A80A6	0.75	916	2.23	69.0	0.74	4.0	2.0	2.2	15.8000	11.8000	11.8000	19.7000	0.00310
4A80B6	1.10	920	3.04	74.0	0.74	4.0	2.0	2.2	8.6800	7.9600	7.9600	13.7000	0.00460
4A90L6	1.50	936	4.10	75.0	0.74	4.5	2.0	2.2	5.9000	5.9000	4.7200	11.2000	0.00730
4A100L6	2.20	949	5.64	81.0	0.73	5.0	2.0	2.2	3.5100	4.2900	2.6000	8.2000	0.01300
4A112MA6	3.00	953	7.38	81.0	0.76	6.0	2.0	2.5	2.5000	2.2000	1.9000	3.0000	0.01700
4A112MB6	4.00	949	9.12	82.0	0.81	6.0	2.0	2.5	1.8000	1.7000	1.5000	2.6000	0.02100
4A132S6	5.50	967	12.25	85.0	0.80	6.0	2.0	2.5	1.2000	1.3000	0.7400	2.0000	0.04000
4A132M6	7.50	968	16.41	85.5	0.81	6.0	2.0	2.5	0.7800	0.9000	0.5000	1.4000	0.05800
4A160S6	11.00	973	22.53	86.0	0.86	6.0	1.2	2.0	0.7000	1.0000	0.3000	1.4000	0.14000
4A160M6	15.00	974	29.86	87.5	0.87	6.0	1.2	2.0	0.4500	0.7300	0.2000	1.2000	0.18000
4A180M6	18.00	976	36.61	88.0	0.87	6.0	1.2	2.0	0.3400	0.6600	0.1600	0.8000	0.22000
4A200M6	22.00	977	41.15	90.0	0.90	6.5	1.3	2.4	0.2600	0.5800	0.1300	0.7000	0.40000
4A200L6	30.00	979	55.81	90.5	0.90	6.5	1.3	2.4	0.1800	0.4700	0.0900	0.5000	0.45000
4A225M6	37.00	982	69.22	91.0	0.89	6.5	1.2	2.3	0.1300	0.3200	0.0600	0.4000	0.74000
4A250S6	46.00	986	85.59	91.5	0.89	6.5	1.2	2.1	0.1000	0.2300	0.0400	0.3600	1.20000
4A250M6	55.00	987	103.0	91.5	0.89	6.5	1.2	2.1	0.0700	0.1700	0.0300	0.3000	1.30000
4A280S6	75.00	980	139.0	92.0	0.89	7.0	1.2	2.2	0.0500	0.2000	0.0300	0.2100	2.90000
4A280M6	90.00	9829	165.0	92.59	0.89	7.0	1.2	2.2	0.0400	0.1400	0.0250	0.1600	3.40000
4A315S6	110.0	82	199.0	3.0	0.90	7.0	1.0	2.2	0.0290	0.1110	0.0200	0.1330	4.00000
4A315M6	132.0	983	239.0	93.5	0.90	7.0	1.4	2.2	0.0210	0.0910	0.0170	0.1100	4.50000
4A355S6	160.0	988	291.0	93.5	0.90	7.0	1.4	2.2	0.0150	0.0760	0.0110	0.1060	7.30000
4A355M6	200.0	987	362.0	94.0	0.90	7.0	1.4	2.2	0.0110	0.0550	0.0080	0.0790	8.80000
синхронна швидкість обертання 750 об/хв													
4A71B8	0.25	655	1.04	56.0	0.65	3.0	1.6	1.7	46.5000	38.1000	48.7000	59.2000	0.00190
4A80A8	0.37	683	1.40	61.5	0.65	3.5	1.6	1.7	29.9000	25.1000	25.1000	45.6000	0.00340
4A80B8	0.55	683	2.00	64.0	0.65	3.5	1.6	1.7	18.7000	17.6000	16.5000	31.9000	0.00410
4A90LA8	0.75	705	2.70	68.0	0.62	3.5	1.6	1.9	11.4000	12.2000	8.9600	23.6000	0.00670
4A90LB8	1.10	6986	3.50	70.0	0.68	3.5	1.6	1.9	8.1700	9.4300	6.9100	18.9000	0.00860
4A100L8	1.50	98	4.73	74.0	0.65	4.0	1.6	1.9	5.1100	7.4400	4.3200	14.9000	0.01300
4A112MA8	2.20	705	6.14	79.5	0.71	5.0	1.9	2.2	3.3300	3.9400	2.9700	6.0900	0.01700
4A112MB8	3.00	707	7.73	76.5	0.74	5.0	1.9	2.2	2.2800	3.1300	2.3600	4.8400	0.02500
4A132S8	4.00	704	10.43	83.0	0.70	5.5	1.9	2.6	1.4300	2.1000	1.2200	3.5900	0.04200
4A132M8	5.50	719	13.57	83.0	0.74	5.5	1.9	2.6	1.1300	1.7800	0.9900	3.0800	0.05700
4A160S8	7.50	731	17.61	86.0	0.75	6.0	1.4	2.2	0.9400	1.7500	0.4000	2.2500	0.14000
4A160M8	11.00	731	25.54	87.0	0.75	6.0	1.4	2.2	0.5700	1.1200	0.2670	1.5500	0.18000
4A180M8	15.00	731	31.86	87.0	0.82	5.5	1.2	2.0	0.4420	0.8980	0.2070	1.1730	0.25000
4A200M8	18.00	733	37.70	88.5	0.84	5.5	1.2	2.2	0.3320	0.7590	0.1520	0.9340	0.40000
4A200L8	22.00	730	44.84	88.5	0.84	5.5	1.2	2.0	0.3040	0.6860	0.1420	0.8830	0.45000
4A225M8	30.00	737	62.00	90.5	0.81	6.0	1.3	2.1	0.1600	0.4260	0.0780	0.6030	0.74000
4A250S8	37.00	738	75.05	90.0	0.83	6.0	1.2	2.0	0.1380	0.3220	0.0500	0.5280	1.20000

Додатки

4A250M8	45.00	740	89.20	91.0	0.84	6.0	1.2	2.0	0.0910	0.2440	0.0390	0.4190	1.40000
4A280S8	55.00	734	108.0	92.0	0.84	5.5	1.2	2.0	0.0710	0.2440	0.0450	0.2850	3.20000
4A280M8	75.00	734	145.0	92.5	0.85	5.5	1.2	2.0	0.0420	0.1820	0.0320	0.1970	4.10000
4A315S8	90.00	739	173.0	93.0	0.85	6.5	1.2	2.3	0.0292	0.1399	0.0242	0.1653	4.90000
4A315M8	110.0	739	211.0	93.0	0.85	6.5	1.2	2.3	0.0240	0.1043	0.0198	0.1251	5.80000
4A355S8	132.0	740	252.0	93.5	0.85	6.5	1.2	2.2	0.0201	0.1048	0.0148	0.1397	9.00000
4A355M8	160.0	740	305.0	93.5	0.85	6.5	1.2	2.2	0.0144	0.0866	0.0123	0.1154	10.0000
синхронна швидкість обертання 600 об/хв													
4A250S10	30.00	589	63.77	88.0	0.81	6.0	1.2	1.9	0.1932	0.3794	0.0793	0.5865	1.40000
4A280S10	37.00	590	78.98	91.0	0.78	6.0	1.0	1.8	0.0864	0.3064	0.0752	0.4178	3.60000
4A280M10	45.00	590	95.53	91.5	0.78	6.0	1.0	1.8	0.0852	0.2764	0.0724	0.3685	3.80000
4A315S10	55.00	589	115.0	92.0	0.79	6.0	1.0	1.8	0.0536	0.1913	0.0497	0.2678	5.20000
4A315M10	75.00	590	154.0	92.0	0.80	6.0	1.0	1.8	0.0414	0.1571	0.0386	0.2143	6.20000
4A355S10	90.00	590	179.0	92.5	0.83	6.0	1.0	1.8	0.0344	0.1475	0.0258	0.1966	9.30000
4A355M10	110.0	590	215.0	93.5	0.83	6.0	1.0	1.8	0.0246	0.1126	0.0215	0.1637	11.0000
синхронна швидкість обертання 500 об/хв													
4A315S12	45.00	488	99.90	91.0	0.75	6.0	1.0	1.8	0.0815	0.3083	0.0727	0.4184	5.30000
4A315M12	55.00	486	121.0	91.5	0.75	6.0	1.0	1.8	0.0600	0.2364	0.0582	0.3455	6.20000
4A355S12	75.00	493	163.0	91.5	0.76	6.0	1.0	1.8	0.0351	0.1620	0.0283	0.2294	9.30000
4A355M12	90.00	494	195.0	92.0	0.76	6.0	1.0	1.8	0.0271	0.1241	0.0226	0.1805	10.0000

Таблиця Д.11 - Основні технічні дані асинхронних короткозамкнених двигунів серії 4А;
 $U_n = 380\text{ В}$; ступінь захисту 1Р23

Типорозмір двигуна	P_n	n_n	I_n	ккД _n	$\cos\varphi_n$	$I_n/$ I_n	$M_n/$ M_n	$M_k/$ M_n	Γ_1	x_1	Γ'_2	x'_2	J_d
	кВт	об/хв	А	%	-	-	-	-	Ом	Ом	Ом	Ом	кг-м"
синхронна швидкість обертання 3000 об/хв													
4АН160S2	22.00	2916	43.04	88.0	0.88	7.0	13	2.2	0.3476	0.6134	0.1482	0.7667	0.04300
4АН160M2	30.00	2913	55.50	90.0	0.91	7.0	1.3	2.2	0.2458	0.4757	0.1110	0.5946	0.05500
4АН180S2	37.00	2946	67.70	91.0	0.91	7.0	1.2	2.2	0.1137	0.2730	0.0617	0.3250	0.08000
4АН180M2	45.00	2943	82.34	91.0	0.91	7.0	1.3	2.2	0.1015	0.2378	0.0561	0.2939	0.09300
4АН200M2	55.00	2940	102.00	91.0	0.90	7.0	1.3	2.5	0.0582	0.1876	0.0410	0.2588	0.16000
4АН200L2	75.00	2940	137.00	92.0	0.90	7.0	1.3	2.5	0.0450	0.1509	0.0337	0.2248	0.19000
4АН225M2	90.00	2943	168.00	92.0	0.88	7.0	1.2	2.2	0.0367	0.1310	0.0275	0.1571	0.24000
4АН250S2	110.0	2952	208.00	93.0	0.88	7.0	1.2	2.2	0.0264	0.0994	0.0190	0.1481	0.44000
4АН250M2	132.0	2943	244.00	93.0	0.88	7.0	1.2	2.2	0.0243	0.0902	0.0180	0.1352	0.49000
4АН280S2	160.0	2958	287.00	94.0	0.90	6.5	1.2	2.2	0.0169	0.0843	0.0115	0.0997	0.85000
4АН280M2	200.0	2958	356.00	94.5	0.90	6.5	1.2	2.2	0.0130	0.0569	0.0087	0.0742	1.00000
4АН315M2	250.0	2964	440.00	94.5	0.91	6.5	1.0	1.9	0.0085	0.0500	0.0060	0.0600	1.70000
4АН355S2	315.0	2970	549.00	94.5	0.92	6.5	1.0	1.9	0.0040	0.0349	0.0044	0.0440	2.40000
4АН355M2	400.0	2970	693.00	95.0	0.92	6.5	1.0	1.9	0.0041	0.0263	0.0031	0.0349	2.80000
синхронна швидкість обертання 1500 об/хв													
4АН160S4	18.50	1452	36.41	88.5	0.87	6.5	1.3	2.1	0.3867	0.7251	0.1994	1.1480	0.09300
4АН160M4	22.00	1457	42.09	90.0	0.88	6.5	1.3	2.1	0.2823	0.5750	0.1568	0.9408	0.12000
4АН180S4	30.00	1465	60.13	90.0	0.84	6.5	1.2	2.2	0.1793	0.3549	0.0915	0.5854	0.18000
4АН180M4	37.00	1468	69.60	90.5	0.89	6.5	1.2	2.2	0.1359	0.2750	0.0727	0.4741	0.22000
4АН200M4	45.00	1473	84.19	91.0	0.89	6.5	1.3	2.5	0.1115	0.2549	0.0531	0.4248	0.35000
4АН200L4	55.00	1475	101.80	92.0	0.89	6.5	1.3	2.5	0.0800	0.1923	0.0389	0.3242	0.42000
4АН225M4	75.00	1476	138.00	92.5	0.89	6.5	1.2	2.2	0.0590	0.1594	0.0271	0.2550	0.60000
4АН250S4	90.00	1479	163.90	93.5	0.89	6.5	1.2	2.2	0.0376	0.1342	0.0215	0.1611	0.88000
4АН250M4	110.0	1478	200.30	93.5	0.89	6.5	1.2	2.2	0.0315	0.1126	0.0180	0.1352	0.96000
4АН280S4	132.0	1470	241.60	93.0	0.89	6.0	1.2	2.0	0.0246	0.1093	0.0182	0.1457	1.80000
4АН280M4	160.0	1470	288.10	93.5	0.90	6.0	1.2	2.0	0.0176	0.0840	0.0137	0.1145	2.10000
4АН315S4	200.0	1473	354.30	94.0	0.91	6.5	1.2	2.0	0.0130	0.0745	0.0099	0.0869	3.20000
4АН315M4	250.0	1473	442.80	94.0	0.91	6.5	1.2	2.0	0.0104	0.0596	0.0079	0.0745	3.70000
4АН355S4	315.0	1482	555.00	94.5	0.91	6.5	1.2	2.0	0.0075	0.0436	0.0055	0.0555	5.80000
4АН355M4	400.0	1482	704.80	94.5	0.91	6.5	1.2	2.0	0.0059	0.0343	0.0041	0.0437	7.00000

Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1

синхронна швидкість обертання 1000 об/хв													
4АН180S6	18.50	975	37.69	87.5	0.85	6.0	1.2	2.0	0.3736	0.7005	0.1634	0.8172	0.19000
4АН180М6	22.00	976	44.31	88.5	0.87	6.0	1.2	2.0	0.2631	0.5462	0.1291	0.6455	0.24000
4АН200М6	30.00	977	57.39	90.0	0.88	6.0	1.3	1.0	0.1955	0.4217	0.0920	0.5367	0.38000
4АН200L6	37.00	981	70.39	90.5	0.88	6.5	1.3	2.1	0.1313	0.3063	0.0656	0.3751	0.43000
4АН225М6	45.00	980	86.12	91.0	0.87	6.5	1.2	2.0	0.1201	0.3065	0.0562	0.3832	0.70000
4АП250S6	55.00	987	103.60	92.5	0.87	6.5	1.2	2.0	0.0786	0.1890	0.0319	0.2973	1.10000
4АН250М6	75.00	988	140.40	93.0	0.89	7.0	1.2	2.0	0.0486	0.1301	0.0219	0.2194	1.40000
4АН315М6	160.0	982	291.30	93.5	0.89	6.0	1.2	1.9	0.0209	0.1093	0.0155	0.1275	2.50000
4А1055S6	200.0	984	358.20	94.0	0.90	6.5	1.2	1.9	0.0174	0.0831	0.0121	0.1057	4.90000
4АН355М6	250.0	984	447.70	94.0	0.90	6.5	1.2	2.0	0.0015	0.0737	0.0098	0.0860	7.80000
синхронна швидкість обертання 750 об/хв													
4АН180S8	15.00	730	33.03	86.0	0.80	5.5	1.2	1.9	0.4396	0.9325	0.2065	1.1323	0.24000
4АН180М8	18.50	730	40.04	87.5	0.80	5.5	1.2	1.9	0.3352	0.7692	0.1758	0.9890	0.30000
4АН200М8	22.00	730	44.59	89.0	0.84	5.5	1.3	2.0	0.2763	0.6414	0.1332	0.8388	0.49000
4АН200L8	30.00	733	68.13	89.5	0.82	5.5	1.3	2.0	0.1582	0.4198	0.0840	0.5490	0.58000
4АП25М8	37.00	735	76.90	90.0	0.81	5.5	1.2	1.9	0.1430	0.3719	0.0658	0.5150	0.83000
4АН250S8	45.00	739	92.50	91.0	0.81	5.5	1.2	1.9	0.1046	0.2616	0.0428	0.4519	1.19000
4АН250М8	55.00	738	111.80	92.0	0.81	6.0	1.2	1.9	0.0826	0.2165	0.0354	0.3739	1.40000
4АН280S8	75.00	731	145.30	92.0	0.85	5.5	1.2	1.9	0.0454	0.1968	0.0348	0.2120	3.40000
4АН280М8	90.00	731	171.40	92.5	0.86	5.5	1.2	1.9	0.0372	0.1669	0.0295	0.1797	3.80000
4АІ-І315S8	110.0	735	208.40	93.0	0.86	5.5	1.2	1.9	0.0296	0.1478	0.0211	0.1900	6.40000
4АН315М8	132.0	735	250.10	93.0	0.86	5.5	1.2	1.9	0.0264	0.1232	0.0185	0.1671	7.30000
4АН355S8	160.0	737	301.50	93.5	0.86	5.5	1.1	1.9	0.0175	0.0949	0.0124	0.1240	10.0000
4АН355М8	200.0	737	374.90	94.0	0.86	5.5	1.1	1.9	0.0123	0.0763	0.0100	0.1056	13.0000
швидкість обертання 600 об/хв													
4АН280S10	45.0	583	93.57	90.0	0.81	5.0	1.0	1.8	0.0776	0.2823	0.0776	0.4234	3.40000
4АН280М0	55.00	583	113.70	90.5	0.81	5.0	1.0	1.8	0.0639	0.2709	0.0677	0.3289	4.00000
4АН315S10	75.00	587	152.30	91.0	0.82	5.5	1.0	1.8	0.0506	0.2022	0.0390	0.2889	6.40000
4АН315М10	90.00	587	181.70	91.5	0.82	3.3	1.0	1.8	0.0387	0.1574	0.0303	0.2179	7.40000
4АН355S10	110.0	589	218.30	92.0	0.83	3.3	1.0	1.8	0.0302	0.1411	0.0212	0.1814	10.0000
4АН355М1	132.0	589	260.50	92.5	0.83	3.3	1.0	1.8	0.0253	0.1182	0.0186	0.1520	11.0000
швидкість обертання 500 об/хв													
4АН315S12	55.00	488	118.10	90.5	0.78	5.5	1.0	1.8	0.0782	0.3353	0.0596	0.4657	6.4000
4АН315М2	75.00	488	160.10	91.0	0.78	3.3	1.0	1.8	0.0481	0.1924	0.0371	0.2748	7.4000
4АН355S12	90.00	489	193.50	91.5	0.77	3.3	1.0	1.8	0.0352	0.1705	0.0261	0.2388	10.000
4АН355М2	110.0	489	235.30	92.0	0.77	3.3	1.0	1.8	0.0262	0.1309	0.0215	0.1870	11.000

Таблиця Д.12 - Основні технічні дані асинхронних короткозамкнених двигунів серії 4А з підвищеним ковзанням; $U_n = 380 В$

Типорозмір двигуна	P_n	n_n	I_n	ккДн	$\cos\phi_n$	I_p/I_n	$\frac{M_p}{M_n}$	$\frac{M_k}{M_n}$	r_1	x_1	r'_2	x'_2	J_D
	кВт	об/хв	А	%	-	-	-	-	Ом	Ом	Ом	Ом	кг-м ²
синхронна швидкість обертання 3000 об/хв													
4АС80A2	1.90	2853	4.41	75.0	0.87	6.5	2.0	2.2	4.9390	2.9930	2.8930	4.8890	0.00180
4АС80B2	2.50	2865	5.73	76.0	0.87	6.5	2.0	2.2	3.3790	2.1120	2.1120	3.7630	0.00210
4АС90L2	3.50	2868	7.71	80.0	0.86	6.5	2.0	2.2	2.2260	1.7690	1.4550	3.1390	0.00350
2АС100S2	4.80	2892	10.31	82.0	0.86	7.5	2.0	2.2	1.4300	1.4080	0.9180	2.5610	0.00590
4АС100L2	6.30	2907	13.54	82.0	0.86	7.5	2.0	2.2	0.8610	0.9100	0.6010	1.7870	0.00750
4АС112M2	8.00	2889	17.18	84.0	0.84	7.5	2.0	2.4	0.5380	0.6920	0.6270	1.6650	0.01000
4АС132M2	11.00	2856	22.29	84.0	0.89	7.5	2.0	2.4	0.3650	0.5530	0.5030	1.0880	0.23000
синхронна швидкість обертання 1500 об/хв													
4АС71A4	0.60	1377	1.83	68.0	0.73	4.5	2.0	2.2	16.830	11.420	14.430	24.040	0.00130
4АС71B4	0.80	1370	2.36	68.5	0.75	4.5	2.0	2.2	13.050	9.3200	11.190	19.580	0.00140
4АС80A4	1.30	1416	3.51	68.5	0.82	5.0	2.0	2.2	8.7700	5.3300	4.6400	8.1500	0.00320
4АС80B4	1.70	1418	4.49	70.0	0.82	5.0	2.0	2.2	6.3700	4.0200	3.5800	6.3700	0.00330
4АС90L4	2.40	1413	5.83	76.0	0.82	6.0	2.0	2.2	4.5300	3.4000	2.6800	5.6600	0.00560
2АС100S4	3.20	1437	7.73	76.5	0.82	6.0	2.0	2.2	2.2800	2.3300	1.5700	3.7000	0.00870

Додатки

4AC100L4	4.25	1439	10.07	78.0	0.82	6.0	2.0	2.2	1.5500	1.7700	1.1800	3.0600	0.01100
4AC112M4	5.60	1416	12.94	79.0	0.83	7.0	2.0	2.2	1.1200	1.2800	1.2100	2.0400	0.01700
4AC132S4	8.50	1397	18.37	82.5	0.85	7.0	2.0	2.2	0.6110	1.1140	0.9580	1.5570	0.02800
4AC132M4	11.80	1409	25.04	84.0	0.85	7.0	2.0	2.2	0.3780	0.7380	0.6330	1.0540	0.04000
4AC160S4	17.00	1409	35.44	84.5	0.86	7.0	2.0	2.2	0.2790	0.5090	0.3970	0.8070	0.10000
4AC160M4	20.00	1421	40.04	87.0	0.87	7.0	20	2.2	0.2030	0.3960	0.3020	0.7140	0.13000
4AC180S4	21.00	1415	40.22	86.0	0.92	7.0	2.0	2.2	0.2410	0.4700	0.3230	0.6020	0.19000
4AC180M4	26.50	1434	49.86	88.5	0.91	7.0	2.0	2.2	0.1460	0.3000	0.2070	0.4060	0.23000
4AC200M4	31.00	1415	59.29	87.5	0.92	7.0	2.0	2.2	0.1260	0.2780	0.2300	0.3710	0.37000
4AC200L4	40.00	1413	73.22	89.0	0.93	7.0	2.0	2.2	0.0901	0.2193	0.1803	0.3305	0.45000
4AC225M4	50.00	1413	94.11	87.5	0.92	7.0	2.0	2.2	0.0678	0.8700	0.1426	0.2571	0.64000
4AC250S4	56.00	1406	105.4	87.5	0.92	7.0	2.0	2.2	0.0417	0.1503	0.1419	0.1419	1.00000
4AC250M4	63.00	1404	117.9	87.0	0.93	7.0	2.0	2.2	0.0354	0.1305	0.1287	0.1287	1.20000
синхронна швидкість обертання 1000 об/хв													
4AC71A6	0.40	896	1.39	62.5	0.70	4.0	2.0	2.1	30.070	20.580	26.910	28.490	0.00170
4AC71B6	0.63	898	2.10	65.0	0.70	4.0	2.0	2.1	17.810	13.620	17.810	19.900	0.00200
4AC80A6	0.80	930	2.92	61.0	0.68	4.0	2.0	2.1	12.810	9.7900	9.7900	15.820	0.00250
4AC80B6	1.20	922	3.75	66.5	0.73	4.0	2.0	2.1	7.6300	7.0400	7.0400	12.320	0.00350
4AC90L6	1.70	938	5.04	71.0	0.72	6.0	1.9	2.1	5.2400	5.2400	4.0200	9.6000	0.00730
4AC100L6	2.60	947	7.60	75.0	0.76	6.0	1.9	2.1	2.7200	3.4700	2.0800	6.3700	0.01300
1ACП2МА	3.20	927	9.10	72.0	0.74	6.5	1.9	2.1	2.1000	1.9100	2.9000	2.6600	0.01700
4AC112MB	4.20	915	10.74	75.0	0.79	6.5	1.9	2.1	1.8200	1.6200	2.4600	2.2500	0.02100
4AC132S6	6.30	936	15.10	79.0	0.80	6.5	1.9	2.1	1.1500	1.1500	1.1800	1.7500	0.04000
4AC132M6	8.50	942	20.12	80.0	0.80	6.5	1.9	2.1	0.6780	0.7980	0.8310	1.3120	0.05800
4AC160S6	12.00	923	25.93	82.5	0.85	6.5	1.9	2.1	0.5510	0.7810	0.7380	0.8480	0.14000
4AC160M6	16.00	922	33.95	84.0	0.85	6.5	1.9	2.1	0.3890	0.6350	0.6030	0.8420	0.18000
4AC180M6	19.00	924	37.85	84.5	0.90	6.5	1.9	2.1	0.3550	0.6970	0.4820	0.6970	0.22000
4AC200M6	22.00	927	43.39	83.5	0.92	6.5	1.9	2.1	0.2690	0.5580	0.3850	0.6080	0.40000
4AC200L6	28.00	938	54.85	85.5	0.91	6.5	1.9	2.1	0.1840	0.3970	0.2730	0.4410	0.45000
4AC225M6	33.00	931	68.86	81.0	0.91	6.5	1.9	2.1	0.1340	0.3160	0.2520	0.3510	0.74000
4AC250S6	40.00	946	75.66	89.0	0.90	6.5	1.9	2.1	0.0960	0.2297	0.1686	0.2908	1.16000
4AC250M6	45.00	962	89.57	86.5	0.88	6.5	1.9	2.1	0.0639	0.1498	0.1150	0.1940	1.26000
синхронна швидкість обертання 750 об/хв													
4AC71B8	0.30	675	1.49	50.0	0.61	3.5	1.9	2.0	33.960	28.050	35.440	42.820	0.00190
4AC80A8	0.45	695	2.09	53.5	0.61	3.5	.9	2.0	22.110	18.950	17.890	33.680	0.00340
4AC80B8	0.60	688	2.49	58.0	0.63	3.5	.9	2.0	15.900	15.020	15.020	28.270	0.00410
4AC90LA8	0.90	700	3.44	61.0	0.65	3.5	.8	2.0	10.230	10.870	7.6700	20.470	0.00670
4AC90LB8	1.20	701	4.37	65.0	0.64	3.5	.8	2.0	7.0500	8.0500	6.0400	16.110	0.00860
4AC100L8	1.60	710	5.58	69.0	0.63	5.5	1.8	2.0	4.7300	6.3100	3.8600	13.010	0.01300
4AC112M	2.20	679	7.54	68.0	0.65	6.0	1.8	2.0	2.9200	3.5000	4.9600	5.2500	0.01800
4AC112MB	3.20	668	9.62	72.0	0.70	6.0	1.8	2.0	2.2000	2.7400	3.8900	4.1200	0.02400
4AC132S8	4.50	689	12.82	76.0	0.70	6.0	1.8	2.0	1.4400	2.0600	2.0600	3.2600	0.04200
4AC132M8	6.00	695	16.87	77.0	0.70	6.0	1.8	2.0	0.9000	1.4340	1.4340	2.4780	0.05800
4AC160S8	9.00	678	20.91	81.5	0.80	6.0	1.8	2.0	0.8310	1.4730	1.0500	1.7400	0.14000
4AC160M8	12.50	683	29.06	82.5	0.79	6.0	1.8	2.0	0.4920	1.0600	0.8330	1.1360	0.18000
4AC180M8	15.00	692	32.79	83.5	0.83	6.0	1.8	2.0	0.4090	0.8050	0.5770	0.8720	0.25000
4AC200M8	20.00	687	42.70	83.5	0.85	6.0	1.8	2.0	0.3350	0.7210	0.4640	0.7730	0.40000
4AC225M8	25.50	696	54.76	83.0	0.85	6.0	1.8	2.0	0.1690	0.4020	0.3370	0.4820	0.74000

Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1

Таблиця Д.13 - Основні технічні дані двошвидкісних електродвигунів серії 4А;
 $U_n = 380$ В; схема перемикачів Δ/ΥΥ

Типорозмір двигуна	P_n	p	I_n	ККД _Д	cosφ _н	$I_{п}/I_n$	$M_{п}/M_n$	$M_{к}/M_n$	r_1	x_1	r_2'	x_2'	J_D	P_n
	кВт	шт	А	%	-	-	-	-	Ом	Ом	Ом	Ом	кг-м ²	кВт
Синхронна швидкість обертання 1500/3000 об/хв														
4АА56А4/2	0.10 0.14	4 2	6.7 10.7	35.5 60.0	45.0 50.0	0.61 0.70	3.5 4.0	1.8 1.5	2.2 2.2	0.560 0.260	0.320 0.100	0.300 0.200	0.300 0.120	0.0007
4АА56В4/2	0.12 0.18	4 2	7.1 12.1	36.0 58.0	49.0 57.0	0.62 0.72	3.5 4.0	1.6 1.2	2.2 2.2	0.530 0.240	0.290 0.094	0.280 0.180	0.300 0.120	0.0008
4АА63А4/2	0.19 0.27	4 2	7.3 12.3	36.0 60.0	55.0 61.0	0.66 0.75	3.5 4.0	1.6 1.2	2.2 2.2	0.430 0.089	0.240 0.170	0.240 0.120	0.300 0.120	0.0012
4АА63В4/2	0.22 0.37	4 2	7.0 14.9	36.0 61.0	57.0 61.0	0.70 0.88	3.5 4.0	1.5 1.1	1.9 1.8	0.370 0.190	0.200 0.089	0.220 0.160	0.280 0.120	0.0013
4А71А4/2	0.45 0.75	4 2	6.2 11.0	34.0 64.0	64.0 67.0	0.73 0.89	4.0 4.0	1.5 1.2	1.8 1.8	0.270 0.130	0.180 0.083	0.170 0.120	0.260 0.110	0.0014
4А71В4/2	0.63 0.95	4 2	6.5 11.3	34.0 64.5	67.0 69.0	0.75 0.89	4.5 4.5	1.3 1.3	1.9 1.9	0.250 0.130	0.180 0.084	0.160 0.120	0.260 0.110	0.0016
4А80А4/2	1.10 1.50	4 2	4.3 6.2	36.0 42.0	73.0 72.0	0.79 0.89	5.0 4.0	1.7 1.5	2.0 1.8	0.220 0.120	0.120 0.067	0.110 0.072	0.140 0.073	0.0033
4А90LА4/2	1.50 2.00	4 2	6.1 7.6	39.5 4.5	76.0 74.0	0.81 0.86	5.5 5.0	1.7 1.7	2.1 1.9	0.200 0.110	0.130 0.074	0.130 0.088	0.170 0.086	0.0035
4А90LB4/2	2.00 2.50	4 2	3.8 5.1	29.5 44.5	77.0 77.0	0.86 0.89	6.0 6.0	1.7 1.8	2.2 2.1	0.170 0.090	0.120 0.066	0.080 0.060	0.160 0.069	0.0063
4А100S4/2	2.65 3.40	4 2	3.8 5.0	28.0 41.0	80.0 77.0	0.82 0.91	6.0 6.0	1.8 1.8	2.2 2.2	0.150 0.076	0.140 0.078	0.083 0.059	0.190 0.082	0.0092
4А100L4/2	3.20 4.20	4 2	3.7 4.5	28.0 40.5	82.0 80.0	0.82 0.92	7.0 7.0	1.8 1.8	2.2 2.2	0.130 0.065	0.140 0.070	0.079 0.051	0.200 0.082	0.0120
4А112M4/2	4.20 5.00	4 2	3.1 3.1	19.5 29.0	82.0 77.0	0.84 0.89	7.5 7.5	1.3 1.1	1.8 1.8	0.140 0.072	0.140 0.071	0.061 0.037	0.021 0.074	0.0170
4А132S4/2	6.00 6.70	4 2	2.9 2.8	17.0 24.0	84.0 78.0	0.87 0.90	7.5 7.5	1.3 1.1	1.8 1.8	0.110 0.054	0.170 0.080	0.054 0.033	0.210 0.082	0.0280
4А132M4/2	8.50 9.50	4 2	2.9 2.6	16.5 24.5	86.0 81.0	0.88 0.90	7.5 7.5	1.3 1.1	1.8 1.8	0.100 0.051	0.170 0.076	0.054 0.030	0.230 0.077	0.0400
4А160S4/2	11.00 14.00	4 2	2.1 2.7	13.0 16.5	85.0 83.0	0.85 0.92	7.5 7.5	1.5 1.2	2.1 2.0	0.120 0.060	0.180 0.100	0.041 0.029	0.220 0.110	0.1100
4А160M4/2	14.00 17.00	4 2	2.1 2.4	12.5 16.0	87.0 84.0	0.87 0.92	7.5 7.5	1.5 1.2	2.1 2.0	0.110 0.054	0.170 0.092	0.040 0.026	0.240 0.110	0.1400
4А180S4/2	18.00 21.00	4 2	1.9 2.2	10.5 13.5	88.5 85.0	0.90 0.93	6.5 6.5	1.3 1.1	1.8 1.8	0.091 0.046	0.170 0.090	0.035 0.023	0.200 0.099	0.2100
4А180M4/2	22.00 26 50	4 2	1.8 2.0	11.0 14.0	90.0 86.0	0.90 0.93	7.5 7.0	1.3 1.1	1.8 1.8	0.078 0.041	0.160 0.091	0.033 0.027	0.200 0.098	0.2600
4А200L4/2	33.50 37.00	4 2	1.5 1.6	7.5 11.0	91.0 87.0	0.87 0.89	7.0 7.5	1.8 1.8	2.0 2.2	0.067 0.032	0.160 0.083	0.029 0.018	0.280 0.120	0.5900
4А225M4/2	42.50 45.00	4 2	1.2 1.2	6.5 9.0	92.0 86.0	0.85 0.87	7.0 7.5	1.8 1.8	2.0 2.2	0.540 0.026	0.150 0.078	0.023 0.014	0.280 0.120	0.8500
4А250S4/2	50.00 60.00	4 2	1.2 1.4	7.0 8.5	93.0 87.0	0.86 0.89	6.5 7.0	1.8 1.6	2.0 2.2	0.041 0.023	0.150 0.091	0.022 0.016	0.230 0.120	1.3000
4А250M4/2	60.00 71.00	4 2	1.3 1.4	7.0 8.5	93.0 88.0	0.87 0.90	6.5 7.0	1.8 1.6	2.0 2.2	0.044 0.023	0.160 0.089	0.024 0.015	0.260 0.120	1.5000
Синхронна швидкість обертання 750/1500 об/хв.														
4А90L8/4	0.63 1.00	8 4	4.0 4.7	19.5 26.5	73.0 75.0	0.72 0.85	7.5 7.5	1.3 1.3	1.8 1.8	0.250 0.120	0.280 0.096	0.150 0.063	0.520 0.160	0.0060
4А100S8/4	1.00 1.70	8 4	4.3 4.9	17.0 23.0	68.0 80.0	0.61 0.87	5.0 6.0	1.2 1.4	1.8 1.9	0.240 0.110	0.260 0.092	0.130 0.510	0.470 0.150	0.1200
4А100L8/4	1.40 2.40	8 4	5.3 5.2	17.0 22.0	69.0 81.0	0.62 0.89	5.0 6.0	1.2 1.2	1.8 1.8	0.230 0.100	0.270 0.093	0.140 0.010	0.500 0.150	0.0150
4А112МА8/4	1.90 3.00	8 4	4.7 4.5	25.5 32.5	72.0 75.0	0.71 0.89	7.5 7.5	1.2 1.0	1.8 1.8	0.210 0.100	0.230 0.085	0.140 0.060	0.290 0.092	0.0180
4А112МВ8/4	2.20	8	3.9	25.5	75.0	0.69	7.5	1.2	1.8	0.180	0.200	0.130	0.270	0.0240

Додатки

	3.60	4	3.9	32.0	77.0	0.88	7.5	1.0	1.8	0.092	0.077	0.053	0.088	
4A132S8/4	3.20	8	3.8	18.5	77.0	0.71	7.5	1.2	1.8	0.180	0.210	0.098	0.300	0.0430
	5.30	4	3.7	23.5	80.0	0.90	7.5	1.0	1.8	0.089	0.081	0.042	0.100	
4A132M8/4	4.20	8	1.8	18.5	80.0	0.72	7.5	1.2	1.8	0.150	0.190	0.093	0.290	0.0580
	7.10	4	2.2	24.0	82.0	0.90	7.5	1.0	1.8	0.077	0.075	0.039	0.096	
4A160S8/4	6.00	8	2.3	10.5	76.5	0.69	5.5	1.5	2.0	0.097	0.150	0.036	0.230	0.1500
	9.00	4	2.5	15.0	84.0	0.92	7.0	1.2	2.0	0.062	0.078	0.024	0.120	
4A160M8/4	9.00	8	2.5	10.0	79.0	0.69	5.5	1.5	2.0	0.150	0.250	0.059	0.400	0.2000
	13.00	4	2.6	14.0	86.5	0.91	7.0	1.2	2.0	0.064	0.086	0.026	0.140	
4A180M8/4	13.00	8	2.2	10.0	84.6	0.76	3.3	1.2	1.8	0.130	0.250	0.055	0.370	0.28
	18.00	4	2.2	11.5	87.5	0.92	6.5	1.0	1.8	0.064	0.110	0.026	0.140	
4A200M8/4	17.00	8	2.4	9.5	86.0	0.75	5.0	1.3	1.8	0.110	0.240	0.049	0.360	0.5200
	25.00	4	2.1	11.0	87.0	0.91	6.0	1.4	2.0	0.060	0.100	0.023	0.130	
4A200L8/4	20.00	8	1.4	9.5	87.0	0.77	5.0	1.4	1.8	0.110	0.250	0.050	0.380	0.5800
	28.00	4	1.5	11.0	88.0	0.91	6.0	1.4	2.0	0.057	0.100	0.022	0.130	
4A225M8/4	22.40	8	1.4	8.5	87.0	0.69	6.0	2.0	2.2	0.082	0.190	0.035	0.320	0.9300
	33.50	4	1.5	10.0	87.0	0.88	7.0	1.5	2.2	0.042	0.085	0.017	0.110	
4A250S8/4	30.00	8	1.5	7.0	89.5	0.75	5.0	1.6	1.8	0.082	0.170	0.031	0.400	1.7000
	45.00	4	1.5	8.0	88.5	0.90	6.0	1.4	1.9	0.045	0.089	0.016	0.160	
4A250M8/4	37.00	8	1.4	7.0	89.5	0.75	6.0	1.8	1.8	0.080	0.160	0.030	0.390	1.8000
	55.00	4	1.4	8.0	89.5	0.90	6.5	1.5	2.0	0.043	0.081	0.015	0.150	
Синхронна швидкість обертання 500/1000 об/хв.														
4A180M12/6	6.70	12	4.6	11.0	76.0	0.66	4.5	1.6	1.9	0.180	0.400	0.110	0.590	0.2800
	11.00	6	3.0	11.0	84.5	0.89	6.5	1.3	1.9	0.068	0.100	0.027	0.130	
4A200M12/6	9.00	12	2.3	10.5	77.5	0.55	4.0	1.5	1.8	0.140	0.340	0.079	0.630	0.5200
	14.00	6	1.8	10.5	88.0	0.86	6.5	1.5	2.0	0.052	0.085	0.020	0.140	
4A200L12/6	10.00	12	2.3	10.5	80.0	0.56	4.0	1.5	1.8	0.130	0.320	0.074	0.600	0.5800
	17.00	6	1.9	10.5	88.5	0.86	6.5	1.5	2.0	0.056	0.089	0.021	0.150	
4A225M12/6	12.50	12	1.9	9.0	81.5	0.57	4.0	1.4	1.8	0.110	0.290	0.059	0.570	0.9300
	22.00	6	1.7	9.0	88.0	0.86	6.0	1.3	1.8	0.051	0.094	0.019	0.160	
4A250S12/6	16.00	12	1.3	8.5	83.0	0.53	4.0	1.7	1.8	0.093	0.280	0.047	0.450	1.7000
	28.00	6	1.3	8.0	90.0	0.85	6.0	1.5	1.8	0.041	0.089	0.014	0.120	
4A250M12/6	18.50	12	1.3	8.5	83.5	0.54	4.0	1.7	1.8	0.095	0.270	0.046	0.450	1.8000
	35.50	6	1.4	8.0	89.5	0.85	6.0	1.5	1.8	0.047	0.095	0.015	0.140	

Таблиця Д.13 - Основні технічні дані асинхронних двигунів серії 4А з фазним ротором; $U_N = 220/380 \text{ В}$; ступінь захисту ІР44

Типорозмір двигуна	P_N	ККД _л	$\cos\varphi_N$	I_N	E_{po}	S_N	S_K	M_K/M_N	R'_1	X'_1	R''_2	X''_2	J_d
	кВт	%	-	А	В	%	%	-	Ом	Ом	Ом	Ом	кг*м ²
синхронна швидкість обертання 1500 об/хв													
4АК160S4	11.0	86.5	0.86	22	305	4.4	33.0	3.0	0.038	0.068	0.051	0.086	0.10
АК160М4	14.0	88.5	0.87	29	300	3.7	32.1	3.5	0.032	0.060	0.042	0.078	1.13
4АК180М4	18.5	89.0	0.88	38	295	2.9	31.1	4.0	0.022	0.050	0.034	0.063	0.23
4АК200М4	22.0	90.0	0.87	45	340	2.5	22.0	4.0	0.024	0.042	0.026	0.075	0.37
4АК200L4	30.0	90.5	0.87	55	350	2.5	22.0	4.0	0.026	0.057	0.030	0.087	0.45
4АК225М4	37.0	90.0	0.87	160	160	3.5	20.0	3.0	0.023	0.061	0.027	0.069	0.64
4АК250SA4	45.0	91.0	0.88	170	230	3.0	20.5	3.0	0.020	0.067	0.030	0.080	1.00
4АК250SB4	55.0	90.5	0.90	170	200	2.3	19.6	3.0	0.017	0.061	0.025	0.073	1.10
4АК250М4	71.0	91.5	0.86	170	250	2.5	19.5	3.0	0.015	0.053	0.021	0.064	1.20
синхронна швидкість обертання 1000 об/хв													
4АК160S4	7.5	82.5	0.77	18	300	5.0	30.1	3.5	0.054	0.079	0.068	0.120	0.14
4АК160М6	10.0	84.5	0.76	20	310	4.3	27.1	3.8	0.430	0.071	0.058	0.130	0.18
4АК180М6	13.0	85.5	0.80	25	325	4.4	29.1	4.0	0.036	0.065	0.057	0.110	0.22
4АК200М6	18.5	88.0	0.81	35	360	3.5	27.5	3.5	0.030	0.060	0.038	0.078	0.40
4АК200L6	22.0	88.0	0.80	45	330	3.5	21.0	3.5	0.032	0.066	0.041	0.080	0.45
4АК225М6	30.0	89.0	0.85	150	140	3.3	19.5	2.5	0.029	0.073	0.030	0.091	0.74
4АК250S6	37.0	89.0	0.84	165	150	3.5	18.0	2.5	0.029	0.063	0.024	0.078	1.16
4АК250М6	45.0	90.5	0.87	160	180	2.5	17.0	2.5	0.029	0.062	0.024	0.092	1.26

синхронна швидкість обертання 1500 об/хв													
4AK160S8	5.5	80.0	0.70	14	300	6.4	29.0	2.5	0.060	0.112	0.094	0.175	0.14
4AK160M8	7.1	82.0	0.70	6	290	5.5	23.3	3.0	0.053	0.110	0.079	0.208	0.18
4AK180M8	11.0	85.0	0.72	25	270	4.4	22.7	3.5	0.041	0.086	0.062	0.167	0.25
4AK200M8	15.0	86.0	0.70	28	360	3.5	23.0	3.0	0.040	0.081	0.048	0.120	0.40
4AK200L8	18.5	86.0	0.73	40	300	3.6	21.5	3.0	0.038	0.089	0.046	0.200	0.61
4AK225M8	22.0	87.0	0.82	140	102	4.5	19.5	2.2	0.039	0.100	0.043	0.130	0.74
4AK250S8	30.0	88.5	0.81	155	125	4.0	20.0	2.2	0.033	0.081	0.034	0.100	1.20
4AK250M8	37.0	89.0	0.80	155	148	3.5	18.5	2.2	0.031	0.078	0.031	0.100	1.40

Таблиця Д. 14 - Основні технічні дані асинхронних електродвигунів серії 4А з фазним ротором; $U_H = 220/380$ В; ступінь захисту IP23

Типорозмір двигуна	P_H	ККД _H	$\cos\phi_H$	I_{pH}	E_{p0}	S_H	S_K	M_K/M_H	R'_1	X'_1	R''_2	X''_2	J_d
	кВт	%	-	А	В	%	%	-	Ом	Ом	Ом	Ом	кг*м ²
синхронна швидкість обертання 1500об/хв													
4АНК160S4	14.0	86.5	0.85	27	330	5.3	33.0	3.0	0.047	0.081	0.061	0.100	0.1
4АНК160M4	17.0	88.0	0.87	34	315	4.1	32.3	3.5	0.035	0.067	0.047	0.087	0.13
4АНК160S4	14.0	86.5	0.85	27	330	5.3	33.0	3.0	0.047	0.081	0.061	0.100	0.1
4АНК160M4	17.0	88.0	0.87	34	315	4.1	32.3	3.5	0.035	0.067	0.047	0.087	0.13
4АНК180S4	22.0	87.0	0.86	43	300	5.2	33.0	3.2	0.033	0.061	0.054	0.089	0.19
4АНК180M4	30.0	88.0	0.81	63	290	4.1	30.4	3.2	0.028	0.055	0.044	0.083	0.23
4АНК200M4	37.0	90.0	0.88	62	360	3.0	23.0	3.0	0.029	0.065	0.035	0.099	0.36
4АНК200L4	45.0	90.0	0.88	75	375	3.5	22.5	3.0	0.029	0.067	0.036	0.100	0.43
4АНК225M4	55.0	89.5	0.87	200	170	3.6	20.2	2.5	0.031	0.084	0.035	0.100	0.61
4АНК250SA4	75.0	90.0	0.88	250	180	4.5	20.5	2.3	0.028	0.091	0.039	0.110	0.89
4АНК250SB4	90.0	91.5	0.87	260	220	4.0	19.0	2.5	0.021	0.075	0.031	0.100	0.89
4АНК250M4	110.0	92.0	0.90	260	250	3.5	18.0	2.5	0.022	0.078	0.031	0.100	0.97
4АНК280S4	132.0	92.0	0.88	330	251	2.9	11.2	2.0	0.028	0.130	0.031	0.140	1.81
4АНК280M4	160.0	92.5	0.88	330	300	2.6	10.7	2.0	0.024	0.120	0.028	0.140	2.11
4АНК315S4	200.0	93.0	0.89	396	312	2.5	9.8	2.0	0.022	0.140	0.026	0.140	3.21
4АНК315M4	250.0	93.0	0.90	425	360	2.5	8.8	2.0	0.022	0.150	0.025	0.140	3.72
4АНК355S4	315.0	93.5	0.90	460	420	2.2	8.4	2.0	0.020	0.120	0.022	0.150	5.82
4АНК355M4	400.0	94.0	0.90	485	505	2.0	7.7	2.0	0.019	0.120	0.020	0.140	7.09
синхронна швидкість обертання 1000 об/хв													
4АНК180S6	13.0	83.5	0.81	42	205	6.4	36.5	3.0	0.048	0.084	0.079	0.110	0.19
4АНК180M6	18.5	84.0	0.81	42	205	5.7	35.5	3.0	0.044	0.087	0.077	0.110	0.24
4АНК200M6	22.0	88.0	0.81	37	380	3.5	24.5	3.0	0.032	0.071	0.043	0.110	0.38
4АНК200L6	30.0	88.5	0.82	46	375	4.0	23.5	3.0	0.032	0.073	0.042	0.120	0.43
4АНК225M6	37.0	89.0	0.86	180	140	4.0	23.0	1.9	0.032	0.070	0.038	0.100	0.7
4АНК250SA6	45.0	89.5	0.86	200	155	4.0	21.5	2.3	0.028	0.069	0.032	0.090	1.1
4АНК250SB6	55.0	91.0	0.86	185	190	3.5	20.0	2.5	0.024	0.060	0.027	0.088	1.1
4АНК250M6	75.0	91.5	0.85	200	250	3.0	19.0	2.5	0.022	0.059	0.025	0.087	1.4
4АНК280S6	90.0	91.0	0.88	277	202	3.6	14.7	1.9	0.033	0.120	0.038	0.140	2.5
4АНК280M6	110.0	91.5	0.87	297	230	3.6	14.0	1.9	0.034	0.130	0.038	0.140	2.9
4АНК315S6	132.0	92.0	0.88	320	257	3.0	14.0	1.9	0.026	0.120	0.029	0.140	4.9
4АНК315M6	160.0	92.5	0.88	352	291	3.0	10.2	1.9	0.024	0.110	0.024	0.130	6.1
4АНК355S6	200.0	93.0	0.89	411	304	2.5	9.5	1.8	0.025	0.130	0.027	0.160	7.8
4АНК355M6	250.0	93.0	0.89	401	380	2.5	8.8	1.8	0.022	0.120	0.023	0.150	9.5
синхронна швидкість обертання 750 об/хв													
4АНК180S8	11.0	83.5	0.75	42	205	5.7	35.4	3.0	0.049	0.098	0.074	0.110	0.24
4АНК180M8	14.0	84.5	0.76	45	215	4.9	31.4	3.0	0.047	0.099	0.055	0.092	0.3
4АНК200M8	18.0	86.0	0.78	30	380	4.5	31.5	2.5	0.046	0.097	0.054	0.140	0.49
4АНК200L8	22.0	87.0	0.79	40	330	4.5	28.0	2.5	0.042	0.095	0.066	0.140	0.58
4АНК225M8	30.0	86.5	0.80	165	120	4.1	18.4	1.8	0.043	0.098	0.046	0.150	0.83
4АНК250SA8	37.0	87.5	0.80	190	115	5.5	21.0	2.2	0.044	0.100	0.047	0.130	1.19
4АНК250SB8	45.0	89.0	0.82	190	140	4.0	20.0	2.2	0.036	0.090	0.040	0.130	1.19
4АНК250M8	55.0	89.5	0.83	185	190	3.5	18.0	2.2	0.029	0.076	0.031	0.110	1.4
4АНК280S8	75.0	90.5	0.84	257	190	4.0	14.0	1.9	0.031	0.140	0.040	0.150	3.4
4АНК280M8	90.0	90.5	0.84	267	214	4.0	13.5	1.9	0.031	0.140	0.040	0.160	3.8
4АНК315S8	110.0	91.5	0.84	311	225	3.5	11.3	1.9	0.030	0.140	0.032	0.160	6.4

Додатки

4АНК315М8	132.0	92.0	0.84	364	247	3.5	10.2	1.9	0.031	0.140	0.031	0.160	7.3
4АНК355S8	160.0	92.5	0.86	353	285	2.7	9.6	1.7	0.024	0.190	0.026	0.150	10
4АНК355М8	200.0	92.5	0.86	359	350	2.7	9.0	1.7	0.022	0.130	0.025	0.150	13
синхронна швидкість обертання 600 об/хв													
4АНК280S10	45	89	0.78	178	162	5	20.5	1.8	0.035	0.180	0.061	0.170	3.4
4АНК280M10	55	89.5	0.79	180	185	4.5	20.5	1.8	0.036	0.120	0.053	0.160	4
4АНК315S10	75	90	0.80	221	217	4.5	15.8	1.8	0.036	0.140	0.052	0.190	6.4
4АНК315M10	90	90.5	0.81	223	260	4.2	15	1.8	0.034	0.1300	0.045	0.170	7.4
4АНК355S10	110	90.5	0.81	242	283	3.8	14	1.7	0.031	.150	0.044	0.170	10
4АНК315S12	55	89	0.75	235	165	5	16.4	1.8	0.044	0.180	0.073	0.270	6.4
4АНК315S12	75	90	0.75	221	207	5	16	1.8	0.036	0.140	0.059	0.220	7.4
4АНК315S12	90	89.5	0.73	259	222	4	14.2	1.7	0.034	0.160	0.057	0.240	10
4АНК315S12	110	90	0.73	265	265	4	13.5	1.7	0.031	0.160	0.052	0.230	11

Наукове видання

**ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА.
ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА
Частина 1**

А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко

Викладено в авторській редакції

Підписано до друку 2020. Формат 60x84/16
Папір офсетний. Друк лазерний. Авт. Арк.
Ум. друк. арк. 17,6. Тираж 100 прим. Зам. _____

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі
Вінницького національного аграрного університету
м. Вінниця, вул. Сонячна, 3, 21008
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців,
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 5009 від 10..11. 2015